

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
รอยต่อเฮเทอโรโครงสร้างซิลิคอนดอปในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีสารเจือ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

STUDY OF ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS IN
HETEROJUNCTION SILICON SOLAR CELL WITH SILICON DOTS IN
DOPED ZINC OXIDE MATRIX

SUPANUT LAOHAWIROJ



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic year 2024

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรอยต่อเฮเทอโร
โครงสร้างซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีสารเจือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุณบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล)

ประธานกรรมการ



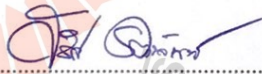
(ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี)

กรรมการ



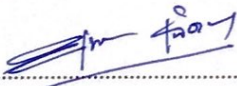
(รศ. ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์)

กรรมการ



(รศ. ดร.สุเดตต์ พจน์ประไพ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ : การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด
ซิลิคอนรอยต่อเฮเทอโรโครงสร้างซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีสารเจือ
(STUDY OF ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS IN HETEROJUNCTION
SILICON SOLAR CELL WITH SILICON DOTS IN DOPED ZINC OXIDE MATRIX)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์, 190 หน้า.

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สาม/ผงซิลิคอน/ซิงค์ออกไซด์โด๊ปสารเจือ/ต้นทุนต่ำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาการสร้างฟิล์มบางแสงซิลิคอนดอท (SD) จากสารละลาย
เมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยบิสมีทและอะลูมิเนียมผสมเข้ากับผงซิลิคอนที่ผลิตขึ้นจากแผ่น
ซิลิคอนเสื่อมสภาพ ด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยแรงหมุนเหวี่ยง และผ่านการอบที่เงื่อนไขการอบด้วย
ด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal annealing: RTA) ด้วยอุณหภูมิ 930 °C ภายใต้
ความดันบรรยากาศ เพื่อสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์ให้ก่อรูปเกรนผลึกขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ ซึ่งฟิล์มบางที่ผลิตขึ้นถูกจำแนก
ออกเป็นโครงสร้างซ้อนทับและโครงสร้างสลับชั้น

โดยพบว่าการสะท้อนกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD ทั้งในเมตริกซ์ AZO และ BiZnO
มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งโครงสร้างซ้อนทับแสดงผลการสะท้อนกลับน้อยกว่าโครงสร้าง
สลับชั้น แต่สำหรับค่าการทะลุผ่านของแสง ผลที่ได้จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับค่าการสะท้อนแสงกลับ
ของแสง และโครงสร้างซ้อนทับมีค่าการทะลุผ่านที่มากกว่าโครงสร้างสลับชั้นในช่วงแสงทุกๆ ย่าน
ความยาวคลื่น เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางรับแสง SD พบว่า มีการขยาย
ขอบการดูดกลืนแสง แต่เดิมฟิล์มบางรับแสง AZO หรือ BiZnO มีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่บริเวณ
ความยาวคลื่นแสง Ultraviolet (UV) เมื่อพัฒนาเป็นฟิล์มบางรับแสง SD สามารถขยายขอบการ
ดูดกลืนแสงมาที่บริเวณความยาวคลื่นแสงที่ดวงตามองเห็น (Visible) และมาที่บริเวณความยาวคลื่น
แสง Infrared (IR) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของฟิล์มบางรับแสง SD แม้ว่าอนุภาคผงซิลิคอนจะมีขนาด
ระดับไมครอนแต่สามารถแสดงการขยายขอบการดูดกลืนแสงได้ นอกจากนี้ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม
บาง SD ยังอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมแก่การนำมาเป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีค่า
ระหว่าง 1.8 – 2.3 สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าฟิล์มบางรับแสง SD ในเมตริกซ์ BiZnO มีค่า
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าฟิล์มบางรับแสง SD ในเมตริกซ์ AZO และฟิล์มบางรับแสง SD
โครงสร้างสลับชั้นมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าโครงสร้างซ้อนทับ ซึ่งคือฟิล์มบางใน
เงื่อนไข BiZnO/SD/BiZnO_4 stack อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่าความหนาของฟิล์มบาง SD จะพบว่า
ความหนาของฟิล์มบาง SD ตั้งแต่ 300 nm – 1000 nm ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากที่สุด

นอกจากนี้ในงานวิจัยได้พัฒนาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiNx ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD พบว่าเงื่อนไขเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้นจำนวน 2 ชั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากถึง 1.86% เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx และจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เรื่องของราคาต้นทุนการผลิต พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD มีราคาที่ถูกกว่าเซลล์ทั่วไป 0.48 บาทต่อวัตต์ เพราะฉะนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD สามารถนำมาต่อยอดและพัฒนาให้กับทางอุตสาหกรรมได้อย่างมาก อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่จะประสบความสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

SUPANUT LAOHAWIROJ : STUDY OF ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS IN HETEROJUNCTION SILICON SOLAR CELL WITH SILICON DOTS IN DOPED ZINC OXIDE MATRIX. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THIPWAN FANGSUWANNARAK, Ph.D., 190 PP.

Keyword: Third generation solar cell/Silicon powder/Doped zinc oxide/Low cost

Silicon dots (SD) thin films were developed using the zinc oxide matrix doped with bismuth and aluminum, mixed with silicon powder derived from waste silicon. The SD thin films were deposited by the spin coating technique. To promote the formation of the zinc oxide crystal grains and enhance the current density and conductivity, the rapid thermal annealing (RTA) process was performed at 930 °C under the ambient atmosphere. The fabricated SD thin film can be classified into 2 structures: a continuous SD layer structure and a sandwich-like structure.

The optical properties showed that the reflectance of SD thin films in both AZO and BiZnO matrices increased as the number of layers increased. The continuous SD layer structure exhibits lower reflectance than the sandwich-like structure. However, the opposite trend was observed for the transmittance, which decreased as more layers were added. The continuous SD layer structure exhibits higher transmittance than a sandwich-like structure across all wavelength ranges. The absorption coefficient results indicated the expansion of the absorption edge. While AZO and BiZnO thin films primarily absorbed ultraviolet (UV) wavelengths, the SD thin films were able to absorb visible (VIS) wavelengths and, in some cases, extended into the infrared (IR) wavelengths, depending on the number of SD layers in both structures. Moreover, the refractive index of the SD thin films was within an appropriate range of 1.8 – 2.3 making them suitable for use as a window layer on silicon solar cells. The electrical properties of SD thin films were also examined. The current density of SD thin films of BiZnO matrix was higher than SD thin films of AZO matrix. Additionally, the sandwich-like structure provided higher current density than a continuous SD layer structure, specifically in the BiZnO/SD/BiZnO₄ stack configuration. When considering the thickness of the SD thin films, It was concluded that the optimal thickness for achieving the highest current density is between 300 nm – 1000 nm.

Furthermore, this research developed SD silicon solar cell with $p/n/SiN_x$ structure incorporating SD thin films. The efficiency of these cells expressed that the silicon solar cell with a $p/n/SiN_x$ structure and a sandwich-like configuration of 2 stacks of SD thin films achieved an efficiency greater than 1.86% compared to the silicon solar cell $p/n/SiN_x$ structure without SD thin film. The economic analysis revealed that the production cost of SD solar cells is lower than solar cell without SD film by 0.48 Bath per watt. Therefore, the SD solar cells demonstrate high potential for improvement and development for the industry, representing a promising technology for high-efficiency solar cells.



School of Electrical Engineering
Academic Year 2024

Student' Signature..... Sugant Laohawiroj
Advisor' Signature..... Dr. Ph.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการสนับสนุนจากทุนกิตติบัณฑิต ที่มอบโอกาสเข้ามาศึกษาในระดับดุษฎีบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ได้รับการสนับสนุนทางด้านวิชาการและเทคนิคการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมทั้งจากบุคคล รวมถึงหน่วยงานต่างๆ ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพย์วรรณ พังสุวรรณรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่มอบความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งเป็นผู้ตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ให้มีความสมบูรณ์ ในช่วงเวลาที่ทำเนิงานวิจัยเป็นผู้ให้กำลังใจในการดำเนินชีวิตตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และคณะผู้วิจัยในห้องปฏิบัติการอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 ที่เป็นผู้สนับสนุนให้คำปรึกษา ให้กำลังใจและได้ช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

ดร. รุ่งเรือง พัฒนากุล และคณะผู้วิจัย ประจำศูนย์ปฏิบัติการ (Beamline 6a : DXL) และส่วนเครื่องมือภาคอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในงานวิจัยและสถานที่ ตลอดจนให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการให้งานวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คุณอนุสรฯ ประกอบแก้ว และบุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้กรุณามอบความรู้ด้านวิชาการ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ทุนวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ระบบข้อมูลสารสนเทศวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (National research and innovation information system: NRIIS) ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกๆ ท่าน ที่ได้มอบความรู้ด้านต่างๆ และขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และมิตรสหายของผู้วิจัย ที่มอบความรัก ความอบอุ่น กำลังใจ และมอบสิ่งต่างๆ ที่ดียิ่งตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศุภณัฐ เลาหิโรจน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 บทนำ.....	10
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์และหลักการทำงาน.....	10
2.3 หลักการ Quantization ของการรับแสงของฟิล์มบาง.....	28
2.4 ฟิล์มบางเมตริกซ์สำหรับการประยุกต์เป็นชั้นรับแสง.....	38
3 กระบวนการผลิตฟิล์มบางรับแสงซิงค์ออกไซด์และฟิล์มบางรับแสงคอมโพสิต	44
3.1 บทนำ.....	44
3.2 วิธีการสร้างและเทคนิคการวัดฟิล์มบาง	44
3.2.1 การสร้างฟิล์มบางรับแสงเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์	44
3.2.2 การศึกษาจุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบาง	49
3.2.3 การศึกษาการเกาะเกี่ยวพื้นระของฟิล์มบาง.....	50
3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง	51
3.2.5 การวัดความหนาของฟิล์มบาง.....	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.6	การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง.....	55
3.2.7	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	59
3.2.8	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	61
3.2.9	วัดขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์.....	62
3.3	การสังเคราะห์สารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์.....	63
3.3.1	การเตรียมสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสมัท	63
3.3.2	การเตรียมสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม	64
3.4	การเตรียมหมึกซิลิคอนคอมโพสิต.....	66
3.4.1	การเตรียมหมึกซิลิคอนคอมโพสิต.....	66
3.4.2	การสร้างฟิล์มบางซิลิคอนดอทคอมโพสิต	67
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางรับแสงซิงค์ออกไซด์ และฟิล์มบางรับแสงซิลิคอนดอท.....	70
4.1	บทนำ.....	70
4.2	การวิเคราะห์อนุภาคผงซิลิคอน	70
4.3	ผลการศึกษาจุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางรับแสง	72
4.3.1	จุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางรับแสงซิงค์ออกไซด์.....	72
4.3.2	จุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางรับแสงซิลิคอนดอท	75
4.3.3	ความหนาของฟิล์มบางรับแสง	85
4.4	การวิเคราะห์การเกาะเกี่ยวพันธะของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	86
4.5	การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างด้วย XRD	88
4.5.1	การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO	88
4.5.2	การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางรับแสง SD.....	91
4.6	การศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วย UV-VIS-NIR.....	97
4.6.1	การศึกษาคุณสมบัติการทะลุผ่านของแสง.....	97
4.6.1.1	คุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.1.2 คุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD.....	98
4.6.2 การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับ.....	101
4.6.2.1 คุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO	101
4.6.2.2 คุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD ...	102
4.6.3 การศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง	105
4.6.3.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO	105
4.6.3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD.....	108
4.6.4 การศึกษาค่าดัชนีหักเหของแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง	110
4.6.4.1 ค่าดัชนีหักเหของแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง ของฟิล์มบางรับ AZO และ BiZnO	110
4.6.4.2 ค่าดัชนีหักเหของแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง ของฟิล์มบางรับแสง SD.....	113
4.6.5 การศึกษาค่าไดอิเล็กทริก.....	117
4.6.5.1 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO	117
4.6.5.2 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง ซ้อนทับและสลับชั้น	118
4.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย Two probe.....	121
4.7.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO.....	121
4.7.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรับแสง SD	124
5 กระบวนการผลิตและผลการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรอยต่อเฮเทอโรโครงสร้างซิลิคอนดอท ในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้ปสารเจืออะลูมิเนียมกับบิสมัท	129
5.1 บทนำ	129
5.2 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD	129
5.3 การสร้างขั้วโลหะบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD	135

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4	ผลการวัดทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD.....	137
5.5	การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์.....	142
6	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	145
6.1	สรุปงานวิจัย	145
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	146
	รายการอ้างอิง.....	147
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก การทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยหลักการ Radio corporative of America	155
	ภาคผนวก ข การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจล ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัท.....	157
	ภาคผนวก ค การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจล ซิงค์ออกไซด์อะลูมิเนียม.....	164
	ภาคผนวก ง การคำนวณด้านเศรษฐศาสตร์ ที่แสดงในตารางที่ 5.4.....	169
	ภาคผนวก จ บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา ปริญาเอกและปริญาโท	175
	ประวัติผู้เขียน	190

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การผลิตและการซื้อพลังงานสุทธิประจำปี 2565 ของประเทศไทย	1
2.1 ค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุต่างๆ	28
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นรับแสง SiQDs.....	32
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในแต่ละบริษัท ปี ค.ศ. 2024.....	37
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นรับแสง TiO_2	38
3.1 ปริมาณการเตรียมสารละลายเมตริกซ์ BiZnO	64
3.2 ปริมาณการเตรียมสารละลายโซล-เจล AZO.....	65
4.1 ผลการวัดขนาดผงซิลิคอน	72
4.2 ผลการวัดตำแหน่งระนาบ 2 θ ค่า FWHM และผลการคำนวณขนาดผลึก ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น.....	90
4.3 ผลการวัดตำแหน่งระนาบ 2 θ ค่า FWHM และผลการคำนวณขนาดผลึก ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น.....	91
4.4 ผลการคำนวณระยะระหว่างระนาบ ค่าพารามิเตอร์โครงผลึก และค่าความเครียดตามแนวแกนซีของฟิล์มบาง SD	95
4.5 ผลการวัดตำแหน่งระนาบ 2 θ ค่า FWHM และผลการคำนวณขนาดผลึก ของฟิล์มบาง SD	96
4.6 ผลการคำนวณค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO	98
4.7 ผลการคำนวณค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยของฟิล์มบาง SD	100
4.8 ผลการคำนวณค่า %WR ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับ จำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	102
4.9 ผลการคำนวณค่า %WR ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น	104
4.10 ขอบการดูดกลืนแสงและผลการประมาณค่าแถบพลังงานช่องว่าง ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น.....	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11	ขอการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น..... 110
4.12	ค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับ จำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น 112
4.13	ค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น 115
5.1	ผลการคำนวณค่า %WR ของฟิล์มบาง SD บนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x 134
5.2	ผลทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN _x ที่มีฟิล์มบาง SD 139
5.3	ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN _x เปรียบเทียบกับ โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ p/n/SiN _x /BiZnO/SD/BiZnO_2 stack 144
ข.1	มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสารตั้งต้นสารละลายเมตริกซ์ ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมีท 150
ค.1	มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสารตั้งต้นสารละลายเมตริกซ์ ซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม..... 157



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	สัดส่วนตามน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	3
1.2	รายงานปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 – 2023.....	4
1.3	รายงานปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 – 2023.....	4
1.4	รายงานการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมของแต่ละประเทศทั่วโลกในปี ค.ศ. 2023	5
1.5	การคาดการณ์ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมของโลกถึงปี ค.ศ. 2028.....	5
1.6	พลังงานไฟฟ้าสะสมจากเซลล์แสงอาทิตย์และการคาดการณ์ปริมาณ ซิลิคอนที่เชื่อมสภาพสะสมของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526.....	7
1.7	สเปกตรัมของการแปลงพลังงานและการสูญเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิคอนรุ่นที่ 1	8
2.1	องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.2	กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างรอยต่อ p/n ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะมืด	14
2.3	การดูดกลืนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์	15
2.4	การดูดกลืนพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ Direct bandgap.....	16
2.5	โครงสร้างการดูดกลืนพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ Indirect bandgap	17
2.6	หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.7	กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างรอยต่อ pn ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะสว่าง.....	21
2.8	(ก) วงจรสมมูล และ (ข) I-V characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.9	การรวมตัวกลับของพาหะชนิดต่างๆ	24
2.10	ค่าช่วงชีวิตของพาหะเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารเจือ	25
2.11	การสะท้อนของแสงเมื่อมีชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับตามกฎของสเนลล์	26
2.12	การกระจายตัวของสถานะในแถบพลังงานจากสมการความหนาแน่นของสถานะ	29
2.13	ก) การจำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะของผลึกนาโนซิลิคอนในเมทริกซ์ของไดอิเล็กตริก และ ข) การเกิดระดับพลังงานควอนไทซ์ของควอนตัมดอท	30
2.14	แนวความคิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem cell.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15	แถบพลังงานช่องว่างของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพนเดมเซลล์ 31
2.16	ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง AZO 41
2.17	ความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง ZnO:Bi 42
2.18	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO:Bi 42
3.1	เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง 45
3.2	แผนภาพการผลิตฟิล์มบางรับแสง AZO 45
3.3	แผนภาพเงื่อนไขฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบแบบ (ก) อบแห้ง (ข) อบด้วย Thermal annealing และ (ค) อบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process และ (ง) เงื่อนไขฟิล์มบางรับแสง BiZnO ที่ผ่านการอบ ด้วยวิธี Rapid thermal annealing process 46
3.4	เครื่อง Fast Firing 47
3.5	(ก) หม้ออบและลูกบดที่ใช้ร่วมกับ (ข) เครื่องบดแบบ Planetary 48
3.6	(ก) เครื่องประทับลาย (ข) แผ่นแฟลชโฟม และ (ค) เครื่อง Flash stamp 48
3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด 49
3.8	เครื่อง Fourier transform infrared microscope 50
3.9	รูปแบบการสันสะท้อนของโมเลกุล 51
3.10	เครื่อง X-ray Diffractometer 51
3.11	โครงผลึกแบบ Hexagonal wurtzite ของ ZnO 53
3.12	โครงผลึกแบบ Simple cubic ของซิลิคอน 54
3.13	เครื่อง Optical profiler 55
3.14	เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer 56
3.15	Solar spectral irradiance 57
3.16	แผนผังการวัดด้วยวิธี 2-probe measurement ของฟิล์มบางรับแสง 60
3.17	(ก) เครื่องจำลองแสงเทียม Solar simulation และ (ข) การวัดระดับ ความเข้มแสงจากแสงเทียมด้วยเครื่อง Lux meter 61
3.18	เครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ 62
3.19	แผนภาพการเตรียมสารละลายเมตริกซ์ BiZnO 64
3.20	แผนภาพการเตรียมสารละลายเมตริกซ์ AZO 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21	แผนภาพการเตรียมหมึก Si ink-Bi และ Si ink-Al 67
3.22	ฟิล์มบางรับแสง SD (ก) โครงสร้างซ้อนทับ และ (ข) โครงสร้างสลับชั้น 68
3.23	ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับ 69
3.24	ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้น 69
4.1	ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค และขนาดของอนุภาคที่วัดจากเครื่อง Particle Size Analysis 71
4.2	ภาพถ่าย FESEM ของเงื่อนไขการอบที่เวลา (ก) 36 ชั่วโมง และ (ข) 48 ชั่วโมง 72
4.3	ภาพถ่ายฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบแบบ (ก) อบแห้ง (ข) อบด้วย Thermal annealing และ (ค) อบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process ที่มี จำนวนฟิล์มบาง 1 ชั้น และ (ง) ฟิล์มบางรับแสง BiZnO ที่ผ่านการอบ ด้วยวิธี Rapid thermal annealing process จำนวน 1 ชั้น 73
4.4	ภาพถ่าย FESEM ของฟิล์มบางรับแสง AZO จำนวน 1 ชั้น ที่เงื่อนไข (ก) การอบแห้ง (ข) การอบด้วย TA (ค) การอบด้วยวิธี RTP และฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบ ด้วย RTP จำนวน (ง) 2 ชั้น (จ) 3 ชั้น และ (ฉ) 5 ชั้น ตามลำดับ 74
4.5	ฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับจากสารละลายเมตริกซ์ AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และจากสารละลาย เมตริกซ์ BiZnO จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ฌ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น 76
4.6	ฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างสลับชั้นจากสารละลายเมตริกซ์ AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และจากสารละลาย เมตริกซ์ BiZnO จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ฌ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น 76
4.7	ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างซ้อนทับ 77
4.8	ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างซ้อนทับ 78
4.9	ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO/SD/AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น 79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO/SD/BiZnO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น	80
4.11 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างทับซ้อน	81
4.12 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างทับซ้อน	82
4.13 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO/SD/AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น	83
4.14 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO/SD/BiZnO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น	84
4.15 ความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	85
4.16 ความหนาของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น	86
4.17 ผลการวัด FTIR ของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO	87
4.18 ผลการวัด FTIR ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างทับซ้อน	87
4.19 ผลการวัด FTIR ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้น	88
4.20 ผลการวัด XRD ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	89
4.21 ผลการวัด XRD ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับเงื่อนไข (ก) AZO_SD และ (ข) BiZnO_SD	93
4.22 ผลการวัด XRD ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้นเงื่อนไข (ก) AZO/SD/AZO และ (ข) BiZnO/SD/BiZnO	94
4.23 สเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับ จำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 สเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD (ก) โครงสร้างซ้อนทับ และ (ข) โครงสร้างสลับชั้น	99
4.25 สเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	101
4.26 สเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบางรับแสง SD (ก) โครงสร้างซ้อนทับ และ (ข) โครงสร้างสลับชั้น	103
4.27 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	105
4.28 Tauc's plot ของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	106
4.29 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ(ข) สลับชั้น	109
4.30 ค่าดัชนีหักเหแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 1500 nm ของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	111
4.31 แบบจำลองการหักเหของแสงของฟิล์มบาง	112
4.32 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	113
4.33 ค่าดัชนีหักเหแสง ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น	114
4.34 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น	116
4.35 (ก) ค่าไดอิเล็กทริกจริง และ (ข) ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	117
4.36 ค่าไดอิเล็กทริกจริงของฟิล์มบาง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น	119
4.37 ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพของฟิล์มบาง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO ในรูปแบบ (ก) Linear และ (ข) Semi-log.....	121
4.39 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 10 V ภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	122
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO.....	123
4.41 ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น	124
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างรูปแบบ Linear ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น.....	125
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างรูปแบบ Semi-log ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น.....	126
4.44 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง SD	127
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาของฟิล์มบางรับแสง SD	128
4.46 ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบางรับแสง SD	128
5.1 แผ่นซิลิคอน p/n/SiN _x ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น.....	130
5.2 ภาพถ่ายด้านบนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x /AZO_SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x /BiZnO_SD จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ณ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น.....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3	ภาพถ่ายด้านบนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x /AZO/SD/AZO จำนวน (ก) 1 stack (ข) 2 stack (ค) 3 stack (ง) 4 stack และ (จ) 5 stack และแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x /BiZnO/SD/BiZnO จำนวน (ฉ) 1 stack (ช) 2 stack (ซ) 3 stack (ณ) 4 stack และ (ญ) 5 stack 131
5.4	ค่าการสะท้อนกลับของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง n/p/SiN _x ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น 133
5.5	ฟิล์มบางรับแสง SD ที่ถูกเปิดช่องบนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x /AZO_SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x /BiZnO_SD จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ณ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น 135
5.6	ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD 136
5.7	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x ที่มีฟิล์มบาง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ(ข) สลับชั้น 136
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น..... 137
5.9	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD..... 140
5.10	ค่า Fil factor และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD 141
5.11	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD ที่ความหนาต่างๆ 142
5.12	สัดส่วนต้นทุนของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN _x เทียบกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ p/n/SiN _x /BiZnO/SD/BiZnO_2 stack 143

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
AlCl_3	=	อะลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Aluminium Chloride Hexahydrate: $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
Al_2O_3	=	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide)
ARC	=	Anti reflection coating
AZO	=	ซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียม (Zinc oxide doped aluminum)
A*	=	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 2×10^4
A**	=	ค่าคงที่ของวัสดุที่พิจารณาในการดูดกลืนแสง
a	=	lattice constant ของ a
B	=	Full width at half maximum (FWHM)
Bi	=	บิสมัท (Bismuth)
Bi	=	บิสมัทไนเตรตเพนตะไฮเดรต (Bismuth (III) nitrate pentahydrate)
Bi_2O_3	=	บิสมัท (III) ออกไซด์ (Bismuth (III) oxide)
BiZnO	=	ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัท (ใช้กับบริบทชิ้นงานของงานวิจัยนี้)
b	=	lattice constant ของ b
CB	=	แถบพลังงานคอนดักชัน (Conduction band)
CTAB	=	สารลดแรงตึงผิว Cetyltrimethyl ammonium bromide
CsPbBr_3	=	ซีเซียมลีดโบรไมด์ (Cesium lead bromide)
c	=	อัตราเร็วของคลื่นแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 2.997×10^8 m/s
c	=	lattice constant ของ c
c_0	=	ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกซี (c-lattice parameter) ที่ไม่มีความเครียด พิจารณาให้ ZnO มีค่า Crystal lattice เท่ากับ 5.207 Å และสำหรับ Si มี ค่า Crystal lattice เท่ากับ 5.430 Å
D_n	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะอิเล็กตรอน
D_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะโฮล
d	=	ขนาดของเกรนผลึก
d_{h,k,l}	=	ระยะห่างระนาบ (hkl)
E	=	พลังงาน มีหน่วยคือ eV

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

EHPs	=	คู่พาหะอิเล็กตรอนโฮล
EQE	=	External quantum efficiency
EG	=	เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)
EtOH	=	เอทานอล (Ethanol)
E_c	=	พลังงานในแถบคอนดักชัน
E_F	=	พลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)
E_f	=	พลังงานของเงื่อนไขสุดท้าย
E_g	=	ช่องว่างพลังงาน (Energy band gap)
E_i	=	พลังงานของเงื่อนไขเริ่มต้น
E_p	=	พลังงานจากการดูดกลืนโฟนอนที่ถูกกำหนดด้วยโมเมนตัม
E_v	=	พลังงานในแถบวาเลนซ์
e^-	=	พาหะอิสระอิเล็กตรอน (Electron)
FESEM	=	กล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Field emission scanning electron microscope)
FTIR	=	Fourier Transform Infrared
FF	=	ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill factor)
G	=	อัตราการผลิตพาหะ (Generation rate)
GW	=	กิกะวัตต์
GWh	=	กิกะวัตต์ชั่วโมง
GZO	=	Gallium-doped ZnO
$g(E)$	=	ความหนาแน่นของสถานะ (Density of state)
h^+	=	พาหะอิสระโฮล (Hole)
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric)
HF	=	กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric)
HJT	=	เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร (Heterojunction solar cell)
HNO_3	=	กรดไนตริก
h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 4.136×10^{-15} [eV·s] หรือ 6.626×10^{-34} kgm ² /s หรือ Js
h, k, l	=	ตำแหน่งของระนาบที่พิจารณา

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

I	=	กระแสไฟฟ้า
IBC	=	Interdigitated back contact
IPA	=	โพรพานอล (Isopropyl alcohol)
IR	=	คลื่นแสงอินฟราเรด (Infrared wavelength)
ITO	=	Indium Tin Oxide
I_{mp}	=	กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด
I_L	=	กระแสไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานโฟตอนจากแสง
I_{sc}	=	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร
I_s	=	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current)
J	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
J_{mp}	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด
J_{sc}	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
JCPDS	=	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
k	=	คือ Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} [eV/K]
k_{Ext}	=	สัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง (Extinction coefficient)
k^*	=	คือค่าคงที่ขึ้นกับรูปร่างของผลึกมีค่าเท่ากับ 0.9
L	=	ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ
L_n	=	ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_p	=	ระยะทางการแพร่ของโฮล
MEA	=	โมโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine)
MgF	=	แมกนีเซียมฟลูออไรด์ (Magnesium fluoride)
m_n^*	=	มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน
m_p^*	=	มวลประสิทธิผลยังผลของโฮล
N_2	=	แก๊สไนโตรเจน
NH_4OH	=	แอมโมเนีย (Ammonia)
N	=	ค่าดัชนีหักเหของแสงเชิงซ้อน
N_A	=	ความหนาแน่นของสารเจือชนิดผู้รับ (Density of acceptor)
N_D	=	ความหนาแน่นของสารเจือชนิดผู้ให้ (Density of donor)
n	=	สารกึ่งตัวนำชนิด n

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

n	=	Ideality factor มีค่าเท่ากับ 1
n_{ref}	=	ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)
n'	=	ดัชนีชี้กำลัง มีค่าขึ้นอยู่กับวัสดุที่พิจารณา โดยมีค่าเท่ากับ 2 และ 0.5 เมื่อวัสดุที่พิจารณาเป็นวัสดุชนิด indirect bandgap และ direct band gap ตามลำดับ
n^*	=	ลำดับการสะท้อน มีค่าเท่ากับ 1
n	=	ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)
n_i	=	ความหนาแน่นของพาหะในวัสดุก่อนเจือสาร
n_n	=	ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนในวัสดุชนิดเอ็น
n_p	=	ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนในวัสดุชนิดพี
n_{pa}	=	ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนในวัสดุชนิดพีที่ระยะ a ใดๆ
PCE	=	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency)
PECVD	=	Plasma enhanced chemical vapor deposition
PL	=	Photoluminescence
POCl_3	=	Phosphorus oxychloride
PSG	=	Phospho silicate glass
P_{in}	=	กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงที่ตกกระทบลงบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์
P_m	=	กำลังไฟฟ้า Output สูงสุด
p	=	สารกึ่งตัวนำชนิด p
pH	=	ค่าแสดงความเป็นกรดและเบส
p/n	=	รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ
$p/n/\text{SiN}_x$	=	แผ่นฐานซิลิคอนโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นที่มีชั้นซิลิคอนไนไตรด์อยู่ด้านบน
p	=	โมเมนตัมของผลึก (Crystal momentum)
p_n	=	ความหนาแน่นของพาหะโฮลในวัสดุชนิดเอ็น
p_{nb}	=	ความหนาแน่นของพาหะโฮลในวัสดุชนิดเอ็นที่ระยะ b ใดๆ
p_p	=	ความหนาแน่นของพาหะโฮลในวัสดุชนิดพี
QDs	=	ควอนตัมดอท (Quantum dots)
q	=	เปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค
q	=	ประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} [coulomb, c]

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R	=	ค่าการสะท้อนแสงกลับของแสง (Reflectivity)
R _{resist}	=	ความต้านทานไฟฟ้า
R _s	=	Series resistance
R _{sh}	=	Shunt resistance
RCA	=	Radio Corporation of America
RTA	=	Rapid thermal annealing
%R	=	การสะท้อนแสงกลับ (%Reflectance)
SD	=	ซิลิคอนดอท (Silicon dots)
Si	=	ซิลิคอน (Silicon)
SiC	=	ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)
SiH ₄	=	แก๊สไซเลน (Silane)
SiN _x	=	ซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride)
SnO ₂	=	Tin Oxide
SiO ₂	=	ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)
SiO _x	=	ซิลิคอนออกไซด์ (Silicon dioxide)
SiO _x N _y	=	ซิลิคอนออกซีไนไตรด์ (Silicon oxynitride)
SiQDs	=	ซิลิคอนควอนตัมดอท (Silicon quantum dots)
T	=	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน [K]
TA	=	Thermal annealing
Ta ₂ O ₅	=	แทนทาลัมเพนทอกไซด์ (Tantalum pentoxide)
TiO ₂	=	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
TOPCON	=	Tunnel Oxide Passivated Contact
%T	=	การทะลุผ่านของแสง (%Transmittance)
t	=	ค่าความหนาของฟิล์มบาง (ไม่รวมแผ่นฐาน) [cm]
UV	=	ความยาวคลื่นแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)
V	=	แรงดันไฟฟ้า
VB	=	แถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band)
VIS	=	ความยาวคลื่นแสงที่ดวงตามองเห็น (Visible wavelength)
V _{mp}	=	แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_{oc}	=	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage)
V_t	=	แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน (Thermal voltage)
WN	=	เลขคลื่น (Wavenumber)
%WR	=	%Weight Reflectance
wt%	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก
XRD	=	การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)
Zn	=	ซิงค์ (Zinc)
ZnAc	=	ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc acetate di-hydrate)
ZnO	=	ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)
ZnO:Bi	=	ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัท (Zinc oxide doped bismuth)
ZnS	=	ซิงค์ซัลไฟด์ Zinc sulfide (ZnS)
α	=	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient)
α_a	=	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ phonon absorption [cm^{-1}]
α_e	=	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ phonon emission [cm^{-1}]
β	=	คือค่าคงที่พิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 1
$\delta(E)$	=	เดลตาฟังก์ชันของพลังงาน
ϵ	=	สนามไฟฟ้าภายใน
ϵ_{com}	=	ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อน (Complex dielectric)
ϵ_{zz}	=	ความเครียดตามแนวแกนซีของ ZnO และ Si
ϵ'	=	ค่าไดอิเล็กทริกจริง (Real dielectric)
ϵ''	=	ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพ (Imaginary dielectric)
ϵ_s	=	สภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุซิลิคอนมีค่าเท่ากับ $11.68\epsilon_0$
ϵ_0	=	สภาพยอมทางไฟฟ้าในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-14} [F/cm]
η	=	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
θ	=	มุมของยอดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
λ	=	ความยาวคลื่นแสง
ν	=	ค่าความถี่ของคลื่นแสง
ρ	=	ความต้านทานจำเพาะของฟิล์มบาง (Resistivity)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

σ	=	ความต้านทานนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง (Conductivity)
τ_n	=	ค่าช่วงชีวิตของพาหะอิเล็กตรอน
τ_p	=	คือค่าช่วงชีวิตของโฮล
$q\Psi_0$	=	กำแพงศักย์ (Build-in voltage)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากข้อมูลรายงานประจำปี 2566 ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้รายงานการผลิตและการซื้อพลังงานสุทธิประจำปี 2565 และ 2566 แสดงในตารางที่ 1.1 พบว่าความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นจากปี 2565 ถึง 2566 มากถึง 3.50% เนื่องจากประชากรมนุษย์มีอัตราการเพิ่มขึ้นและเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยวัตถุดิบเชื้อเพลิงที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้แก่ ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล เป็นต้น ซึ่งเมื่อคิดเป็นสัดส่วนพบว่ามีความมากกว่า 75% ขณะที่พลังงานหมุนเวียนที่มาทดแทนการใช้พลังงานฟอสซิลเช่นพลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ น้ำมันยางดำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพ คิดเป็นสัดส่วนอยู่ที่ 8% และสัดส่วนที่เหลือคือการซื้อขายไฟฟ้ากับต่างประเทศอยู่ที่ 17%

ตารางที่ 1.1 การผลิตและการซื้อพลังงานสุทธิประจำปี 2565 ของประเทศไทย

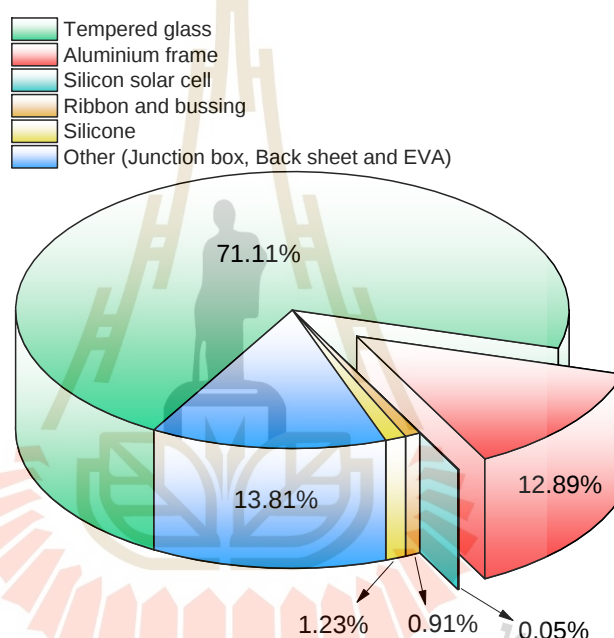
ผลิตจาก	ประจำปี 2566		ประจำปี 2565		(+) เพิ่มขึ้น/ (-) ลดลง
	GWh	percentage	GWh	percentage	percentage
กฟผ. ผลิต					
แก๊สธรรมชาติ	44,405.06	21.34	36,586.51	18.20	(+) 21.37
ถ่านหิน	15,727.01	7.56	16,967.90	8.44	(-) 7.31
น้ำมันเตา	9.42	-	97.83	0.05	(-) 90.37
น้ำมันดีเซล	843.64	0.41	1,568.19	0.78	(-) 46.20
พลังน้ำ	6,282.69	3.02	6234.52	3.10	(+) 0.34
พลังความร้อนใต้พิภพ	1.19	-	1.39	-	(-) 14.39
พลังงานลม	57.07	0.03	58.29	0.03	(-) 2.09
พลังงานแสงอาทิตย์	100.22	0.05	89.85	0.04	(+) 11.54
อื่นๆ	277.44	0.13	333.92	0.17	(-) 16.91
รวม กฟผ. ผลิต	67,703.74	32.53	61,938.40	30.80	(+) 9.31

ตารางที่ 1.1 การผลิตและการซื้อพลังงานสุทธิประจำปี 2566 ของประเทศไทย (ต่อ)

ผลิตจาก	ประจำปี 2566		ประจำปี 2565		(+) เพิ่มขึ้น/ (-) ลดลง
	GWh	percentage	GWh	percentage	percentage
ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก					
แก๊สธรรมชาติ	40,003.20	19.22	39,406.87	19.60	(+) 1.51
ถ่านหิน	1,834.75	0.88	1,765.91	0.88	(+) 3.90
พลังน้ำ	31.63	0.01	33.09	0.02	(-) 4.41
ชีวมวล	5,009.27	2.41	4,527.07	2.25	(+) 10.65
พลังงานแสงอาทิตย์	1,012.06	0.49	937.24	0.47	(+) 7.98
พลังงานลม	3,265.73	1.57	2,806.90	1.40	(+) 16.35
น้ำมันยางดำ	175.31	0.08	159.16	0.08	(+) 10.15
ขยะ	1,258.17	0.60	1,246.71	0.62	(+) 0.92
Waste gas	84.74	0.04	82.62	0.04	(+) 2.57
รวม	52,674.86	25.31	50,965.57	25.35	(+) 3.35
ซื้อภายในประเทศ (ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ ซึ่งรวมบริษัทในกลุ่ม กฟผ.)					
แก๊สธรรมชาติ	41,424.33	19.91	28,874.44	14.36	(+) 43.46
ถ่านหิน	11,103.32	5.34	14,970.67	7.45	(-) 25.83
น้ำมันเตา	385.65	0.19	1,165.47	0.58	(-) 66.91
น้ำมันดีเซล	2,005.42	0.96	7,684.85	3.82	(-) 73.90
รวม	54,918.72	26.39	52,695.43	26.21	(+) 4.22
ซื้อจากต่างประเทศ					
สปป.ลาว	32,743.76	15.73	35,383.04	17.60	(-) 7.46
มาเลเซีย	65.20	0.03	88.71	0.04	(-) 26.50
รวม	32,808.96	15.77	35,471.75	17.64	(-) 7.51
รวมทั้งหมด	208,106.28	100.00	201,071.15	100.00	(+) 3.50

จากข้อมูลในตารางที่ 1.1 สัดส่วนการใช้วัตถุดิบเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณที่สูงเป็นอย่างมาก โดยพลังงานเหล่านี้เป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมและยังเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป จึงจำเป็นต้องหันมาใช้พลังงานทางเลือกเช่นพลังงานหมุนเวียนมาทดแทน เพื่อลดการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติและลดผลกระทบจากมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม

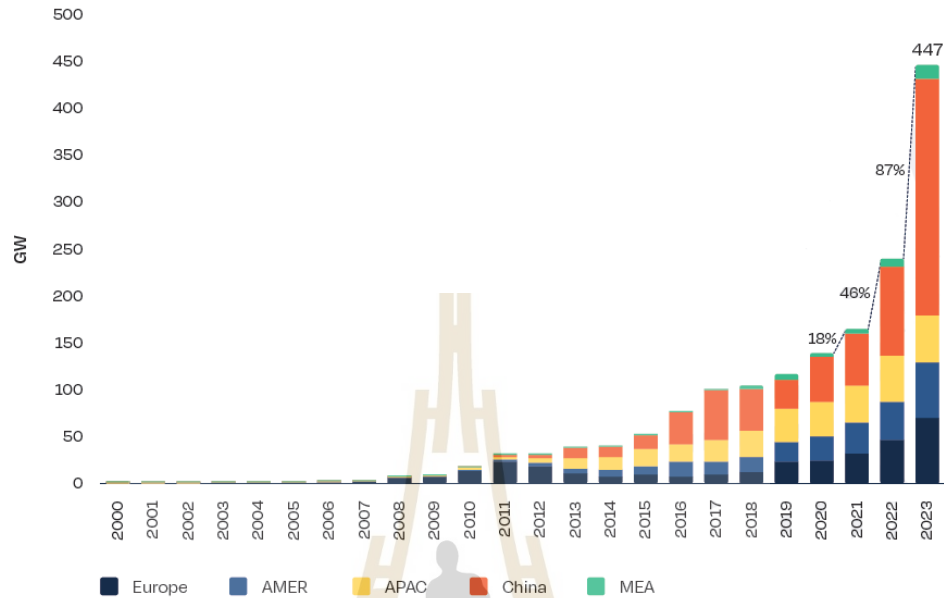
พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือเรียกว่าพลังงานโฟตอน (Photon energy) มีคุณสมบัติเป็นทั้งอนุภาคและคลื่น จัดเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เมื่อมีแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานสะอาดใช้ได้ไม่มีวันหมดไป มีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงคือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell หรือ Solar cell) ซึ่งใช้วัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือซิลิคอน (Silicon: Si) เป็นวัสดุที่มีจำนวนมากบนพื้นผิวโลก การที่จะผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้นั้นต้องมียุทธศาสตร์ประกอบต่างๆ เช่น กระดาษเทมเปอร์ กรอบอะลูมิเนียม แผ่นซิลิคอน เส้นลวดโลหะเงิน กาวซิลิโคน และอื่น ๆ ซึ่งเมื่อคิดเป็นสัดส่วนของน้ำหนักวัสดุสามารถแสดงในรูปแบบที่ 1.1 โดยที่แผ่นซิลิคอน 1 แผ่นมีน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 4.4 กรัม



รูปที่ 1.1 สัดส่วนตามน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันรายงานของ Global Market Outlook for Solar Power 2024 – 2028 ในรูปที่ 1.2 แสดงปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละปี ประกอบด้วย ยุโรป (Europe) อเมริกา (North, Central, and South America: AMER) กลุ่มเอเชียแปซิฟิก (Asia and Pacific: APAC) ประเทศจีน (China) และ ตะวันออกกลางและแอฟริกา (Middle East, and Africa: MEA) อัตราการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณสูงมากขึ้นทุกปี โดยเฉพาะจากปี ค.ศ. 2022 ถึง 2023 แสดงการติดตั้งเพิ่มขึ้นถึง 87% จนมีปริมาณการติดตั้งที่เพิ่มขึ้นถึง 447 GW และเมื่อพิจารณารูปที่ 1.3 พบว่า ในปี ค.ศ. 2023 มีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมแล้วถึง 1,624 GW เมื่อแสดงอันดับประเทศที่มีปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมในรูปที่ 1.4 พบว่า 4 อันดับแรกคือ ประเทศจีน ประ

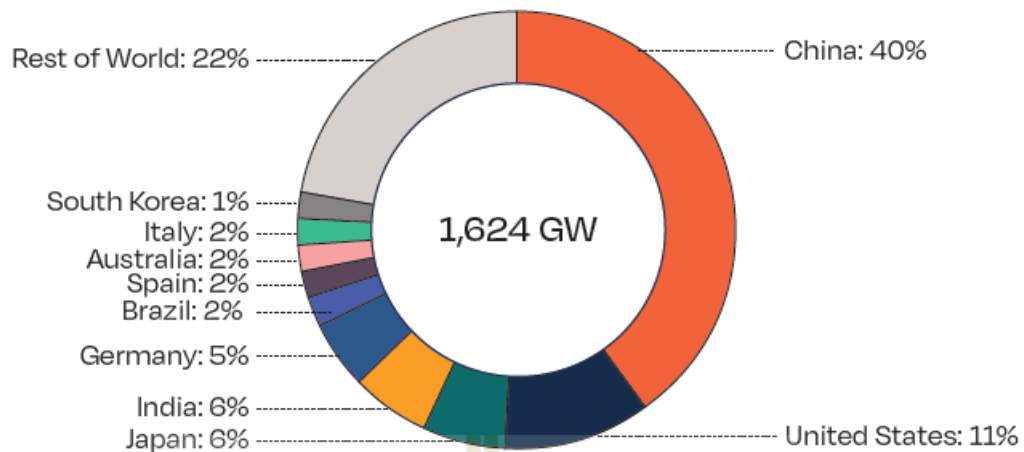
สหรัฐอเมริกา ประเทศญี่ปุ่น และประเทศอินเดีย ตามลำดับ อีกทั้งยังระบุการคาดการณ์ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ถึงปี ค.ศ. 2028 พบว่าอาจสูงมากถึง 5,920 GW แสดงในรูปที่ 1.5



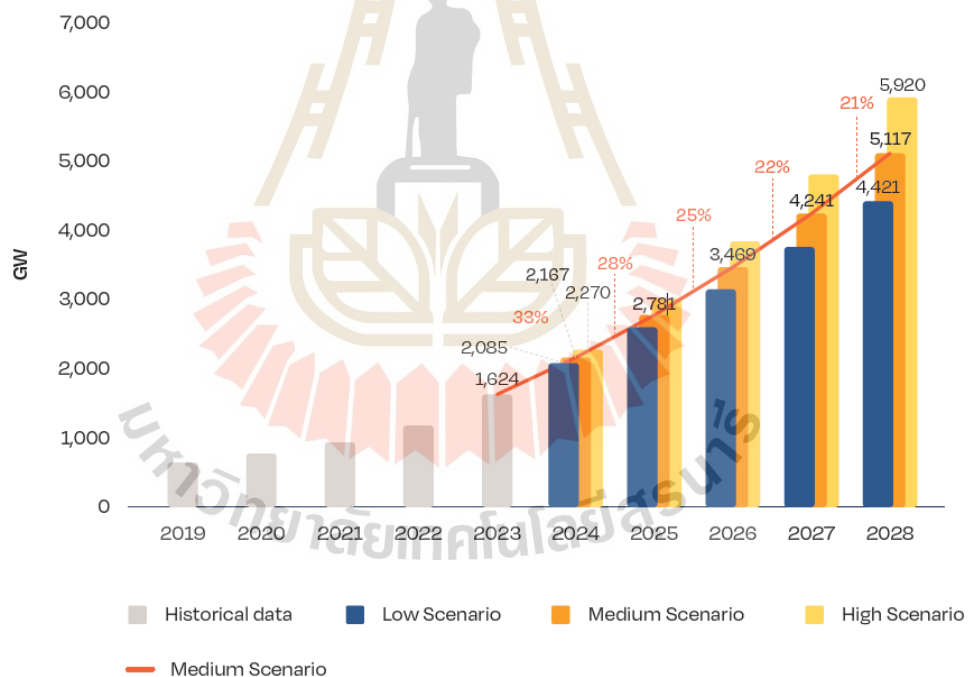
รูปที่ 1.2 รายงานปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 – 2023
(อ้างอิง: Global Market Outlook for Solar Power 2024 – 2028)



รูปที่ 1.3 รายงานปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 – 2023
(อ้างอิง: Global Market Outlook for Solar Power 2024 – 2028)



รูปที่ 1.4 รายงานการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมของแต่ละประเทศทั่วโลกในปี ค.ศ. 2023
(อ้างอิง: Global Market Outlook for Solar Power 2024 – 2028)



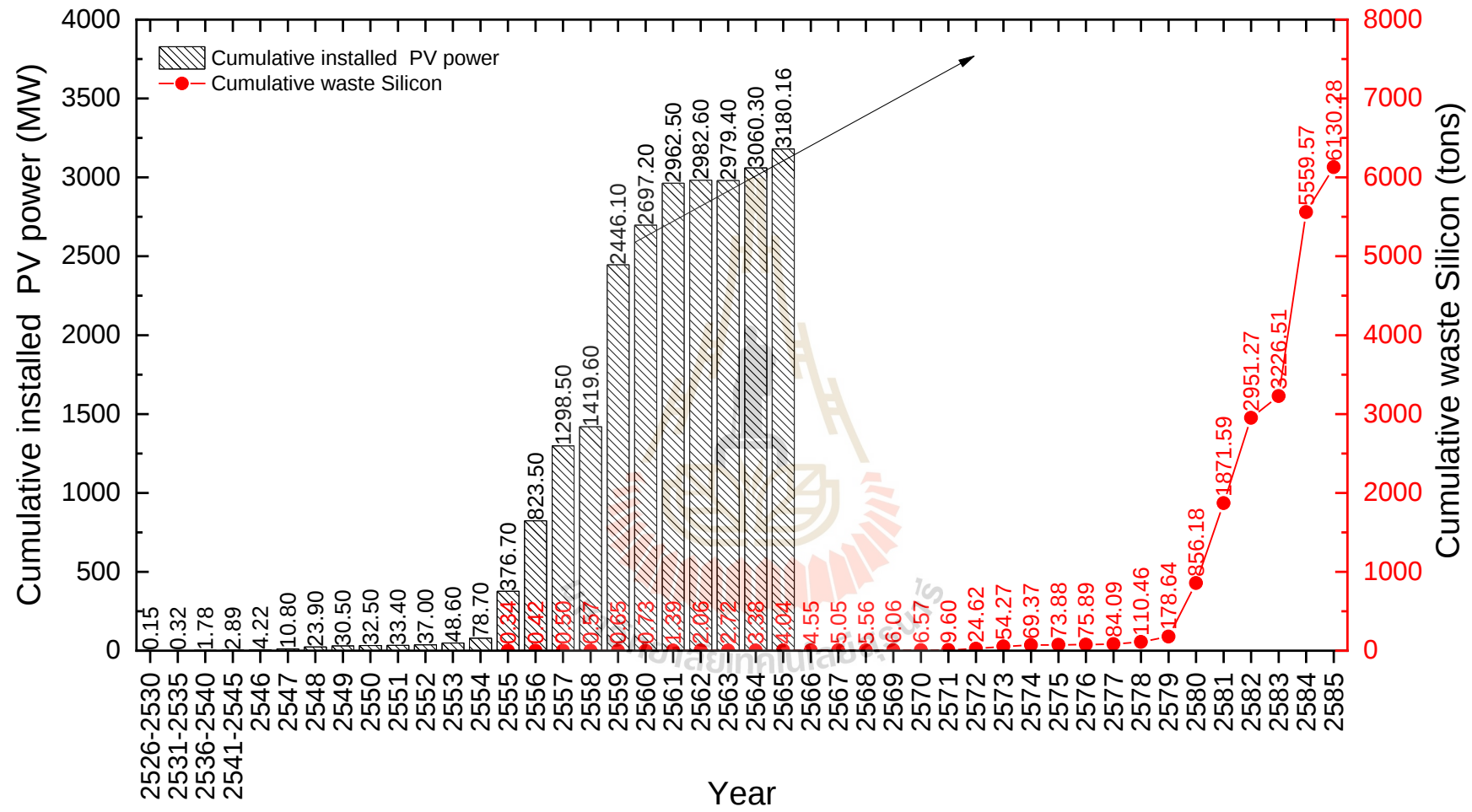
รูปที่ 1.5 การคาดการณ์ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สะสมของโลกถึงปี ค.ศ. 2028
(อ้างอิง: Global Market Outlook for Solar Power 2024 – 2028)

สำหรับประเทศไทยจากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2565 และ รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 (กระทรวงพลังงาน) ได้รวบรวมข้อมูลพลังงานไฟฟ้าสะสมจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

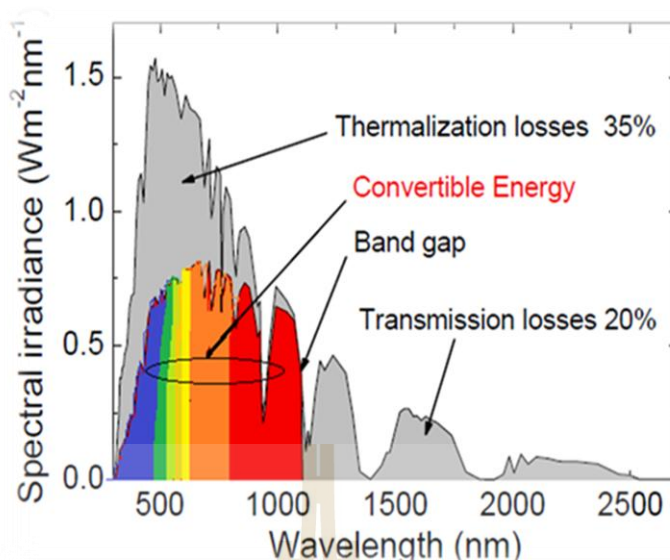
ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 – 2565 ซึ่งการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณสะสมแล้วถึง 3,180 MW อย่างไรก็ตามเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งไปแล้วครบกำหนดการรับประกันที่ 25 ปี จากบริษัท แผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านั้นจะถูกปลด บางส่วนที่ยังคงใช้ได้อาจถูกนำมาใช้ใหม่ในการเกษตร แต่หากเสื่อมสภาพเสียหายมากอาจต้องถูกทำลาย ซึ่งเมื่อคาดการณ์ปริมาณเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพจะมีปริมาณสะสมแสดงในรูปที่ 1.6 โดยพบว่ามียังมีจำนวนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สะสมแล้วถึง 6,130 ตัน

นอกจากนี้จากรายงานแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2561 - 2580 (PDP2018) (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน) จัดแผนการว่าในปี พ.ศ. 2580 ความต้องการในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมของประเทศไทยอยู่ที่ 10,000 MW ซึ่งเมื่อคำนวณน้ำหนักของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ต้องใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 22,728 ตัน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการกำจัดเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพของประเทศไทยยังไม่มีเทคโนโลยีการนำกลับมาใช้ใหม่แต่ใช้วิธีการฝังกลบ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้เห็นปัญหา ณ จุดนี้ จึงหาวิธีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพนำกลับมาใช้ใหม่ แต่เบื้องต้นจะทำการศึกษาเฉพาะแผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพก่อน โดยนำแผ่นซิลิคอนมาผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยการบดให้เป็นผงแล้วนำมาประยุกต์ใช้เป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็น

ทั้งนี้ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีข้อจำกัด จากทฤษฎีการจำกัดพลังงาน Detailed balance limit of efficiency ของ Shockley and Queisser (1961) แสดงขีดจำกัดการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนสูงสุดที่ 30 % เนื่องจากซิลิคอนมีแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 1.1 eV สามารถดูดกลืนพลังงานแสงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1,100 nm ส่วนที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าสามารถดูดกลืนได้แต่เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อนสูงมากถึง 35% ซึ่งแสดงสเปกตรัมการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนได้ในรูปที่



รูปที่ 1.6 พลังงานไฟฟ้าสะสมจากเซลล์แสงอาทิตย์และการคาดการณ์ปริมาณซิลิคอนที่เสื่อมสภาพสะสมของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526



รูปที่ 1.7 สเปกตรัมของการแปลงพลังงานและการสูญเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรุ่นที่ 1

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกนาโนซิลิคอน เมื่อสร้างฟิล์มบางที่สามารถขยายแถบพลังงานช่องว่างที่ด้านรับแสง ซึ่งประกอบด้วยผลึกซิลิคอนระดับนาโนเมตรในเมตริกซ์ออกไซด์หรือเมตริกซ์ต่างๆ ทำให้เกิดการ quantize ของพลังงานช่องว่างในวัสดุทำให้สามารถเพิ่มปริมาณการดูดกลืนแสงและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (Conibeer, et al. (2008))

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน ที่ประกอบด้วยชั้นรับแสงจากฟิล์มบางซิลิคอนดอท (SD) ที่ให้สมบัติการขยายแถบพลังงานช่องว่างของเซลล์แสงอาทิตย์ และเคลือบลงบนผลึกซิลิคอนรอยต่อ p/n ในกระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม SD ได้ใช้แผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพเสียหายมาผลิตใหม่เป็นผงซิลิคอน และเป็นส่วนประกอบในหมึกซิลิคอนคอมโพสิต (Si ink) เพื่อสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำซิงค์ออกไซด์เจือบิสมีทและอะลูมิเนียมมาใช้เป็นเมตริกซ์ให้กับฟิล์มบาง SD เนื่องจากมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสงที่ดี และให้คุณสมบัติ Photo-generation อีกทั้ง ยังเป็นการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยของห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีให้เกิดผลลัพธ์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 ผลิตผงซิลิคอนจากการนำแผ่นซิลิคอนมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการบด
- 1.2.2 สังเคราะห์หมึกซิลิคอนคอมโพสิตจากวิธีการเตรียมแบบโซล-เจล เพื่อเป็นฟิล์มบางซิลิคอนดอท ด้วยเทคนิคเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง
- 1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเงื่อนไขจำนวนชั้นของฟิล์มบาง
- 1.2.4 สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่มีโครงสร้างของชั้นรับแสงด้วยฟิล์มบางซิลิคอนดอทในขนาดพื้นที่ไม่น้อยกว่า 9 ตารางเซนติเมตร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการผลิตผงซิลิคอนที่เสื่อมสภาพจากการผลิตด้วยกระบวนการแบบ Planetary และวิเคราะห์ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนที่ได้
- 1.3.2 ผลิตหมึกซิลิคอนจากสารละลายซิงค์ออกไซด์ได้ปอะลูมิเนียมและบิสมัท เพื่อผลิตเป็นฟิล์มบางซิลิคอนดอทบนแผ่นควอตซ์ด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง
- 1.3.3 ศึกษาจุลโครงสร้าง คุณภาพของผลึก คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนดอท ที่ผ่านกระบวนการอบด้วยรูปแบบการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 200 °C อบด้วยอุณหภูมิ 550 °C และอบด้วยวิธีเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วด้วยอุณหภูมิ 930 °C
- 1.3.4 ศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x ที่มีส่วนประกอบชั้นรับแสงฟิล์มบางซิลิคอนดอท และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถลดขยะอิเล็กทรอนิกส์จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพ และเพิ่มมูลค่าโดยนำมาผลิตเป็นผงซิลิคอน เพื่อนำไปประยุกต์เป็นหมึกซิลิคอน
- 1.4.2 สามารถผลิตเมตริกซ์ชนิดใหม่เพื่อใช้บนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อีกทั้งยังเป็นจุดริเริ่มของการพัฒนาฟิล์มบางชนิดใหม่ให้กับห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.4.3 ได้ต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางซิลิคอนดอทชนิดใหม่ จากฟิล์มบางซิลิคอนดอทผลิตด้วยต้นทุนต่ำ

บทที่ 2

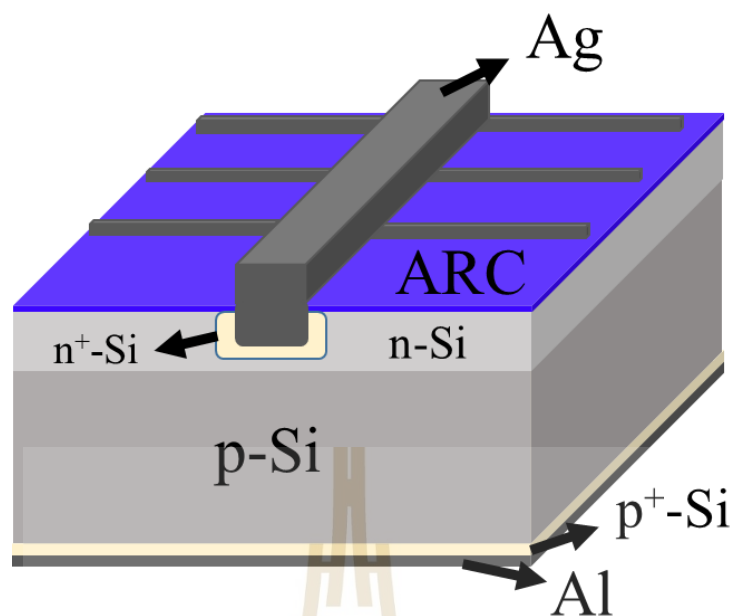
ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจากสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอน กลไกการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อจำกัดในการให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ การหักเหของแสงเมื่อผ่านวัสดุตัวกลางตามกฎของ Snell ทฤษฎีการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัมด้วยซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ต่างๆ การผลิตฟิล์มบางซิลิคอนควอนตัมดอท และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการดังกล่าวจากวารสารอิเล็กทรอนิกส์ งานประชุมทางวิชาการและตำราที่เกี่ยวข้อง เปรียบเทียบข้อดีระหว่างวัสดุที่ใช้เพื่อนำมาวิเคราะห์ให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีและนำมาประยุกต์ใช้กับการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางดังกล่าว เพื่อเป็นประโยชน์กับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์และหลักการทำงาน

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า จากโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำสำหรับเปลี่ยนพลังงานจากแสงตกกระทบซึ่งมีความยาวคลื่นที่เท่ากับหรือน้อยกว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงเรียกว่า โฟโตโวลเทอิกเอฟเฟกต์ (Photovoltaic effect) โดยวัสดุซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์นิยมนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนมากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้บนโลกนิยมใช้ซิลิคอนเป็นหลักเนื่องจากมีราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์มีองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญต่อไปนี้ 1. ที่ชั้นรอยต่อ p/n-Si 2. ชั้นรอยต่อ n⁺-n และชั้นรอยต่อ p⁺-p 3. ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับหรือชั้น Anti reflection coating (ARC) และ 4. ขั้วไฟฟ้าของโลหะ



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์

ชั้นรอยต่อ p/n-Si เป็นส่วนพื้นฐานสำคัญที่สุดในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งในส่วนรอยต่อมีการสร้างสนามไฟฟ้าภายในเนื่องจากการแพร่ของพาหะภายใน โดยเมื่อรอยต่อได้รับแสงจะทำให้เกิดพาหะอิสระอิเล็กตรอน (Electron: e^-) และพาหะโฮลอิสระ (Hole: h^+) และถูกสนามไฟฟ้าภายในแยกออก โดยพาหะอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ และพาหะโฮลถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าผลักให้ไปในทิศทางด้านล่างของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น การศึกษาความลึกรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์จากงานวิจัยของ Jahanshah et al. (2009) ได้จำลองค่าความลึกของชั้นรอยต่อ p/n-Si พบว่าค่าความลึกของรอยต่อที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 1 – 45 ไมครอน

โครงสร้างของรอยต่อ p/n ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมีดแสดงในรูปที่ 2.2 สารกึ่งตัวนำชนิด p คือสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมหมู่ที่ 3 ชนิดผู้รับ (Acceptor impurity) มีปริมาณความหนาแน่นของโฮลอิสระเป็นจำนวนมาก เมื่อต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่มาจากการถูกเจือด้วยอะตอมหมู่ที่ 5 ชนิดผู้ให้ (Donor impurity) มีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมากแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) พาหะอิสระข้างมากของแต่ละด้านเกิดการแพร่ (Diffusion) ไปยังฝั่งของสารกึ่งตัวนำด้านตรงกันข้าม พาหะที่ข้ามรอยต่อเกิดการสร้างไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเนื่องจากต้องคงความสมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) ไอออนที่ถูกสร้างนั้นจะทำการสร้างสนามไฟฟ้าภายใน ($\mathcal{E}$) ขึ้นเพื่อหยุดการแพร่ของพาหะข้างมาก โดยทิศทางของสนามไฟฟ้ามีทิศชี้ไปที่สารกึ่งตัวนำชนิด p ทำให้ตรงกลางรอยต่อเกิดเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะอิสระอาศัยอยู่ เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณปลอดพาหะ

(Depletion region หรือ Space charge region) อย่างไรก็ตามที่บริเวณนี้เองยังมีการข้ามรอยต่อของพาหะอยู่เนื่องจากการแพร่ของพาหะข้างมาก และมีการพัดพา (Drift) ของพาหะข้างน้อยเนื่องจากสนามไฟฟ้าวิ่งสวนทางกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าสุทธิที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากการพัดพาและการแพร่มีค่าเท่ากับศูนย์ ที่ภาพด้านล่างของรูปที่ 2.2 (ก) คือแผนภาพ Band diagram ของรอยต่อ pn ในสภาวะมืด จากภาพเมื่อพิจารณาให้ค่าระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level: E_F) มีค่าเท่ากัน พบว่าแถบพลังงานของทางฝั่ง p และ n มีการหักงอ โดยความแตกต่างของระดับพลังงานของทางฝั่ง p และ n พิจารณาได้จาก Build in voltage ($q\Psi_0$) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณสารเจือและอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.1

$$q\Psi_0 = kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่ N_A คือ ความหนาแน่นของสารเจือชนิดผู้รับ (Density of acceptor) [atom/m³]

N_D คือ ความหนาแน่นของสารเจือชนิดผู้ให้ (Density of donor) [atom/m³]

n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะในวัสดุก่อนเจือสาร [atom/m³]

k คือ Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} [eV/K]

T คือ อุณหภูมิ [Kelvin: K]

q คือ ประจุไฟฟ้าในมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} [Coulomb: C]

รูปที่ 2.2 (ข) แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในบริเวณต่างๆ ของรอยต่อ pn ที่บริเวณ $x^* < a$ ในสารกึ่งตัวนำชนิด p มีความหนาแน่นของโฮล (p_p) ที่มากกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_p) เมื่อเข้ามาสู่ที่รอยต่อ pn ค่าความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าที่ลดต่ำลง ในขณะที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่ามากขึ้น และเมื่อเข้าสู่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่ระยะ $x > b$ ความหนาแน่นของโฮล (p_n) จะมีค่าที่น้อยกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_p) โดยพาหะอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ระยะ $x^* = a$ (n_{pa}) และพาหะโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่ระยะ $x = b$ (p_{nb}) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$n_{pa} = n_{p0} \exp \left(\frac{q\Psi_0}{kT} \right) = \frac{n_i^2}{N_A} \exp \left(\frac{q\Psi_0}{kT} \right) \quad (2.2)$$

$$p_{nb} = p_{n0} \exp \left(\frac{q\Psi_0}{kT} \right) = \frac{n_i^2}{N_D} \exp \left(\frac{q\Psi_0}{kT} \right) \quad (2.3)$$

สำหรับภาพด้านล่างของรูปที่ 2.2 (ข) แสดงค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดจากไอออนบวกและไอออนลบในบริเวณรอยต่อ pn โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณ $-x_a < x < 0$ และที่บริเวณ $0 < x < x_b$ มีความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 ตามลำดับ

$$\epsilon(x) = -\frac{qN_A(x+x_a)}{\epsilon_s} \quad (2.4)$$

$$\epsilon(x) = -\frac{qN_D(x-x_b)}{\epsilon_s} \quad (2.5)$$

โดยที่ ϵ_s คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุซิลิคอนมีค่าเท่ากับ $11.68\epsilon_0$

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-14} [F/cm]

เซลล์แสงอาทิตย์มีกลไกการดูดกลืนแสงและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งต้องได้รับแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ $h\nu$ โดยความยาวของคลื่นแสงในหน่วยนาโนเมตร (nm) สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.6 และการดูดกลืนแสงสามารถแสดงในรูปที่ 2.3

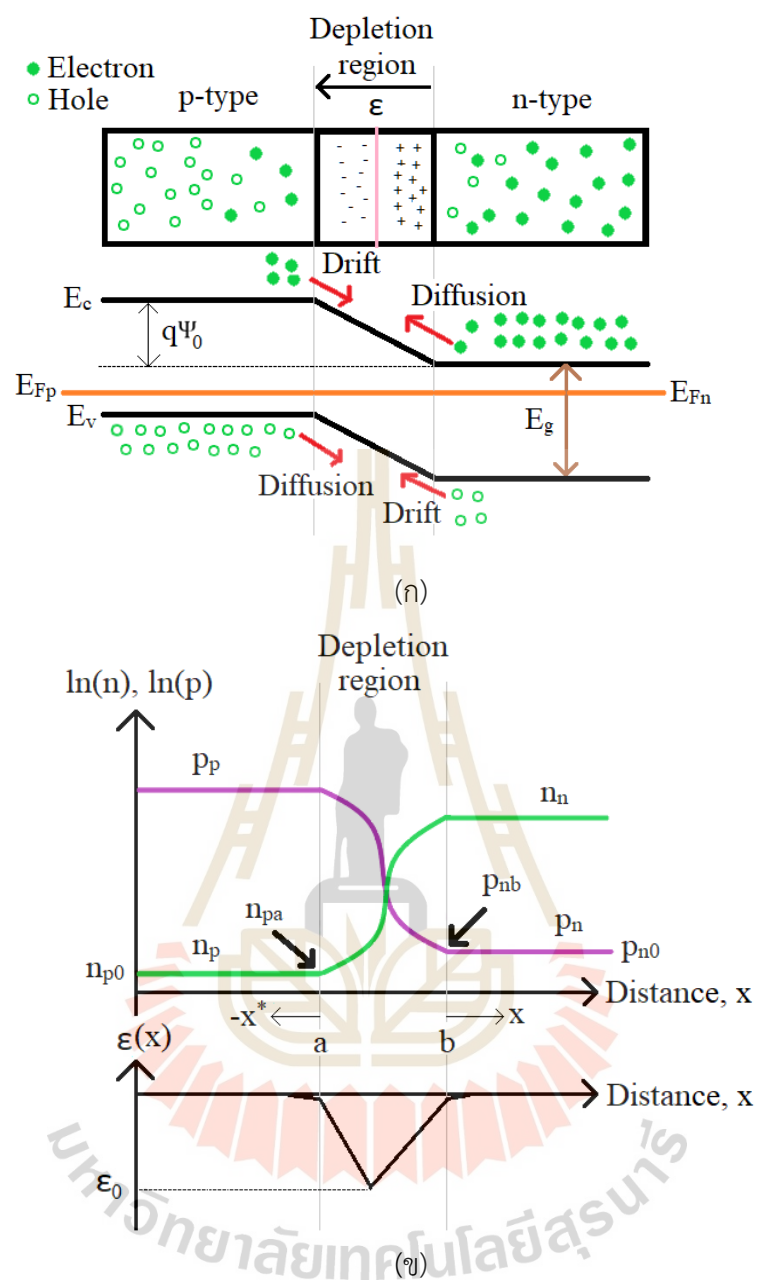
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (2.6)$$

โดยที่ E คือ พลังงาน (eV)

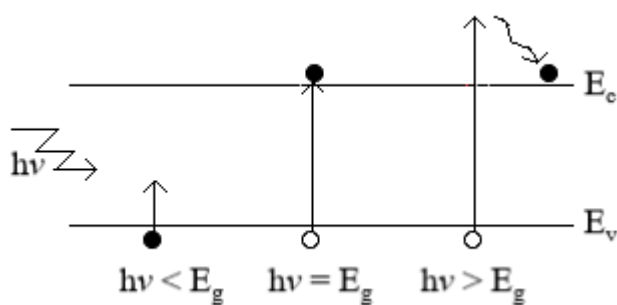
λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's constant) มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} kgm²/s หรือ Js

c คือ อัตราเร็วของคลื่นแสงมีค่าเท่ากับ 2.997×10^8 m/s



รูปที่ 2.2 กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างรอยต่อ p/n ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด



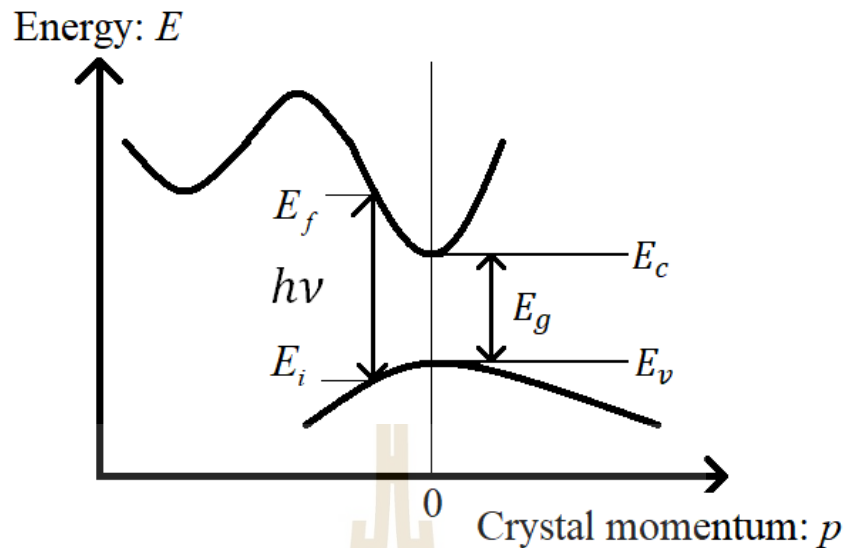
รูปที่ 2.3 การดูดกลืนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2.3 แสดงการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานที่น้อยกว่าแถบพลังงานช่องว่าง จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากความร้อนแต่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band: VB) มีพลังงานที่ไม่เพียงพอที่สามารถข้ามแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap: E_g) ทำให้อิเล็กตรอนตกกลับลงมาที่แถบ VB แต่เมื่อมีพลังงานที่เท่ากับแถบพลังงานช่องว่าง จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนอิสระและเคลื่อนที่ข้ามแถบพลังงานช่องว่างไปยังแถบพลังงานคอนดักชัน (Conduction band: CB) แต่เมื่อได้รับพลังงานที่มากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ข้ามแถบพลังงานช่องว่างเช่นกัน แต่อิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่สูงกว่า CB และตกกลับลงมาให้อยู่ในสถานะที่ต่ำที่สุดในแถบพลังงาน CB แต่อย่างไรก็ตามการตกกลับลงมานี้ อิเล็กตรอนอิสระจะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน

การพิจารณาการดูดกลืนแสงของวัสดุมีการกล่าวถึงการอนุรักษ์พลังงานและการอนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งกลไกการดูดกลืนของแสงของสารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ Direct bandgap และ Indirect bandgap

กระบวนการดูดกลืนของแสงรูปแบบ Direct bandgap ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ มีความสัมพันธ์ของพลังงานและโมเมนตัมแสดงในรูปที่ 2.4 ระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบคอนดักชันและระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์มีค่าโมเมนตัมของผลึก (Crystal momentum: p) เท่ากัน เมื่อเกิดการดูดกลืนพลังงานโฟตอน $h\nu$ หรือความแตกต่างระหว่างพลังงานของเงื่อนไขเริ่มต้น (E_i) และสุดท้าย (E_f) ในผลึกมีความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.7

$$E_f - E_i = h\nu \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ Direct bandgap

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและโมเมนตัม แสดงสมการในรูปของพลังงานในแถบคอนดักชัน (E_c) และพลังงานของโฮลในแถบวาเลนซ์ (E_v) ได้ในสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

$$E_f - E_c = \frac{p^2}{2m_n^*} \quad (2.8)$$

$$E_v - E_i = \frac{p^2}{2m_p^*} \quad (2.9)$$

โดยที่ m_n^* คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน

m_p^* คือ มวลประสิทธิผลของโฮล

เมื่อรวมสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 จะได้สมการที่ 2.10

$$h\nu - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*} \right) \quad (2.10)$$

สมการที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานโฟตอนที่ปริมาณใดๆ ที่มากกว่าพลังงาน E_g เมื่อพลังงานโฟตอนมีค่ามาก โมเมนตัมของผลึกจะเลื่อนตำแหน่งออกจากขอบการดูดกลืนของแสง ทำให้ความแตกต่างของพลังงาน E_i และ E_f เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการดูดกลืนของแสงขึ้นอยู่กับ Density of state ของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน E_i และ Density of empty state

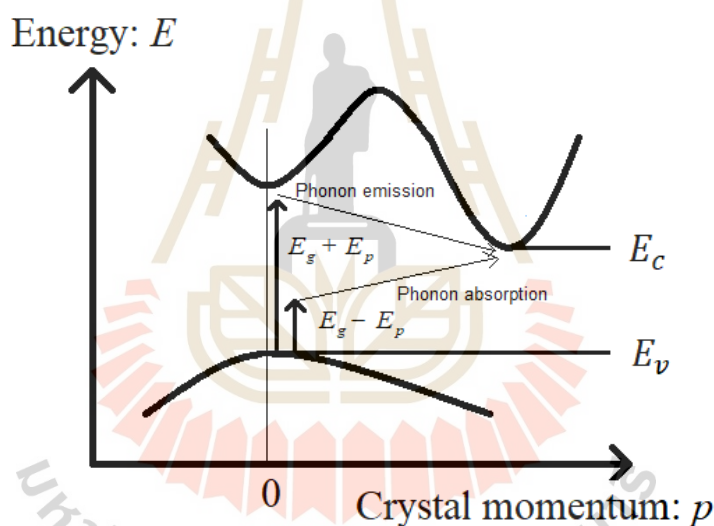
ที่ระดับพลังงาน E_f ซึ่งเมื่อค่า E_i และ E_f เพิ่มขึ้นทำให้ตำแหน่งของโมเมนตัมของอิเล็กตรอนออกจากขอบการดูดกลืนแสงมากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient : α) มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.11

$$\alpha(h\nu) \approx A^* (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.11)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm^{-1})

A^* คือ ค่าคงที่เท่ากับ 2×10^4

กระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบ Indirect bandgap มีความสัมพันธ์ของพลังงานและโมเมนตัมแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างการดูดกลืนพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ Indirect bandgap

รูปที่ 2.5 แสดงระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบคอนดักชันและระดับพลังงานที่สูงที่สุดของแถบวาเลนซ์ มีตำแหน่งโมเมนตัมของอิเล็กตรอน p ไม่ตรงกัน ทำให้การส่งผ่านพลังงานที่ตำแหน่ง $p = 0$ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยตรง จำเป็นต้องมีโมเมนตัมจากภายนอกคือ Phonon emission และ Phonon absorption เข้ามาเกี่ยวข้อง กล่าวคืออิเล็กตรอนที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดในแถบพลังงานวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่มีโมเมนตัมในรูปของ Particle อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากแถบวาเลนซ์ จากนั้นจะเกิด Coordinated vibration ของอะตอมที่ถูกสร้างขึ้นภายในโครงผลึกจากการชนของ Particle ของแสง ทำให้เกิดพลังงานโฟนอน ซึ่งมีพลังงานต่ำแต่มีโมเมนตัมที่สูงมาก ผลักอิเล็กตรอนไปยังตำแหน่งที่ต่ำที่สุดของแถบพลังงานคอนดักชัน โดยปริมาณของพลังงานและโมเมนตัม

จะถูกคงค่าไว้ด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมไว้ ซึ่งปริมาณพลังงานในการดูดกลืนแสงของ Indirect bandgap ที่ใช้ที่น้อยที่สุดมีพลังงานตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.12

$$h\nu = E_g - E_p \quad (2.12)$$

โดยที่ E_p คือ พลังงานจากการดูดกลืนโฟนอนภายนอกที่ถูกกำหนดด้วยโมเมนตัม

ในกระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบ Indirect bandgap ต้องมีพลังงานจากการดูดกลืนโฟนอนมาเกี่ยวข้อง ความน่าจะเป็นของการดูดกลืนแสงของกระบวนการนี้น้อยกว่ากรณีของสารกึ่งตัวนำแบบ Direct bandgap ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจึงมีค่าต่ำกว่า ซึ่งมีความสัมพันธ์ของ Phonon absorption และ Phonon emission แสดงในสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14 ตามลำดับ

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A^{**}(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} \quad (2.13)$$

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A^{**}(h\nu - E_g + E_p)^2}{1 - \exp(E_p/kT)} \quad (2.14)$$

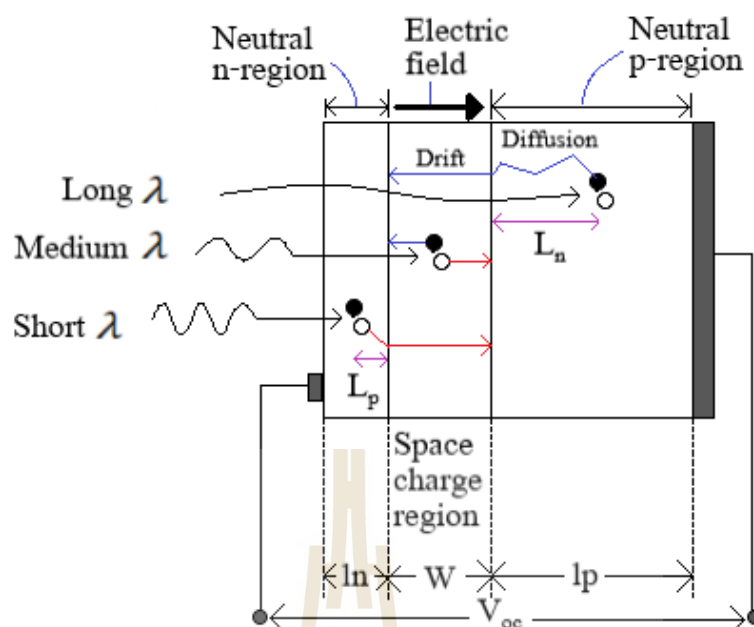
โดยที่ A^{**} คือ ค่าคงที่ของวัสดุที่พิจารณาในการดูดกลืนแสง

k คือ Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} [eV/K]

T คือ อุณหภูมิ [K]

α_a คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ phonon absorption [cm^{-1}]

α_e คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ phonon emission [cm^{-1}]



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2.6 แสดงการเดินทางของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ ที่บริเวณด้าน n มีขนาดความหนาที่แคบ เนื่องจากต้องการให้แสงเกิดการทะลุผ่านไปยังบริเวณ Space charge region ที่ซึ่งเกิดการดูดกลืนแสงมากที่สุดและเป็นบริเวณที่ผลิตพาหะมากที่สุด รองลงมาคือที่ด้าน p เมื่อแสงถูกดูดกลืน จะเกิดการสร้างคู่พาหะอิเล็กตรอนโฮล ($e^- - h^+$ pair: EHPs) โดยที่ในบริเวณ Space charge region พาหะ EHPs จะถูกแยกทันทีเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อเกิดการพัดพาพาหะ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) ระหว่างเทอร์มินอล โดยทางด้าน n คือไฟซ์ลอบและด้าน p คือไฟซ์บวก เมื่อต่อเข้ากับโหลด พาหะอิเล็กตรอนในด้าน n จะเคลื่อนที่เข้าสู่โหลดและไปหาด้าน p เพื่อทำการ Recombination กับพาหะโฮล

นอกจากนี้ EHPs ที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงที่ยาวในด้าน p สามารถแพร่ไปได้ทั่วทั้งบริเวณด้าน p เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าในบริเวณนี้ แต่อย่างไรก็ตามหากอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีจำนวนมาก จะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนเข้าสู่ Space charge region และอิเล็กตรอนนี้จะถูกพัดพาด้วยสนามไฟฟ้าไปยังด้าน n ดังนั้นสังเกตได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้มาจากการเคลื่อนที่ของพาหะข้างน้อยเป็นหลัก

พาหะ EHPs ที่ถูกสร้างในบริเวณ p หากเกิดที่ระยะที่ไกลกว่าระยะของการแพร่ของอิเล็กตรอน L_n พาหะอิเล็กตรอนจะไม่สามารถเข้ามาถึง Space charge region ได้ และเกิดการ Recombination กับโฮลที่อยู่ในด้าน p โดยค่าของ L_n สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.15

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (2.15)$$

โดยที่ τ_n คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะอิเล็กตรอน

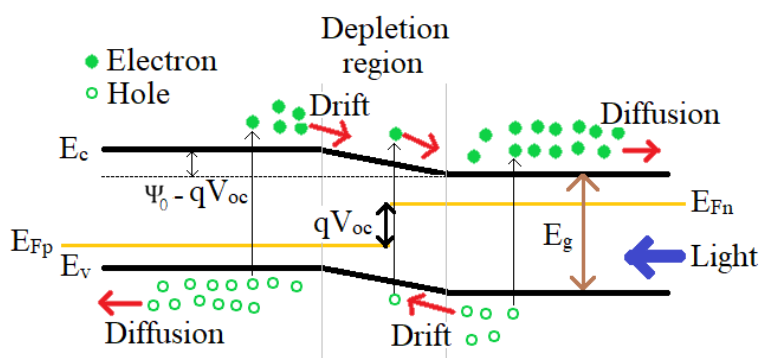
D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

สำหรับทางด้าน n มีลักษณะคล้ายด้าน p แต่เป็นการข้ามรอยต่อเนื่องจากพาหะโฮลเป็นหลัก ซึ่งสำหรับการพิจารณาความหนาแน่นของพาหะอิสระสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.7

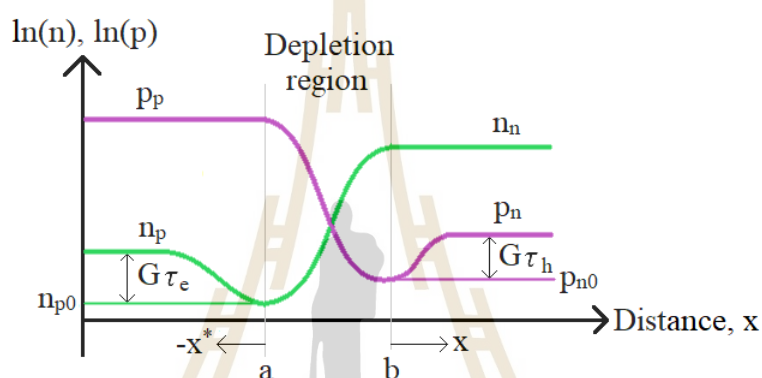
โดยจากรูปที่ 2.7 (ก) ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีทางด้าน p และ n มีความแตกต่างเท่ากับ qV_{oc} และความแตกต่างของระดับพลังงานของทางฝั่ง p และ n มีค่าเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\Psi_0 - qV_{oc}$ เนื่องมาจากพาหะอิสระที่ถูกสร้างขึ้นจากการได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง สำหรับการอธิบายความหนาแน่นของพาหะแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) เมื่อพิจารณาที่ด้าน p ที่ระยะ $-x^* < a$ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นโดยแสงจะมีพลังงานที่สามารถข้ามแถบพลังงานจากชั้น VB ไปยังชั้น CB ทำให้พาหะอิเล็กตรอนมีปริมาณที่มากขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่ด้าน p การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของพาหะมีค่าเท่ากับอัตราการผลิตพาหะ (Generation rate, G) คูณกับค่าช่วงชีวิตของพาหะอิเล็กตรอน (Life time of electron, τ_n) แต่เมื่อเมื่อเข้าสู่ระยะ $x^* = a$ ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนจะมีค่าที่ลดลงจนเท่ากับ n_{p0} ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.16

$$n_p(x^*) = n_{p0} + G\tau_n + \left[n_{p0} \left(\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right) - G\tau_n \right] \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) \quad (2.16)$$

จากนั้นเมื่อเข้าสู่รอยต่อพาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยการพัดพาเนื่องจากสนามไฟฟ้าข้ามไปรวมเข้ากับอิเล็กตรอนที่ด้าน n และสำหรับค่าความหนาแน่นของพาหะโฮลจะมีลักษณะที่ตรงกันข้าม



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างรอยต่อ pn ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะสว่าง

เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงจะเกิดการสร้างกระแสไฟฟ้า I_L เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุ เมื่อทำการต่อโหลดเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีกระแสไฟฟ้าสุทธิแสดงในสมการที่ 2.17

$$I = -I_L + I_s \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

โดยที่ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) (A) มีสมการแสดงในสมการที่ 2.18

$$I_s = A \left(\frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} \right) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.17 เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขลัดวงจรหรือ V_{oc} มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ที่ได้มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้า I_L และเมื่อพิจารณาเงื่อนไขเปิดวงจรหรือกระแสไฟฟ้าสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ ($I = 0$) จะได้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าตามสมการที่ 2.19

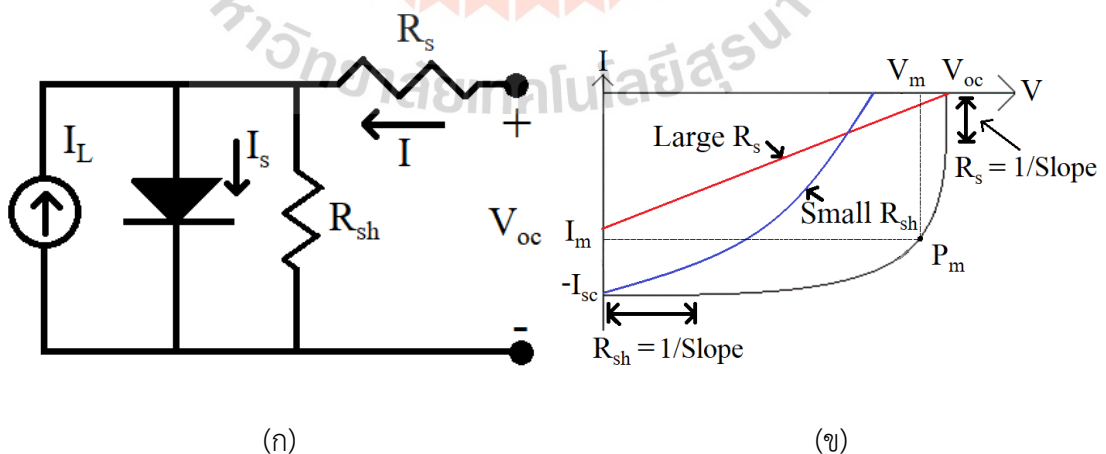
$$V_{oc} = V_t \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_s} \right) \quad (2.19)$$

โดยที่ V_t คือ $\frac{kT}{e}$ หรือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน (Thermal voltage)

อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์มีความต้านทานที่แฝงอยู่เรียกว่า Parasitic resistance ประกอบด้วย 1. Series resistance (R_s) เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านที่หน้าสัมผัสระหว่างขั้วโลหะและแผ่นฐานซิลิคอน หากค่า R_s มีค่าที่สูง มีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและค่า Fill factor มีค่าลดลง และ 2. Shunt resistance (R_{sh}) เกิดจากจุดผิดพร่องในช่วงของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ หากมีค่า R_{sh} ที่น้อย มีผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าลดลง โดยเมื่อพิจารณาเรื่องของ Parasitic resistance จะได้กระแสไฟฟ้าสุทธิแสดงในสมการที่ 2.20 ซึ่งเขียนในรูปวงจรสมมูลสามารถแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) โดยมี IV-Characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณา Parasitic resistance แสดงในรูปที่ 2.8 (ข)

$$I = -I_L + I_s \left[\exp \left(\frac{q(V_{oc} + IR_s)}{n^* kT} \right) - 1 \right] + \frac{V_{oc} + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.20)$$

โดยที่ n^* คือ Ideality factor มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 2.8 (ก) วงจรสมมูล และ (ข) I-V characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.8 (ข) สามารถพิจารณาหาค่า Fill factor (FF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแสดงในสมการที่ 2.21 และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (η) ได้แสดงในสมการที่ 2.22

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2.21)$$

$$\eta = \left| \frac{P_m}{P_{in}} \right| \times 100 = \left| \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} \right| \times 100 \quad (2.22)$$

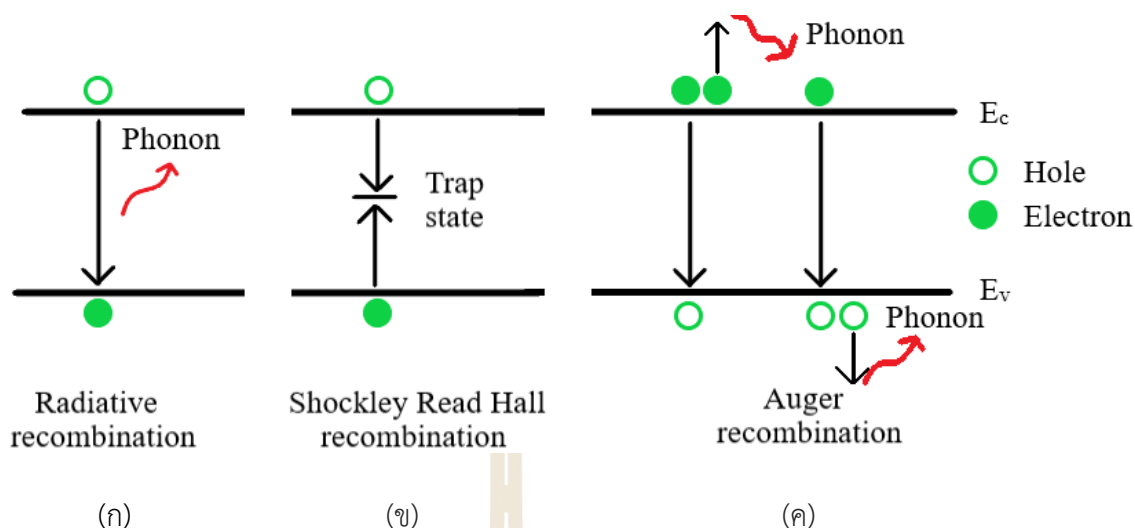
โดยที่ P_m คือ กำลังไฟฟ้า Output สูงสุด

I_{mp} คือ กระแสไฟฟ้าที่จุด P_m

V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด P_m

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความชันของ IV-Characteristic ของรูปที่ 2.8 (ข) ที่ค่าใกล้กับ V_{oc} และ I_{sc} จะสามารถหาค่า R_s และ R_{sh} ได้เช่นเดียวกัน ตามลำดับ

จากการดูดกลืนแสงที่มีการสูญเสียของแสงในรูปของค่าความร้อนจากการดูดกลืนพลังงานที่มีค่ามากกว่า 1.12 eV และจากการทะลุผ่านของแสงที่มีความยาวคลื่นที่มากกว่า 1100 nm ยังมีการสูญเสียจากภายในเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากการรวมตัวของพาหะ (Carrier recombination) ซึ่งหากเกิดการรวมตัวกันของพาหะก่อนที่พาหะอิเล็กตรอนหรือโฮลจะเดินทางไปยังขั้วโลหะ ทำให้เกิดการลดลงของกระแสไฟฟ้า I_L โดยการรวมตัวของพาหะที่เกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 2.9 สามารถแบ่งประเภทได้ 3 ชนิด ประกอบด้วย



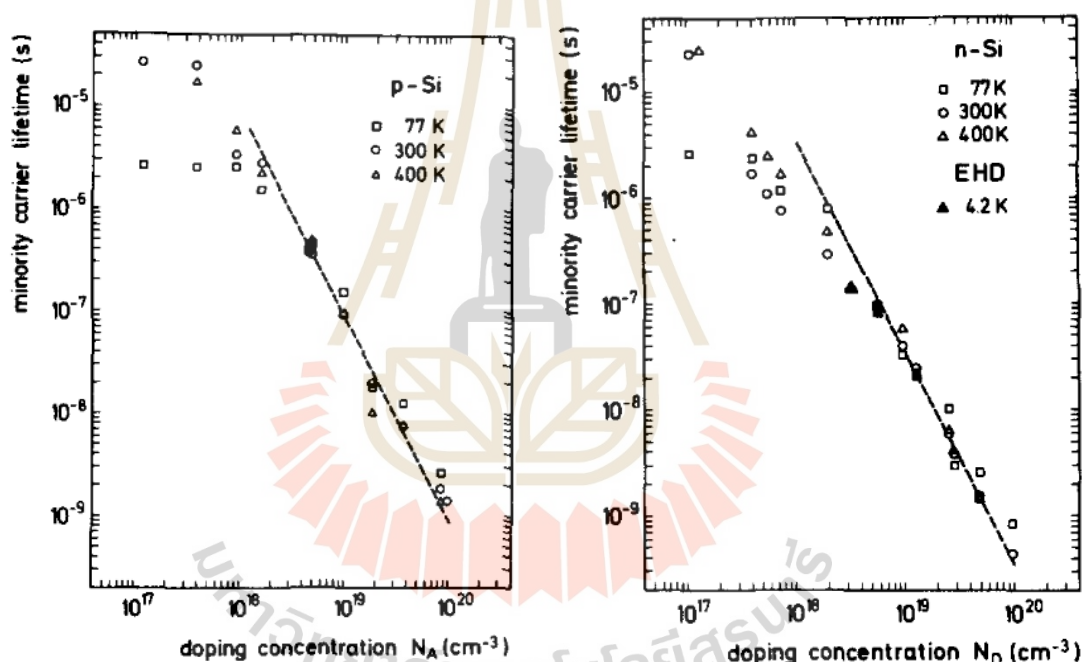
รูปที่ 2.9 การรวมตัวของพาหะชนิดต่างๆ

1. การรวมตัวของพาหะที่เกิดจากการเปล่งแสง (Radiative recombination) เป็นการรวมตัวของพาหะที่เกิดจากการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากวัสดุชนิดแถบพลังงานช่องว่างแบบตรง (Direct band gap) เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) จากรูปที่ 2.9 (ก) แสดงการรวมตัวของพาหะอิเล็กตรอนที่อยู่บนแถบคอนดักชันตกกลับลงมารวมกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ โดยในระหว่างที่ตกกลับลงมาจะมีการคายพลังงานงานในรูปของแสงโฟนอน (Phonon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับค่าแถบพลังงานช่องว่าง อย่างไรก็ตามสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน การรวมตัวของพาหะรูปแบบนี้เกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดแถบพลังงานช่องว่างแบบไม่ตรง (Indirect band gap) ที่มีตำแหน่งโมเมนตัมของจุดต่ำสุดของแถบพลังงานคอนดักชันไม่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์

2. การรวมตัวของพาหะรูปแบบ Shockley Read Hall (Shockley Read Hall recombination : SRH) เป็นการรวมตัวกันของพาหะบริเวณจุดผิดพร่องบนพื้นผิวหรือภายในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือ เกิดสถานะดักจับพาหะ (Trap state) ที่บริเวณแถบพลังงานช่องว่างของ Band energy diagram แสดงในรูปที่ 2.9 (ข) เพื่อลดอัตราของการรวมตัวของพาหะรูปแบบนี้ที่บริเวณพื้นผิวต้องมีชั้นฉนวนบางๆ (Dielectric layer) เพื่อรวบรวมประจุภายใต้ชั้นฉนวนซึ่งเรียกชั้นฉนวนนี้ว่าพาสซีเวชัน (Passivation) (Zhao, Wang, Green and Ferrazza, 1998)

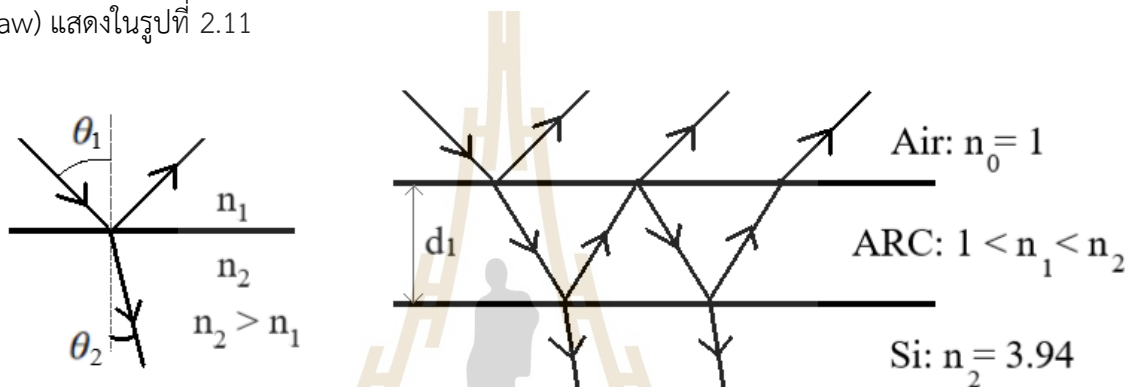
3. การรวมตัวของพาหะรูปแบบออร์เจ (Auger recombination) ในรูปที่ 2.9 (ค) เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารมาก กลไกการรวมตัวเริ่มต้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่ตกกลับลงมาจากแถบพลังงานคอนดักชันมารวมตัวกับโฮลที่แถบพลังงานวาเลนซ์ และมีการปลดปล่อยพลังงานโฟนอน

(Phonon) ให้อิเล็กตรอนข้างเคียง ทำให้อิเล็กตรอนข้างเคียงที่ได้รับพลังงานในแถบพลังงานคอนดักชันเกิดการกระตุ้นให้ไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่สูงเกิดการตกกลับลงมาที่จุดต่ำสุดของแถบพลังงานคอนดักชัน จะมีการคายพลังงานในรูปของความร้อนออกมาและทำให้โครงผลึกเกิดการสั่นสะเทือนและอาจเสียหายได้ ทำให้การรวมตัวกลับรูปแบบนี้เป็น การจำกัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงของเซลล์แสงอาทิตย์และเกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด จากงานวิจัยของ Dziewior and Schmid (1977) แสดงค่าช่วงชีวิตของพาหะเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารเจือได้ในรูปแบบที่ 2.10 ทั้งของสารเจือชนิดผู้ให้และสารเจือชนิดผู้รับที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการรวมตัวของพาหะรูปแบบออร์เจเมื่อสารกึ่งตัวนำเกิดการเจือสารปริมาณที่มาก ส่งผลต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะให้มีค่าลดลง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 2.10 ค่าช่วงชีวิตของพาหะเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารเจือ

ส่วนที่สำคัญสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนในด้านของการผลิตพาหะอิสระคือการรับแสงของชั้นรับแสง ซึ่งชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับหรือชั้น Anti reflection coating (ARC) คือส่วนที่อยู่ด้านบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นชั้นออกไซด์มีหน้าที่ลดการสะท้อนแสงกลับที่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยปกติแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลักษณะแบบผิวเรียบ (Polished Si) มีการสะท้อนแสงกลับมากถึง 30% จึงต้องทำให้เกิดผิวขรุขระ (Textured Si surface) และเสริมด้วยชั้น ARC บางๆ ซึ่งชั้น ARC ส่วนมากมีค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index: n) ที่น้อยกว่าซิลิคอนที่มีค่าเท่ากับ 3.94 เนื่องจากต้องการให้แสงหักเหสู่รอยต่อ pn มากที่สุด ตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การสะท้อนของแสงเมื่อมีชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับตามกฎของสเนลล์

ซึ่งค่าการสะท้อนแสงกลับของแสง (Reflectivity: R) สามารถแสดงในสมการที่ 2.23

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2 r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2 r_1 r_2 \cos 2\theta} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 ค่า r_1 , r_2 และ θ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.24 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ

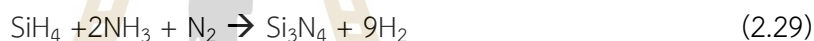
$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (2.24)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.25)$$

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (2.26)$$

ในสมการที่ 2.23 สามารถจำลองทางคณิตศาสตร์หาค่าความเหมาะสมการเลือกใช้ค่าดัชนีหักเหของแสงของชั้น ARC บนเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสงได้

วัสดุที่ใช้เป็นชั้น ARC สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนส่วนใหญ่เป็นกลุ่มซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride: SiN_x) ซิลิคอนออกไซด์ (Silicon oxide: SiO_x) และซิลิคอนออกซีไนไตรด์ (Silicon oxynitride: SiO_xN_y) (Limsiri and et al., 2022) ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้จากการก่อรูปที่พื้นผิวของซิลิคอนเอง โดยมีการผ่านการอบด้วยอุณหภูมิสูงร่วมกับการใช้แก๊สไนโตรเจนหรือออกซิเจน หรือมีการใช้พลาสมาจากกระบวนการที่เรียกว่า Plasma enhanced chemical deposition (PECVD) โดยทางอุตสาหกรรมส่วนมากมีการใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) หรือใช้แอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งองค์ประกอบนั้นมีอะตอมของไนโตรเจนรวมอยู่ด้วยผสมกับแก๊สที่มีองค์ประกอบของซิลิคอนเช่นแก๊สไซเลน (Silane: SiH_4) กระตุ้นด้วยพลังงานทำให้เกิดพลาสมา อะตอมของแก๊สเกิดการแตกตัวและจับกับอะตอมของแก๊สอีกชนิดจนกลายเป็นของแข็ง และอะตอมที่จับตัวจะไปเคลือบพื้นผิวบนแผ่นฐานของซิลิคอน ซึ่งมีกระบวนการทางเคมีแสดงในสมการที่ 2.27 2.28 และสมการที่ 2.29



นอกจากนี้ยังมีการใช้กระบวนการที่เรียกว่า Sputtering ที่เป็นการใช้อะตอมของแก๊สอาร์กอนทำการ Bombard กับอะตอมของ Target อย่าง SiN_x โดยตรง ทำให้อะตอมของ SiN_x หลุดออกมาแล้วไปเกาะอยู่บนแผ่นซิลิคอนเป็นต้น นอกจากนี้การสร้างชั้น ARC ยังสามารถเป็นวัสดุอื่นได้ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide: Al_2O_3) (Dobrzański and Szindle, 2013) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) (Jain, Paliwal, Gupta, and Tomar, 2020) แทนทาลัมเพนทอกไซด์ (Tantalum pentoxide: Ta_2O_5) (Sertel, Ozen, Baran and Ozcelik, 2019) หรือแมกนีเซียมฟลูออไรด์ (Magnesium fluoride: MgF) (Sun, et al., 2020) เป็นต้น โดยค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบางชนิดต่างๆ สามารถแสดงค่าได้ในตารางที่ 2.1

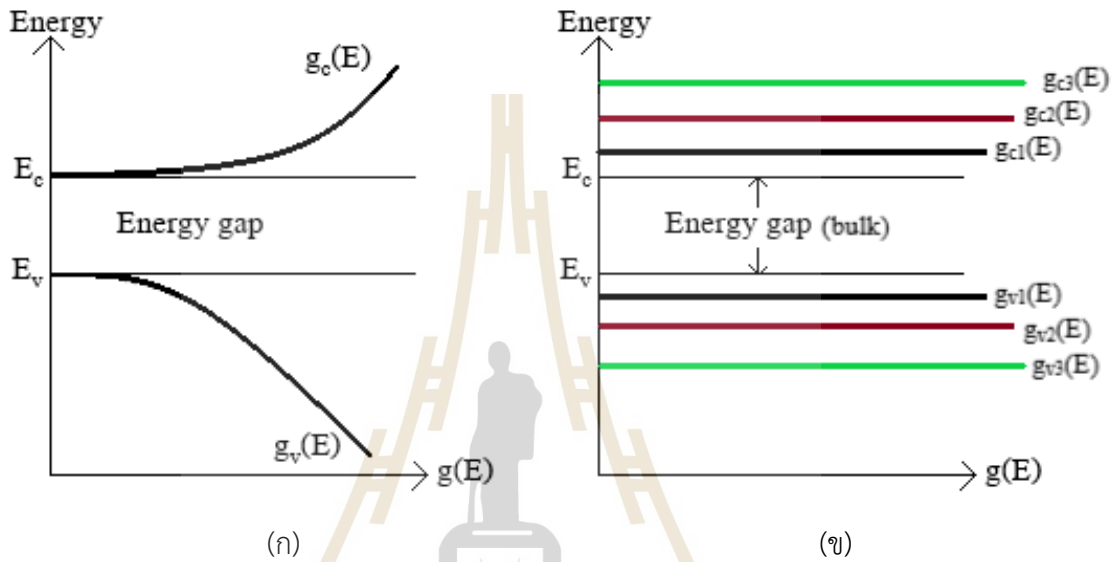
ตารางที่ 2.1 ค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ค่าดัชนีหักเหแสง	อ้างอิง
Aluminum oxide (Al_2O_3)	1.652	Dobrzański (2013)
Tantalum pentoxide (Ta_2O_5)	2.12	Sertel (2019)
Titanium dioxide (TiO_2)	2.5 – 2.8	Jain (2020)
Magnesium fluoride (MgF_2)	1.38	Sun (2020)
Zinc sulfide (ZnS)	2.36	Sertel (2019)
Zinc oxide (ZnO)	2.00	Hussain (2015)
Zinc oxide doped aluminum (AZO)	1.75 – 1.85	Şenay (2019)
Zinc oxide doped bismuth (ZnO:Bi)	1.31 – 1.46	Fangsuwannarak (2013)
Silicon (Si)	3.92 – 4.00	Green (1995)
Silicon oxide (SiO)	1.8 – 1.9	Dobrzański (2013)
Silicon dioxide (SiO_2)	1.4 – 1.5	Dobrzański (2013)
Silicon nitride (SiN_x)	2.00 – 2.08	Limsiri (2022)
Silicon oxynitride (SiO_xN_y)	1.62 – 1.83	Limsiri (2022)

2.3 หลักการ Quantization ของการรับแสงของฟิล์มบาง

นอกจากการศึกษาชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ ยังสามารถพิจารณาชั้นรับแสงอื่นๆ เพิ่มเติมได้อีกเช่นเดียวกัน ซึ่งการสร้างชั้นรับแสงสามารถประยุกต์กับการนำทฤษฎีเรื่องการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัมมาใช้เป็นชั้นรับแสงได้ โดย Barbagiovanni, Lockwood, Simpson and Goncharova (2014) มีการอธิบายเรื่องการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัมของควอนตัมดอทซึ่งคืออนุภาคหรือผลึกขนาดเล็กของวัสดุสารกึ่งตัวนำในช่วง 2 – 10 นาโนเมตร มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำตัวของมันเอง อิเล็กตรอนเดิมที่มีการเคลื่อนที่ล้อมรอบอะตอมด้วยระยะของรัศมี Bohr (Bohr radius) หรือระยะระหว่างอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันกับโฮลที่เกิดจากอิเล็กตรอนตัวนั้นในแถบวาเลนซ์ ทำให้ค่าความหนาแน่นของสถานะ (Density of state: $g(E)$) มีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 2.12 (ก) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ในสมการที่ 2.30 และสมการที่ 2.31 สำหรับความหนาแน่นสถานะในแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ แต่เมื่ออิเล็กตรอนถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีรัศมีน้อยกว่ารัศมี Bohr ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของสถานะไม่ต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) จะเกิดขั้นระดับพลังงานย่อยในบ่อพลังงาน ซึ่งเรียกว่าระดับพลังงานควอนไตซ์ (Quantized energy levels) ทำให้ขอบของแถบพลังงานคอนดัก

ชั้นและแถบพลังงานวาเลนซ์ยับเยินออกไปให้ได้ค่าระดับพลังงานที่กว้างขึ้นมากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง (E_g) โดยขนาดของควอนตัมดอทที่เล็กทำให้เกิดการขยายแถบพลังงานช่องว่างได้มากสามารถแสดงความหนาแน่นของสถานะสำหรับการจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสมการที่ 2.32



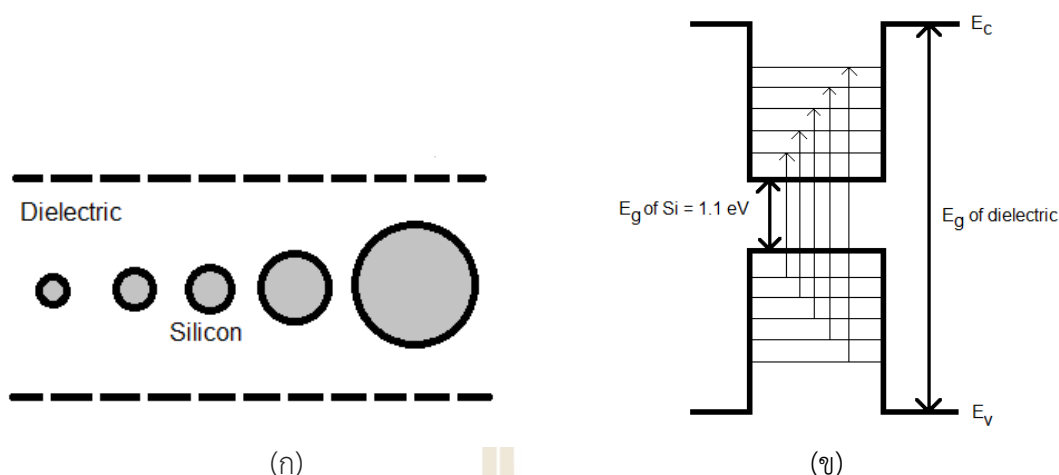
รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของสถานะในแถบพลังงานจากสมการความหนาแน่นของสถานะ

$$g_c(E) = (8\pi 2^{1/2}) \left(\frac{m_e}{h^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (2.30)$$

$$g_v(E) = (8\pi 2^{1/2}) \left(\frac{m_p}{h^2}\right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (2.31)$$

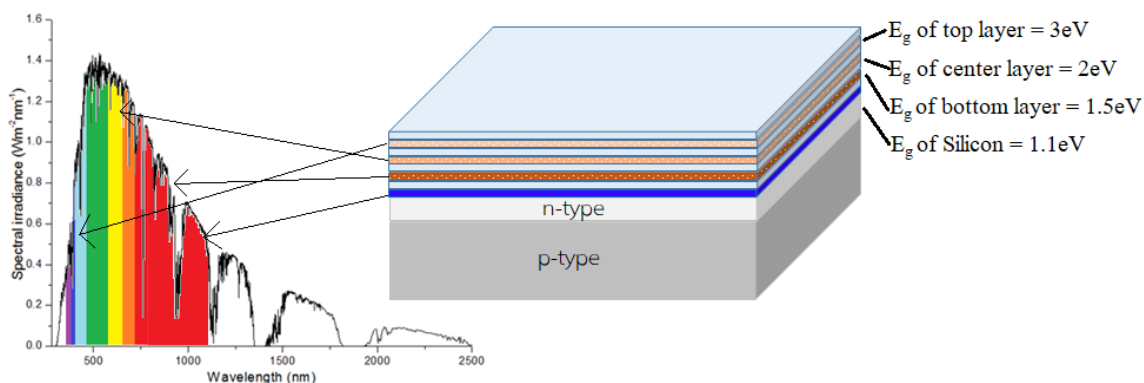
$$g(E) = 2 \sum_n \delta(E - E_n) \left(\frac{2m_e}{h^2}\right)^{1/2} \quad (2.32)$$

รูปที่ 2.13 (ก) แสดงความแตกต่างของขนาดผลึกซิลิคอนที่ฝังตัวในสารกลุ่มไดอิเล็กทริกซ์ และการเกิดควอนตัมของระดับพลังงาน ทำให้เกิดการขยายแถบพลังงานช่องว่างในที่ระดับต่างๆ โดยเมื่อขนาดของผลึกซิลิคอนเล็กมากๆ จะสามารถขยายแถบพลังงานช่องว่างได้มากแสดงในรูปที่ 2.13 (ข)



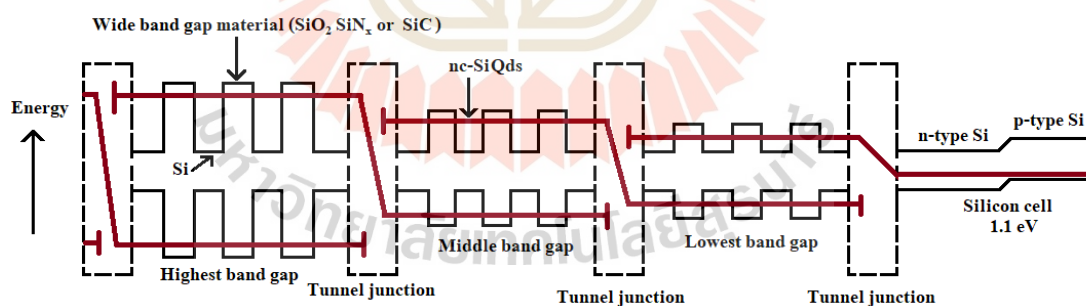
รูปที่ 2.13 ก) การจำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะของผลึกนาโนซิลิคอนในเมทริกซ์ของไดอิเล็กตริก และ ข) การเกิดระดับพลังงานควอนไทซ์ของควอนตัมดอท

จากรูปแบบดังกล่าว เมื่อนำมาประยุกต์กับเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เป็นชั้นรับแสงที่ด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เกิดการดูดกลืนแสงที่มีค่าความยาวคลื่นน้อยกว่า 1100 nm ได้มากขึ้น เพราะที่ชั้นรับแสงนี้มีแถบพลังงานช่องว่างที่มากกว่า 1.1 eV เกิดการลดผลของ Thermalization loss ได้เป็นอย่างดี โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการประยุกต์ใช้เรื่องของควอนตัมดอทนี้ เป็นรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem cell ประกอบด้วยชั้นรอยต่อพีเอ็นที่มีโครงสร้างของผลึกนาโนในขนาดต่างๆ เรียงลำดับเป็นชั้นๆ บนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ pn การเรียงลำดับชั้นกำหนดให้ชั้นบนสุดเกิดการดูดกลืนแสงที่มีแถบพลังงานช่องว่างมากที่สุด เพื่อที่จะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยที่สุดก่อน ส่วนความยาวคลื่นที่สูงกว่าจะทะลุผ่านชั้นแรกลงไปยังชั้นถัดไปและเกิดการดูดกลืนในชั้นที่ 2 และเกิดกระบวนการนี้ต่อไป จนถึงรอยต่อ pn แสดงในรูปที่ 2.14 ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบนี้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้เป็นจำนวนมากโดยไม่เกิดการสูญเสียเชิงความร้อน



รูปที่ 2.14 แนวความคิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem cell

รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพแถบพลังงานช่องว่างบนรอยต่อพีเอ็นของซิลิคอน ประกอบด้วยชั้นรับแสงที่เป็นซิลิคอนควอนตัมดอท (SiQDs) ในเมตริกซออกไซด์ 3 ชั้น ค่าแถบพลังงานช่องว่างจากเรียงจากมากลงมาน้อย แต่ละชั้นมี Tunnel junction คั่นอยู่ จากผลของ Quantize effect ระบุว่า ขนาดของ SiQDs ที่มีขนาดเล็กมากๆ ส่งผลให้ค่าของแถบพลังงานช่องว่างมีค่ามากขึ้น ดังนั้นที่ชั้น Highest band gap จึงมีขนาดของอนุภาค SiQDs เล็กที่สุด ในขณะที่ชั้น Middle band gap และ Lowest band gap มีขนาดของอนุภาค SiQDs ที่ใหญ่มากขึ้น ตามลำดับ (Conibeer, et al., 2008) ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชั้นรับแสงที่มีการประยุกต์ใช้ SiQDs แสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.15 แถบพลังงานช่องว่างของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเทนเดมเซลล์

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นรับแสง SiQDs

อ้างอิง (ปี)	วิธีการสร้างชั้น QDs	ส่วนสาระสำคัญและผลการทดลองที่ได้
Hong (2011)	สร้างชั้นฟิล์ม $\text{SiO}_2/\text{B-doped Si}$ multilayer ด้วยกระบวนการ Sputtering บนแผ่น n-Si จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 1100°C 20 นาที ในบรรยากาศ N_2	- เกิดผลึก SiQDs ฝังตัวใน SiO_2 โดยมีขนาดน้อยกว่า 5 nm - ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสามารถให้ค่าได้ถึง 13.4%
Janz (2013)	สร้าง Tandem cell ที่มีลำดับชั้น ITO/a-Si(p)/SiQDs in SiC/c-SiC บนแผ่น n/p-Si กระบวนการสร้างชั้น Tandem cell ใช้การ Plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) ที่สัดส่วนพลังงานต่างๆ และอบด้วยอุณหภูมิ 1100°C นาน 30 นาที เพื่อให้เกิด SiQDs จากนั้นทำการสร้างชั้น ITO ด้วยการ Sputtering	- สามารถให้แรงดันไฟฟ้า V_{oc} ที่สูงถึง 978 mV เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อ 2 ชั้น คือ p/n และ a-Si(p)/SiQDs in SiC และสำหรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_{sc} ที่ได้กลับลงลงเป็นอย่างมากโดยให้ค่าสูงสุดที่ 0.25 mA/cm^2
Kuo (2013)	ใช้การ Sputtering ZnO และ Si สร้างฟิล์มบางสลับทับซ้อนกันจำนวน 20 ชั้น และทำการอบที่อุณหภูมิ $500 - 800^\circ\text{C}$ 30 นาที	- จากผลการอบด้วยอุณหภูมิ $700 - 800^\circ\text{C}$ พบการก่อรูปของผลึกซิลิคอนในเมตริกซ์ซึ่งคือออกไซด์ ซึ่งอุณหภูมิการอบเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิด SiQDs - ฟิล์มบาง ZnO/SiQDs ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ $500 - 700^\circ\text{C}$ สามารถให้ค่าความต้านทานจำเพาะใน order $10^4\ \Omega\text{cm}$ เมื่อเทียบกับการอบด้วยอุณหภูมิ 800°C ที่มีค่าใน order $10^9\ \Omega\text{cm}$ เนื่องจาก ฟิล์มเกิดการนูนหรือโป่งพองเนื่องจากความร้อนสูง อย่างไรก็ตามฟิล์มบาง ZnO/SiQDs นี้สามารถนำมาประยุกต์กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ต่อไป

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นรับแสง SiQDs (ต่อ)

อ้างอิง (ปี)	วิธีการสร้างชั้น QDs	ส่วนสาระสำคัญและผลการทดลองที่ได้
Karmouch (2013)	ใช้การ Ion implantation สร้างเป็นไอออน Si^+ บนแผ่นฐาน และทำการอบที่อุณหภูมิ 1100 °C 60 นาที ในบรรยากาศ N_2 พิล์มบางที่ได้จะมีฟลักนาโนซิลิคอนฝังตัวอยู่ในเมตริกซ์ SiO_2 ด้วยขนาดผลึกเฉลี่ยเท่ากับ 3 nm	- การตรวจสอบด้วย Photoluminescence (PL) ของฟิล์มบาง พบยอด spectrum PL ที่ค่าพลังงานเท่ากับ 1.65 eV ซึ่งบ่งชี้ถึงการบอกตำแหน่งของ E_g ว่าเกิดการเลื่อนออกมาจากวัสดุ Si ที่มีค่า E_g เท่ากับ 1.1 eV
Castaldo (2014)	สังเคราะห์ Si-ZnO multilayer ด้วยกระบวนการ Sputtering โดยใช้ Target จาก Boron doped Si และ ZnO จำแนกเงื่อนไขจากการป้อนพลังงานขณะทำการ Sputtering อบฟิล์มที่ได้ด้วยอุณหภูมิ 560 °C นาน 6 ชั่วโมง	- พบ ZnO QDs ที่สามารถทำให้เกิดการขยาย E_g จากผลึก ZnO ที่มี E_g เท่ากับ 3.35 eV ไปเป็น 3.65 eV ซึ่งผลึกของ ZnO QDs มีขนาดน้อยกว่า 7 nm - พบ SiQDs ที่สามารถทำให้เกิดการขยาย E_g จากผลึก Si ที่มี E_g เท่ากับ 1.12 eV ไปเป็น 1.72 eV ซึ่งผลึกของ ZnO QDs มีขนาดน้อยกว่า 8 nm - ค่าความต้านทานจำเพาะของแผ่นฐานมีค่าตั้งแต่ 5 Ωcm จนถึง $1.6 \times 10^7 \Omega\text{cm}$ ทั้งนี้พบว่าฟิล์มบางที่ให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่ำนั้น จะมีการฝังตัวของผลึก ZnO อยู่ด้วย
Goncharova (2015)	สร้างชั้นฟิล์ม Amorphous Si_3N_x โดยแปรเปลี่ยนค่า x ในขณะที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการ PECVD ด้วยแก๊ส NH_3 และ NH_4 และทำการอบที่อุณหภูมิ 500 °C ด้วยเวลา 30 นาที	- สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบาง SiN_x ที่มีการฝังตัวของ SiQDs ได้ด้วยอุณหภูมิต่ำที่ 500 °C ซึ่งพบว่ามีขนาดที่เล็กมากกว่า 5 nm - จาก Tauc plot พบการเลื่อนของแถบพลังงานช่องว่างไปที่ค่าที่สูงขึ้นถึง 2.93 eV ตามสัดส่วนค่า x ที่มีปริมาณที่มากขึ้น ชี้ให้เห็นถึงการเกิด Quantum confinement ของ SiQDs

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นรับแสง SiQDs (ต่อ)

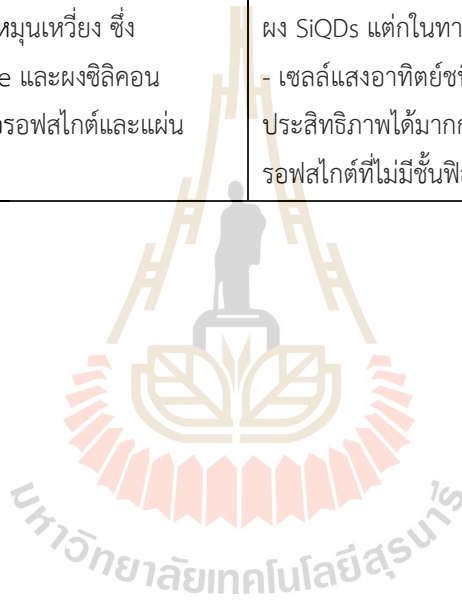
อ้างอิง (ปี)	วิธีการสร้างชั้น QDs	ส่วนสาระสำคัญและผลการทดลองที่ได้
Lee (2016)	ใช้การ sputtering SiO_x : B บนแผ่นซิลิคอนชนิด n โดยให้ค่าสัดส่วนของ x เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 – 2 จากนั้นนำแผ่นฐานเข้าอบที่ 1100°C นาน 60 นาที ในบรรยากาศ N_2 โดยกำหนดให้ Boron (B) มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ $5.7 \times 10^{21} \text{ atom/cm}^3$	- ภาพ HRTEM แสดงการเกิดผลึกระดับนาโนของ SiQDs ที่แทรกตัวอยู่ในออกไซด์ มีขนาดตั้งแต่ 1.5 – 4 nm บ่งชี้ให้เห็นถึงการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัม - แผนภาพ External quantum efficiency (EQE) แสดงการตอบสนองที่เพิ่มมากขึ้นในความยาวคลื่นที่ 300 – 400 nm หมายถึงพลังงาน photon ที่พลังงานสูงถูกดูดกลืนเพิ่มขึ้นและถูกนำไปสร้างเป็นพาหะอิสระ - เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด QDs นี้สามารถให้ประสิทธิภาพที่ 14.5% มากกว่า nc-Si solar cell ที่ให้ประสิทธิภาพ 13.32%
Zhou (2019)	สังเคราะห์ Si จากการแช่กรดให้ผลึกซิลิคอนมีขนาดเล็กลงจนได้ซิลิคอนที่มีขนาดระดับนาโนเมตร จากนั้นนำผงซิลิคอนไปผสมเข้ากับ CsPbBr_3 ให้เกิดเป็นสารละลาย SiQDs/ CsPbBr_3 จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยงบนแผ่นฐาน $\text{FTO}/\text{bI-TiO}_2/\text{mesoTiO}_2$ และผ่านกระบวนการอบแห้ง จากนั้นทำ hole transport materials (HTM) ด้วย spiro-MeOTAD และสร้างขั้วโลหะ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Perovskite ที่มี SiQDs	- ผงซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด้วยกรดเมื่ออยู่ในฟิล์มบาง CsPbBr_3 และวัดค่า PL พบว่าสามารถให้ยอดคลื่นที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 435 553 และ 630 nm ซึ่งตรงกับสีน้ำเงิน สีเหลืองและสีแดงตามลำดับ ชี้ให้เห็นถึงการเลื่อนขยายของ E_g จากปรากฏการณ์ Quantum confinement effect - สามารถให้ค่าการแปลงพลังงานในเซลล์ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 8.31%

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นรับแสง SiQDs (ต่อ)

อ้างอิง (ปี)	วิธีการสร้างชั้น QDs	ส่วนสาระสำคัญและผลการทดลองที่ได้
Fangsuwannarak (2021)	สังเคราะห์สารละลาย ZnO:Bi จากกระบวนการ Sol-gel จากนั้นผสมผงซิลิคอนที่เสื่อมสภาพในปริมาณต่างๆ เพื่อให้ได้สารละลาย Si dots จากนั้นนำไปเคลือบบนแผ่นฐาน SiNx/p/n -Si ด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงและนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 550 °C นาน 2 ชั่วโมง	- ขนาดของอนุภาคซิลิคอนที่พบมีขนาดที่น้อยกว่า 5 ไมครอน แต่ผลึก Si ที่ฝังตัวอยู่ในอนุภาคซิลิคอนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 110 nm - ขนาดของผลึก ZnO ที่ฝังตัวอยู่ในฟิล์มบาง Si dots มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20 nm - แม้ว่าผลึกมีขนาดที่ใหญ่กว่า Bohr radius แต่สามารถทำการขยาย E_g จากผลึกซิลิคอน (1.12 eV) ออกมาได้มากถึง 2.2 eV - มีค่าความต้านทานจำเพาะที่ลดลงเมื่อได้รับแสงตกกระทบ จาก order $10^6 \Omega\text{cm}$ ลงมายัง $10^1 \Omega\text{cm}$ - เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น Si dots สามารถให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นถึง 1.29% เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้น Si dots
Ren (2021)	แผ่นซิลิคอนชนิด p ถูกนำมาบดด้วยลูกบดในสารละลาย 1-octadecene (ODE) และแยกขนาดอนุภาคขนาดเล็กจากการทำ Centrifuge โดยพบว่าอนุภาคมีขนาดเท่ากับ 5 nm จากนั้นนำมาประยุกต์เป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Perovskite ที่ประกอบด้วยชั้น ARC/Quartz slap/SiQDs in ODE/PMMA/Quartz slap/Perovskite (เรียงจากบนลงล่าง)	- ผง Si ที่ลอยตัวอยู่ใน 1-octene ถูกนำมาวิเคราะห์ทางแสงพบว่าเกิดการดูดกลืนแสงเป็นอย่างมากในช่วงแสง UV และพบว่าการฉายแสง PL พบการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 690 525 และ 465 nm ที่เป็นแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินตามลำดับ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ SiQDs - การดูดกลืนแสงมากขึ้นตามสัดส่วนความหนาแน่นของสารละลาย SiQDs ใน ODE - เมื่อนำมาใช้ร่วมกับ Perovskite solar cell พบว่าชั้น SiQDs นี้สามารถดูดกลืนแสง UV และปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 690 525 และ 465 ออกมา ทำให้ชั้นเซลล์ที่อยู่ด้านล่างเกิดการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมไม่เกิดความร้อน ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์อยู่ที่ 6.2%

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นรับแสง SiQDs (ต่อ)

อ้างอิง (ปี)	วิธีการสร้างชั้น QDs	ส่วนสาระสำคัญและผลการทดลองที่ได้
Chen (2023)	ผลิตผงซิลิคอนขนาด 20 – 200 nm จากกระบวนการบดซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยวิธี Electrochemical etching มีการผลิตสารละลายเพื่อสร้างฟิล์มบาง SiQDs ด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง ซึ่งสารละลายประกอบด้วย Toluene Octadecene และผงซิลิคอน สารละลายถูกใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์และแผ่นซิลิคอนโซล่าเซลล์	- จากผลของ XRD ผงซิลิคอนที่ผลิตขึ้นมีขนาดผลึกเท่ากับ 82 nm - คุณสมบัติทางแสงบนแผ่นซิลิคอน ค่า R% มีค่าลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของผง SiQDs แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ - เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนและเพอรอฟสไกต์ที่มีฟิล์มบาง SiQDs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากกว่า 0.81 % เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนและเพอรอฟสไกต์ที่ไม่มีชั้นฟิล์มบาง



เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากวัสดุซิลิคอนสามารถหาได้ง่ายและมีต้นทุนที่ถูกที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ทำให้เหมาะสมกับการนำมาผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ผลิตในอุตสาหกรรมมีรูปแบบที่หลากหลาย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Interdigitated back contact (IBC solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองหน้า (Bifacial solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (Crystalline silicon solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร (Heterojunction solar cell: HJT) และ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCON) เป็นต้น ซึ่งจากข้อมูลการให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดที่ถูกผลิตขึ้นในเชิงอุตสาหกรรมในเว็บไซต์ <https://www.nexte.co.th/2024/03/06/panel-2024/> สามารถสรุป 10 อันดับได้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในแต่ละบริษัท ปี ค.ศ. 2024

ลำดับที่	บริษัท	พิกัดกำลัง (W)	เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์	ประสิทธิภาพ (%)
1	SUNPOWER	445	n-type IBC	24.1
2	AIKO	470	n-type IBC	23.8
3	RECOM Technologies	460	n-type TOPCON	23.6
4	AEG	460	n-type IBC	23.6
5	LONGI Solar	455	n-type IBC	23.3
6	HUASAN	450	n-type HJT	23.0
7	CanadianSolar	470	n-type TOPCON	23.6
8	TW SOLAR	455	n-type TOPCON	22.8
9	ASTRONERGY	445	n-type TOPCON	22.8
10	Trinasolar	505	n-type TOPCON	22.7

ซึ่งจากตารางที่ 2.3 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนเริ่มมีการเข้าสู่ขีดจำกัดการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าตามหลักการของทฤษฎี Detailed balanced limit ที่บ่งชี้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีขีดจำกัดการแปลงพลังงานแสงอยู่ที่ 30% ดังนั้นการเพิ่มขีดจำกัดมีความเป็นไปได้จากการลดผลของ Thermalization lost ที่ช่วงความยาวคลื่นแสงสั้นบริเวณ UV และ VIS ได้ ซึ่งฟิล์มบางรับแสง SD ที่สามารถช่วยในเรื่องของการผลิตพาหะอิเล็กตรอนและเพิ่มการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว จึงจะนำฟิล์มบางรับแสง SD เข้ามาประยุกต์บนเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดปัญหาการสูญเสีย

2.4 พิล์มบางเมตริกซ์สำหรับการประยุกต์เป็นชั้นรับแสง

จากการศึกษาการสร้างชั้นรับแสง SiQDs ในตารางที่ 2.2 มีการศึกษาการผลิต คุณสมบัติการขยายการดูดกลืนแสง และการประยุกต์ใช้ชั้น SiQDs ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามส่วนที่เป็นปัจจัยหลักสำหรับการฝังตัวของผลึกซิลิคอนคือเมตริกซ์ โดยเมตริกซ์ที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ควรมีคุณสมบัติทางแสงเช่น ค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ต่ำ มีค่าการทะลุผ่านของแสงที่มาก และมีค่าดัชนีหักเหแสงที่เหมาะสมต่อการจัดเรียงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน

มีนักวิจัยที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน ซึ่ง TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n มีแถบพลังงานช่องว่างอยู่ที่ 3.2 eV สามารถผลิตเป็นฟิล์มบางด้วยวิธี Sputtering (Fernández, Torres, and Gandía, 2022) Ultrasonic spray deposition (Richards, Cotter, Honsberg, and Wenham, 2000) Atomic layer deposition (Boccard, Yang, Weber and Holman, 2016) หรือวิธีโซลเจล (Lien, Wu, Yeh, and Liu, 2006) เป็นต้น ฟิล์มบางมีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ที่ 2.43 ที่ค่าความยาวคลื่น 600 nm มีความโปร่งใส มีคุณสมบัติในการเป็นชั้น Passivation ที่สามารถลดการรวมตัวกันของพาหะที่พื้นผิวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถเป็นชั้น ARC ที่ดี อีกทั้งมีการนำมาใช้เป็นชั้นนำส่งพาหะอิเล็กตรอน (Electron transport layer: ETL) ในเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกัน เมื่อนำมาสร้างเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ สามารถสรุปคุณสมบัติการแปลงพลังงานได้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นรับแสง TiO_2

งานวิจัย	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
Lien (2006)	Al/p/n/ TiO_2 /Al	0.610	24.8	76.6	14.49
Boccard (2016)	Al/ TiO_2 /c-Si/a-Si/ITO/Ag	0.650	30	77.00	18
Zhao (2021)	Ag/Ag-NC/c-Si/ TiO_2 /ITO/Glass	0.530	32.81	81.13	14.16
Fernández (2022)	Al/ TiO_2 /n-doped a-Si:H/ITO/Ag	0.665	-	56.00	-
Kim (2022)	Au/Spiro-OMeTAD/ perovskite/ TiO_2 /ITO/ glass	1.095	20.28	78.61	17.46

ฟิล์มบาง Phospho silicate glass (PSG) เป็นวัสดุอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความน่าสนใจสำหรับการเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน เนื่องจากเดิมแล้ว PSG สามารถถูกสร้างขึ้นจากขั้นตอนกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วย Phosphorus oxychloride (POCl_3) ให้กับแผ่นซิลิคอน ซึ่งมีการเผาที่อุณหภูมิสูง 900 °C จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง PSG ขึ้น (Zhong, Shen, Liu, and Li, 2013) หรือสามารถใช้กระบวนการที่เรียกว่า Spin on dopant (SOD) หมุนเหวี่ยง

สารละลายโซลเจล PSG บนแผ่นซิลิคอน และผ่านการกระบวนการแพร่ด้วยอุณหภูมิ 1000 °C เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มบาง PSG (Mangkornkaew and Fangsuwannarak, 2017) อย่างไรก็ตาม ฟิล์มบาง PSG ที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะถูกล้างออกด้วยกรด Hydrofluoric (HF) เพื่อสร้างชั้น ARC บนเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาแทนที่

ทั้งนี้ในงานวิจัยของ Fangsuwannarak and Khunchana (2013) มีการศึกษาการสลาย PSG ในรูปแบบของฟิล์มบางบนแผ่นควอตซ์ พบว่าฟิล์มบางมีค่าการสะท้อนแสงกลับที่ต่ำน้อยกว่า 10% มีค่าการทะลุผ่านของแสงที่สูงมากกว่า 90% และมีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ที่ 1.7 – 1.8 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยนำผงซิลิคอนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 100 nm ผสมเข้ากับเมตริกซ์ PSG เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงเช่นเดียวกัน โดยพบว่าปริมาณผงซิลิคอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงกลับเพิ่มขึ้นไม่เกิน 30% ค่าการทะลุผ่านของแสงลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 50% และค่าดัชนีหักเหแสงเพิ่มขึ้นเป็น 2.3 – 2.7

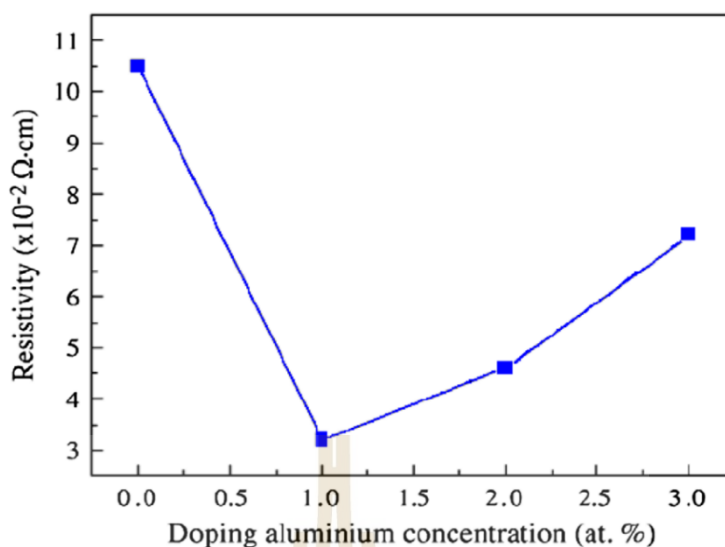
การศึกษาเรื่องของฟิล์มบาง PSG มีการพัฒนาต่อยอด โดยงานวิจัยของ Laohawiroj และคณะ (2022) ทำการศึกษาฟิล์มบาง PSG เพิ่มเติม ซึ่งใช้ผงซิลิคอนที่ผลิตขึ้นเองในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมครอน และนำมาผสมเข้ากับเมตริกซ์ PSG เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลทางแสง ซึ่งการแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อได้รับแสง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Light-induced degradation เนื่องจากจุดผิดพร่องของผงซิลิคอนและเมตริกซ์ PSG แม้ว่าผลทางไฟฟ้าเกิดการลดลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่มีความเป็นไปได้ในการลดการรวมตัวกลับของพาหะอิสระที่พื้นผิวซิลิคอนเนื่องจากสามารถใช้เป็นชั้น Passivation layer ได้ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ทางแสงเช่นค่าการสะท้อนกลับและค่าการทะลุผ่านของแสงที่ได้มีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Fangsuwannarak (2013) ทั้งนี้ค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าไม่เกิน 2 สุดท้ายนี้มีการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพบว่า ฟิล์มบางที่มีผงซิลิคอนในเมตริกซ์ PSG สามารถเกิดการขยายขอบการดูดกลืนแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นถึงแสงช่วง Infrared

นอกจากนี้ยังมีฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) ที่ได้รับความนิยมในการประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optoelectronic devices) เช่นเดี๋ยวกัน เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่มีแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 3.37 eV มีแถบพลังงานช่องว่างรูปแบบ Direct bandgap และมีค่า Exciton binding energy เท่ากับ 60 meV นอกจากนี้ จากโครงสร้างผลึกมีลักษณะการจัดเรียงแบบ Hexagonal wurtzite ซึ่งมีความไม่เสถียรเมื่อได้รับแสงภายนอก ทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ง่าย ฟิล์มบาง ZnO มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 2 สามารถผลิตด้วยการหมุนเหวี่ยงจากสารละลายโซลเจล (Yahia, Znaidi, Kanaev, and Petit, 2008) เทคนิค

สปัตเตอร์ (Damiani, and Mansano, 2012) หรือเทคนิค Spray pyrolysis (Muchuweni, Sathiaraj, and Nyakoty, 2017) เป็นต้น

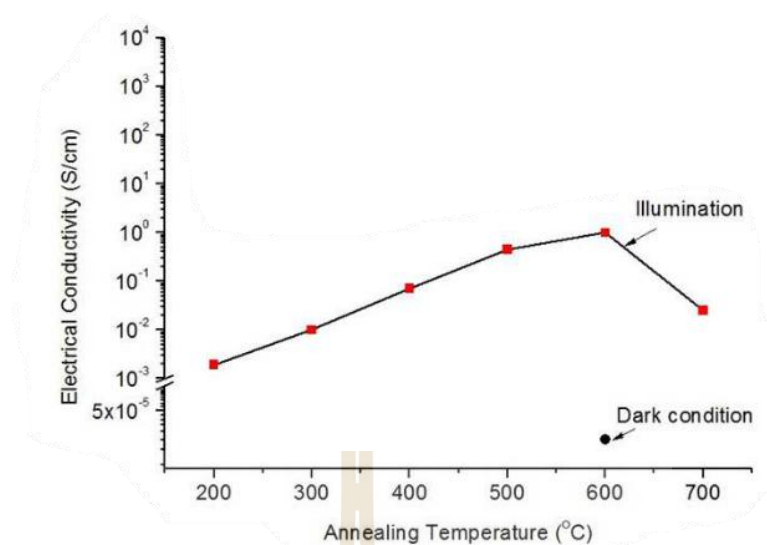
ZnO ยังเป็นวัสดุที่นักวิจัยทดลองการผลิตเป็นชั้นรับแสงชนิดควอนตัมดอทเช่นเดียวกัน จากงานวิจัยของ Castaldo (2014) สังเคราะห์ฟิล์มบาง ZnO ร่วมกับผลึกอนุภาคระดับนาโน Si โดยใช้เทคนิค Sputtering โครงสร้างของชั้นรับแสงคือการสลับชั้นระหว่าง ZnO และ Si ซึ่งได้ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิตั้งแต่ 450 – 560 °C ผลการทดสอบฟิล์มบางด้วยวิธี Photoluminescence ทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานช่องว่างของฟิล์มบาง เนื่องจากผลของการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัม

การปรับปรุงคุณสมบัติของ ZnO สามารถปฏิบัติได้ด้วยการเติมสารเจืออะลูมิเนียม (Aluminum: Al) ซึ่งการเติมสารเจืออะลูมิเนียมสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางแสงได้ เช่น เมื่อมีปริมาณอะตอมของ Al มากขึ้น ส่งผลให้การขยายแถบพลังงานช่องว่างของ ZnO เกิดการเลื่อนในลักษณะ Blue shift เนื่องจากผลึกของ ZnO ที่มีสารเจือของ Al ที่มีปริมาณมาก ส่งผลให้การก่อรูปของผลึก ZnO มีขนาดเล็กกว่าผลึก ZnO ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นจากทฤษฎีการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัม เมื่อขนาดผลึกมีขนาดที่เล็กลง ก่อให้เกิดการขยายแถบพลังงานช่องว่าง (Ahmed, Samim Hassan, Mehedi Hassan, 2018) สำหรับค่าทางไฟฟ้าพบว่า เมื่อ ZnO มีปริมาณสารเจือของ Al เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมีค่าลดลง โดยงานวิจัยของ Balaprakash, Gowrisankar, Sudha, and Rajkumar (2018) แสดงการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity) ของฟิล์มบาง Aluminum doped ZnO (AZO) ที่แสดงในรูปที่ 2.16 ที่มีปริมาณสารเจือ ตั้งแต่ 0 – 3 % atom พบว่าที่ 1% ให้ค่าความต้านต่ำที่สุด อีกทั้งจากงานวิจัยของ Panžić, Capan, Brodar, Bafti, and Mandić (2021) แสดงค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ (Conductivity) ของฟิล์มบาง AZO เทียบกับฟิล์มบาง ZnO พบว่าฟิล์มบาง AZO สามารถเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะได้มากกว่า ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ไอออนของ Al^{3+} ได้เข้ามามีส่วนร่วมกับแลตทิซของ Zn ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพาหะอิเล็กตรอนอิสระ

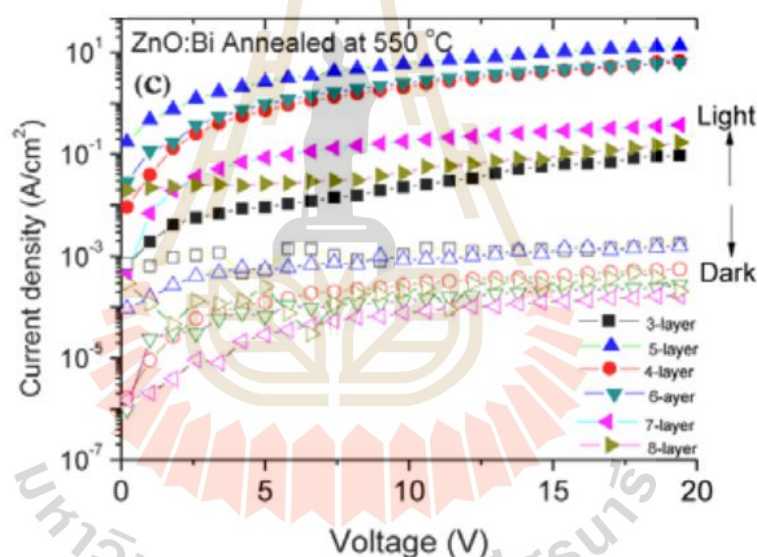


รูปที่ 2.16 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง AZO (อ้างอิง: Balaprakash, et al., 2018)

นอกจากสารเจือชนิด Al ยังพบอีกว่ามีการศึกษาสารเจือชนิดอื่นในซิงค์ออกไซด์คือบิสมัท (Bismuth: Bi) จากการศึกษาวิจัยของ Rattanachan, Krongarrom, and Fangsuwannarak (2013) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วยบิสมัท (Bismuth Doped Zinc: ZnO:Bi) ศึกษาคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ Bi ตั้งแต่ 0 – 6 % atom รวมถึงอุณหภูมิการอบฟิล์มบางตั้งแต่อุณหภูมิ 200 – 700 °C ในการวัดโครงสร้างผลึกพบว่าฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่ถูกเจือด้วย 0.2% atom แสดงลักษณะผลึก ZnO ที่ดีที่สุด และไม่เกิดการแยกเฟสของ Bi_2O_3 ซึ่งเมื่อนำเงื่อนไขนี้มาทดสอบผลทางแสงพบว่า ค่าการทะลุผ่านของฟิล์มบางมีค่าที่มากกว่า 80% ในทุกเงื่อนไขอุณหภูมิการอบ และผลทางไฟฟ้าแสดงค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 600 °C มีค่าสูงที่สุดแสดงในรูปที่ 2.17 นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มบาง ZnO:Bi โดยศึกษาการเพิ่มความหนาของฟิล์มบาง ZnO:Bi ซึ่งใช้เทคนิคการหมุนเหวี่ยงเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์มบางฟิล์มบาง จากการวิจัยของ Rattanawichai, Fangsuwannarak, Phatthanakun, and Rattanachan (2018) แสดงการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่มีความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติทางแสงแสดงการลดลงของค่าการทะลุผ่านเมื่อมีชั้นฟิล์มบางที่หนามากขึ้น อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าถูกปรับปรุง ซึ่งรูปที่ 2.18 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นเมื่อมีจำนวนชั้นฟิล์มบางเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่มีจำนวน 3 ชั้น ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด



รูปที่ 2.17 ความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง ZnO:Bi (อ้างอิง: Rattanachan, et al., 2013)



รูปที่ 2.18 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO:Bi (อ้างอิง: Rattanawichai, et al., 2018)

ฟิล์มบาง ZnO:Bi ยังมีการศึกษาการเรืองการเป็นชั้นรับแสง โดยใช้แนวความคิดของการขยายการดูดกลืนแสงด้วยซิลิคอนควอนตัมดอท จากรายงานการวิจัยของ Fangsuwannarak et al. (2021) นำผงซิลิคอนที่เสื่อมสภาพมาผ่านกระบวนการแปรรูปให้เป็นผงซิลิคอนด้วยกระบวนการบด จากนั้นนำมาผสมลงในสารละลายซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสเมท แล้วนำมาผลิตเป็นฟิล์มบางโดยใช้ชื่อว่าฟิล์มบาง Si dots เงื่อนไขการศึกษาคือน้ำหนักผงซิลิคอนต่อปริมาตรสารละลายซิงค์ออกไซด์เจือบิสเมท ตั้งแต่ 0 – 0.2 g ต่อ 2ml ฟิล์มบางผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบทางแสงของฟิล์มบาง Si dots แสดงให้เห็นค่าการทะลุผ่านของแสงที่สูงมากกว่า 50%

และการสะท้อนแสงกลับที่ต่ำกว่า 20% ทั้งนี้ยังพบอีกว่า แม้ว่าผงซิลิคอนที่ฝังตัวอยู่ในเมตริกซ์ ZnO:Bi มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่าระดับ 4 ไมครอน แต่การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเกิดการขยายขอบการดูดกลืนแสงมายังช่วงแสง Visible อีกทั้งจากผลของทางไฟฟ้ายังแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบางที่ลดลงในสภาวะสว่าง สุดท้ายเมื่อนำฟิล์มบาง Si dots ประยุกต์เป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้ถึง 1.5% เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ไม่มีฟิล์มบาง Si dots

วัสดุนอกจาก TiO₂ PSG ZnO AZO หรือ ZnO:Bi ยังมีวัสดุอื่นๆ ที่มีความน่าสนใจที่จะศึกษาเพื่อการผลิตเป็นฟิล์มบางสำหรับเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น Gallium-doped ZnO (GZO) Tin Oxide (SnO₂) Indium Tin Oxide (ITO) หรือ Cadmium sulphide เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการต่อยอดและพัฒนางานวิจัยของห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มีการผลิตผงซิลิคอนจากแผ่นซิลิคอนเสื่อมสภาพมาผลิตใหม่ด้วยกระบวนการบัดด้วยแรงเหวี่ยงในหม้อบดอะลูมินา ร่วมกับการผลิตสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์ได้ปัสการเจือ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสงและทางไฟฟ้า รวมถึงต่อยอดการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x ร่วมกับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้ปัสการเจือ เพื่อทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่น่าสนใจมาสู่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ในอนาคต



บทที่ 3

กระบวนการผลิตฟิล์มบางรับแสงซึ่งค้อออกไซด์และฟิล์มบางรับแสงคอมโพสิต

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสังเคราะห์และการสร้างฟิล์มบางจากสารละลายเมตริกซ์ซึ่งค้อออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยบิสมัท (Zinc oxide doped bismuth: BiZnO) และสารละลายเมตริกซ์ซึ่งค้อออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยอะลูมิเนียม (Zinc oxide doped aluminum: AZO) อีกทั้งยังมีการผลิตฟิล์มบางจากหมึกซิลิคอนที่มีส่วนผสมของผงซิลิคอนผสมเข้ากับสารละลาย BiZnO หรือ AZO ซึ่งขั้นตอนการผลิตใช้ฟิล์มบางใช้เทคนิคต้นทุนต่ำโดยวิธีเคลือบฟิล์มบางด้วยแรงเหวี่ยง ศึกษาการผลิตฟิล์มบางที่มีจำนวนชั้นเพิ่มมากขึ้น รูปแบบการจัดเรียงฟิล์มบางประกอบด้วยโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น อีกทั้งยังศึกษาการอบฟิล์มบางด้วยวิธีการอบอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal annealing: RTA) เพื่อให้เข้ากับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงเทคนิคการพิจารณา จุลโครงสร้างพื้นผิวของพื้นผิวของฟิล์มบาง เทคนิคการวัดคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง เทคนิคการวัดทางแสง เทคนิคการวัดทางไฟฟ้า เทคนิคการวัดอนุภาคของผงซิลิคอน และเทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มบางรับแสงที่ผลิตขึ้น ซึ่งการวัดด้วยเทคนิคเหล่านี้สามารถบ่งชี้ถึงการพิจารณาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการคัดเลือกเงื่อนไข สำหรับประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบางบนเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 วิธีการสร้างและเทคนิคการวัดฟิล์มบาง

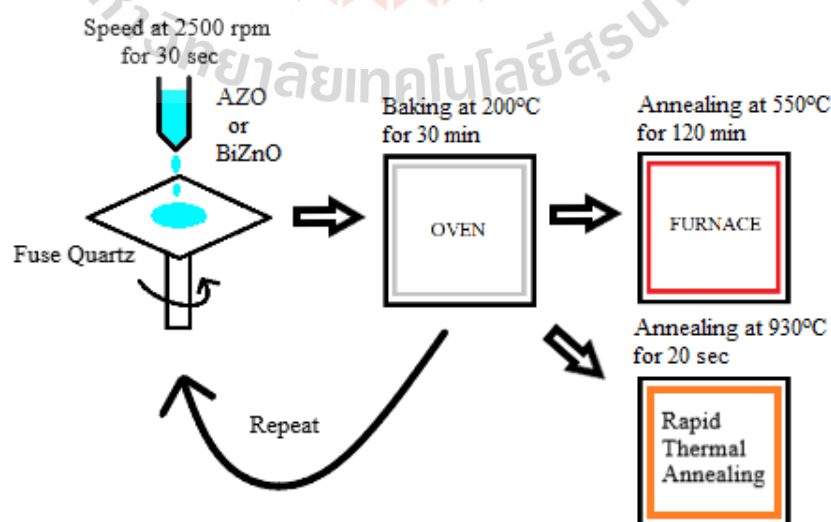
3.2.1 การสร้างฟิล์มบางรับแสงเมตริกซ์ซึ่งค้อออกไซด์

การผลิตฟิล์มบางรับแสงจากสารละลายเมตริกซ์ BiZnO และสารละลายเมตริกซ์ AZO สามารถสร้างขึ้นจากเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating technique) ด้วยเครื่อง Spin coater จากบริษัท Laurell Technologies Corporation รุ่น WS-400B-8NPP/Lite แสดงในรูปที่ 3.1

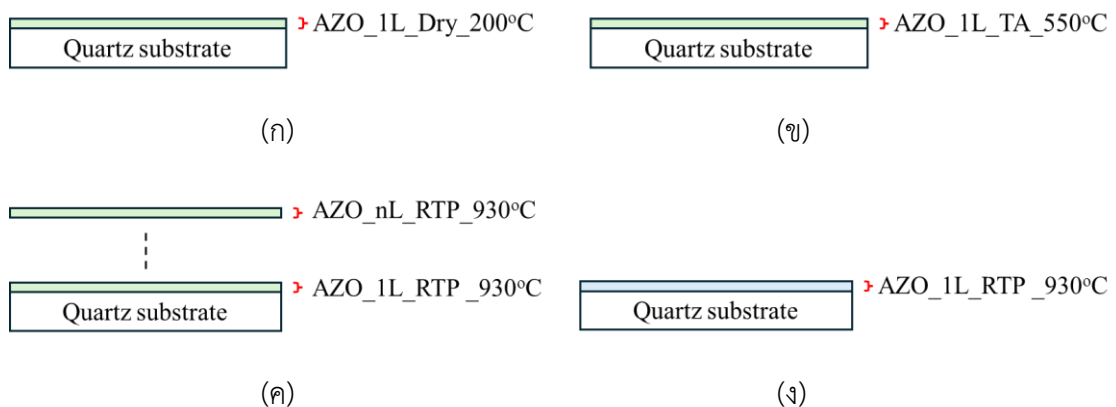


รูปที่ 3.1 เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง

การผลิตใช้แรงเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบที่แบ่งออกเป็น 2 ระดับ หมุนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระดับที่ 1 ใช้ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ด้วยเวลา 15 วินาที และความเร็วระดับที่ 2 ใช้ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที ด้วยเวลา 30 วินาที หลังจากการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง ทำการอบฟิล์มบางให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 200°C นาน 30 นาที (Dry) ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C/1 นาที ซึ่งมีการศึกษาเงื่อนไขการอบที่อุณหภูมิ 550 °C นาน 2 ชั่วโมง (Thermal annealing: TA) และเงื่อนไขการอบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process (RTA) ที่อุณหภูมิ 930 °C นาน 20 วินาที โดยที่เงื่อนไข RTA มีการศึกษาสร้างชั้นฟิล์มจำนวน 1 2 3 4 และ 5 ชั้น (Layer: L) โดยสามารถแสดงขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางรับแสง BiZnO และ AZO ในรูปที่ 3.2 โครงสร้างเงื่อนไขชิ้นงานแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 แผนภาพการผลิตฟิล์มบางรับแสง AZO



รูปที่ 3.3 แผนภาพเงื่อนไขฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบแบบ (ก) อบแห้ง (ข) อบด้วย Thermal annealing และ (ค) อบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process และ (ง) เงื่อนไขฟิล์มบางรับแสง BiZnO ที่ผ่านการอบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process

การอบด้วย RTA ได้ใช้เครื่องที่เรียกว่าเครื่อง Fast Firing แสดงในรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องที่ออกแบบเองภายในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจำลองมาจากเครื่อง Fast Firing จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน้าที่ในการให้ความร้อนแก่สารละลายเงินและสารละลายอะลูมิเนียมให้เกิดการแพร่ลงไปยังซิลิคอนของเซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งที่ได้คือชั้นโลหะเงินและชั้น n^+ กับชั้น p^+ ให้กับได้ชั้นโลหะเงินและชั้นโลหะอะลูมิเนียม ตามลำดับ ภายในเครื่องประกอบด้วย 4 โซน ซึ่งมีการปรับอุณหภูมิและวัตถุประสงคต่อไป

โซนที่ 1 ใช้อุณหภูมิการอบ 300 °C เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์และสารละลายต่างๆ ในกาเงินและกาอะลูมิเนียม อีกทั้งยังเป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมบนพื้นผิวของแผ่นฐาน

โซนที่ 2 ใช้อุณหภูมิการอบ 600 °C เป็นเวลา 10 วินาที ในโซนนี้ที่ชั้นโลหะเงินจะเกิดการหลอมละลายของสารประกอบ Glass frit และทำการแทรกตัวเข้าสู่ชั้น SiN_x ไปถึงชั้น $n-Si$ emitter และสำหรับที่ด้านหลังจะเกิดการหลอมละลายของทั้งโลหะอะลูมิเนียมและซิลิคอนที่บริเวณรอยสัมผัส เกิดเป็นเฟส Liquid Al-Si

โซนที่ 3 ใช้อุณหภูมิการอบที่ 915 °C เป็นเวลา 7 วินาที ในโซนนี้ชั้นโลหะเงินที่ด้านหน้าเกิดการหลอมละลาย และที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่างเงินและ $n-Si$ เกิดการแพร่ลงไปที่ชั้น $n-Si$ emitter และสำหรับชั้นไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่ด้านหลังเกิดการหลอมละลายของอะลูมิเนียมทั้งหมดและแพร่ซึมไปยังชั้น $p-Si$

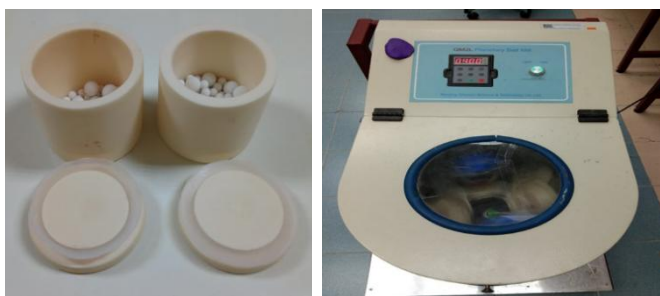
โซนที่ 4 เป็นบริเวณที่ไม่มีการให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงาน เป็นโซนสำหรับการลดอุณหภูมิ โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิจากการแพร่ของโซนที่ 3 เมื่อชิ้นงานเข้าสู่โซนนี้จะทำการพักชิ้นงานเป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งชั่วไฟฟ้าเงินที่ด้านหน้าเกิดการตกผลึก เกิดเป็นบริเวณ n^+-Si ขึ้น และป้องกันไม่ให้เงินทะลุผ่านชั้น $n-Si$ emitter ส่วนชั่วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่ด้านหลังจะเกิดการแข่งตัวระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นบริเวณ p^+-Si ขึ้น

อนึ่งเพื่อให้เกิดการใช้งานร่วมกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้เข้ากับภาคอุตสาหกรรม การศึกษาการฟิล์มบางรับแสง AZO BiZnO และฟิล์มบางซิลิคอนดอท ที่ผ่านกระบวนการอบด้วย RTA จึงมีความจำเป็น เพื่อที่จะสร้างองค์ความรู้ใหม่และเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตต่อไป



รูปที่ 3.4 เครื่อง Fast Firing

ฟิล์มบางรับแสงซิลิคอนดอทที่ผลิตขึ้นยังมีส่วนประกอบที่สำคัญคือผงซิลิคอน ซึ่งผลิตขึ้นจากแผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพ นำมาบดให้เป็นผงด้วยวิธีการบดด้วยลูกบอลแบบ Planetary คือการใช้ลูกบอลกระแทกร่วมกับการเสียดสีผงซิลิคอนให้มีขนาดเล็ก โดยมีหม้อบด ลูกบดและเครื่องบดแบบ Planetary จากบริษัท Nanjing Chishun Science & Technology โมเดล Q2ML แสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ 3.5 (ข) ตามลำดับ

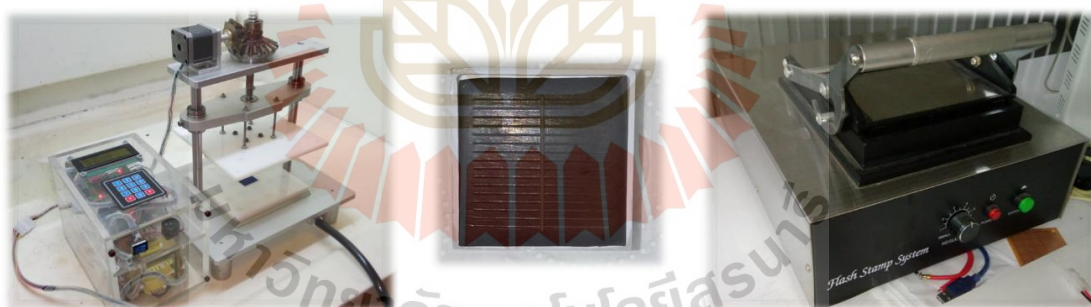


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) หม้อบดและลูกบดที่ใช้ร่วมกับ (ข) เครื่องบดแบบ Planetary

ฟิล์มบางรับแสงที่สร้างขึ้นบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนสามารถเกิดการลดทอนการแพร่ของข้อโลหะเงิน ส่งผลให้ชั้น n^+-Si ที่ถูกสร้างขึ้นนำไฟฟ้าได้ลดลง จึงต้องมีการเปิดช่องฟิล์มบางออก ซึ่งวิธีการเปิดช่องลวดลายได้ใช้เครื่องประทับลายที่สร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) ร่วมกับแผ่นฟลชโฟม (Flash foam) ที่มีลวดลายข้อโลหะด้านรับแสง มีขนาด Busbar และ Finger เท่ากับ $500\ \mu m$ และ $100\ \mu m$ แสดงในรูปที่ 3.6 (ข) โดยลวดลายดังกล่าวสามารถสร้างขึ้นด้วยเครื่อง Flash stamp รุ่น JL-V แสดงในรูปที่ 3.6 (ค)



(ก)

(ข)

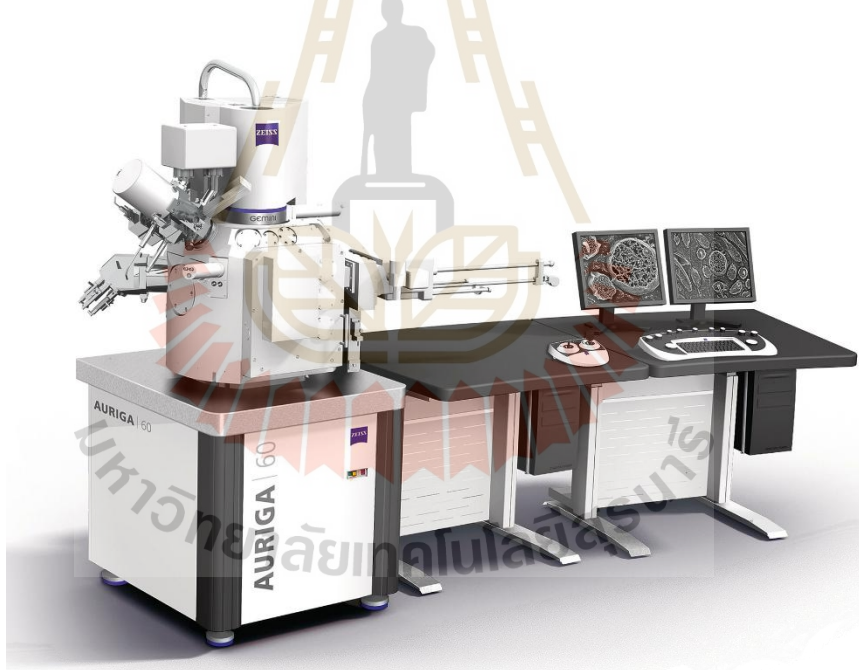
(ค)

รูปที่ 3.6 (ก) เครื่องประทับลาย (ข) แผ่นฟลชโฟม และ (ค) เครื่อง Flash stamp

สำหรับขั้นตอนการเปิดช่องฟิล์มบางรับแสง เริ่มต้นเตรียมกรดไนตริก (Nitric acid: HNO_3) ที่ความเข้มข้น 20% จากนั้นนำแผ่น Flash foam ที่มีลวดลายข้อโลหะด้านรับแสงจุ่มลงในกรดไนตริกเพื่อให้กรดซึมเข้าไปถึงแผ่นโฟม และทำการซับแห้งบริเวณช่องปิดเพื่อไม่ให้เกิดลวดลายที่ไม่ต้องการขณะประทับลวดลาย จากนั้นนำแผ่น Flash foam และแผ่นซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD เข้าสู่เครื่องประทับลวดลาย โดยใช้เวลาในการประทับลวดลาย 90 วินาที ขั้นตอนสุดท้ายนำแผ่นฐานล่างด้วยน้ำ Di เพื่อชำระกรดไนตริกที่หลงเหลืออยู่และทำการเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

3.2.2 การศึกษาจุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบาง

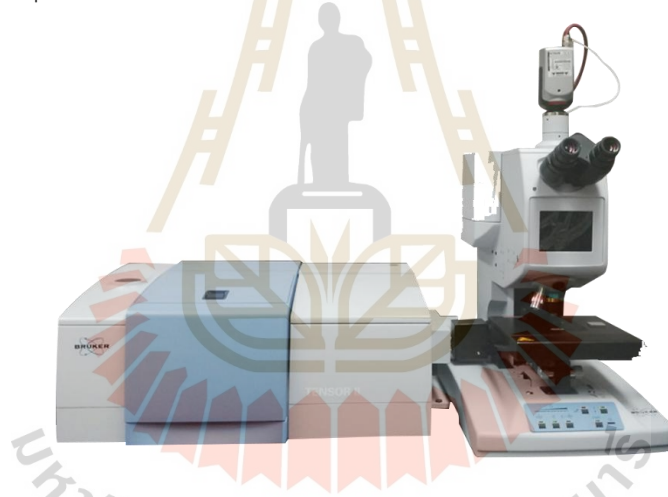
ในการศึกษาจุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบาง ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) รุ่น Auriga บริษัท Carl Zeiss จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงในรูปที่ 3.7 โดยในการถ่ายภาพต้องอยู่ในสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สสามารถขัดขวางลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ที่ฉายลงไปยังวัสดุ เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ฉายลงไป (Primary electron) ชนเข้ากับอิเล็กตรอนของวัสดุ (Secondary electron) จะเกิดการหลุดของอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกจะเกิดการรวบรวมสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณภาพ นอกจากนี้ยังมีรูปแบบของภาพถ่ายที่เรียกว่า Backscattered electron เป็นอิเล็กตรอนของลำอิเล็กตรอนที่ยิงเข้าไปในวัสดุและถูกสะท้อนกลับออกมา จากนั้นเครื่องรับสัญญาณภาพทำการประมวลผลออกมาเป็นภาพ ลักษณะภาพที่ได้จาก Secondary electron มีลักษณะแสดงเฉพาะพื้นผิว แต่ภาพที่ได้จาก Backscattered electron แสดงลักษณะความลึกของภาพได้



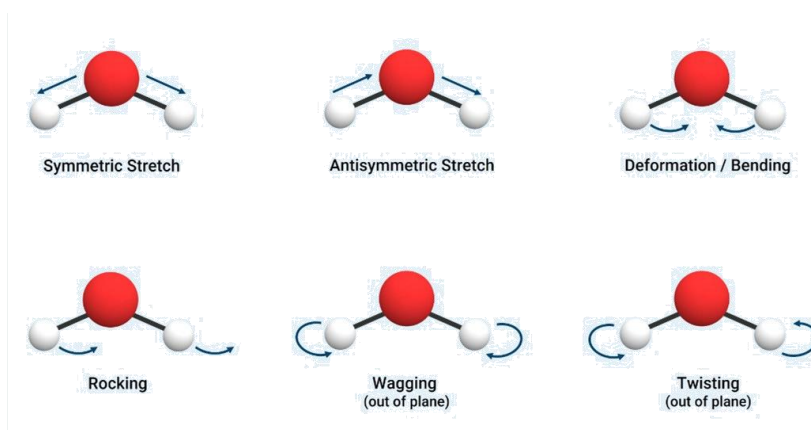
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (อ้างอิง: ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

3.2.3 การศึกษาการเกาะเกี่ยวพันธะของฟิล์มบาง

การศึกษาการเกาะเกี่ยวพันธะของฟิล์มบางสามารถตรวจสอบได้จากการวัดด้วยวิธี Fourier Transform Infrared (FTIR) จากเครื่อง FTIR รุ่น Tension 27 จากบริษัท Bruker มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงในรูปที่ 3.8 การวิเคราะห์เป็นรูปแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งมีหลักการคือการใช้แสงอินฟราเรดที่มีช่วงสเปกตรัมกว้าง มีเลขคลื่นตั้งแต่ $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ฉายลงไปยังชิ้นงาน แสงในบางช่วงความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนจะมีปฏิกิริยาทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งเครื่องจะทำการตรวจสอบวัดแสงที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนจากชิ้นงานผ่านเครื่องมือวัดที่ชื่อว่า Interferometer ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาแปลงจาก Time domain ให้อยู่ในรูปของ Frequency domain ด้วย Fourier Transform ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (Absorption spectrum) และเลขคลื่น (Wavenumber: WN) หรือความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง (Transmittance spectrum) และเลขคลื่น



รูปที่ 3.8 เครื่อง Fourier transform infrared microscope (อ้างอิง: ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)



รูปที่ 3.9 รูปแบบการสั่นสะเทือนของโมเลกุล (อ้างอิง : <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html> ณ วันที่ 17 กันยายน 2567)

3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker แสดงในรูปที่ 3.10 เป็นการวัดรูปแบบไม่ทำลายชิ้นงาน มีหลักการวัดโดยใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ฉายลงไปในวัสดุ ให้ชนเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุจนเกิดการเลี้ยวเบนที่มุมต่างๆ โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีมีการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง หากรังสีเกิดการแทรกสอดแบบเสริม สามารถแสดงค่า Intensity ออกมาในรูปของกราฟที่มุมมองต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ในช่วงมุม $26^{\circ} - 60^{\circ}$ ความละเอียดในการสแกน 0.005° ต่อ 3 วินาที ด้วยรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น $1.5418 \text{ \AA}$



รูปที่ 3.10 เครื่อง X-ray Diffractometer (อ้างอิง: ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ผลการวัด X-ray diffraction (XRD) สามารถหาขนาดเกรนผลึกด้วยสมการ Scherrer แสดงในสมการที่ 3.1

$$d = \frac{k^* \lambda}{B \cos \theta} \quad (3.1)$$

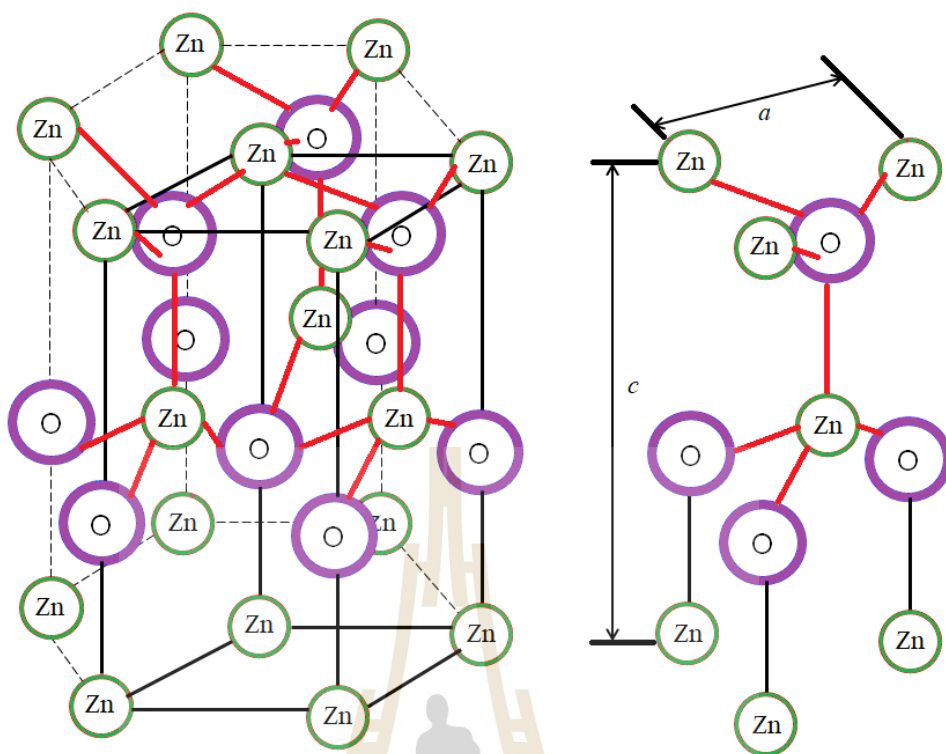
- โดยที่ **d** คือ ขนาดของผลึก [nm]
k* คือ ค่าคงที่ขึ้นกับรูปร่างของผลึกมีค่าเท่ากับ 0.9
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.5418 Å)
B คือ Full width at half maximum (FWHM) [rad]

สามารถหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบของแลตทิซของผลึก $d_{h,k,l}$ ได้จากสมการของ Bragg ตามสมการที่ 3.2 (Kittel C., 2005)

$$d_{h,k,l} = \frac{n^* \lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.2)$$

- โดยที่ **θ** คือ มุมของยอดที่พิจารณาโดย ZnO พิจารณาที่ระนาบ (001) และ (002) และสำหรับ Si พิจารณาที่ระนาบ (111) [องศา]
n* คือ ลำดับการสะท้อน พิจารณามีค่าเท่ากับ 1

เมื่อได้ค่า $d_{h,k,l}$ สามารถพิจารณาคำนวณหาค่า Crystal lattice ได้ อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงโครงสร้างผลึกที่พิจารณาเช่นเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal Wurtzite แสดงในรูปที่ 3.11 การหาค่า Crystal lattice ของผลึกของฟิล์มบางมีรูปแบบความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.11 โครงผลึกแบบ Hexagonal wurtzite ของ ZnO

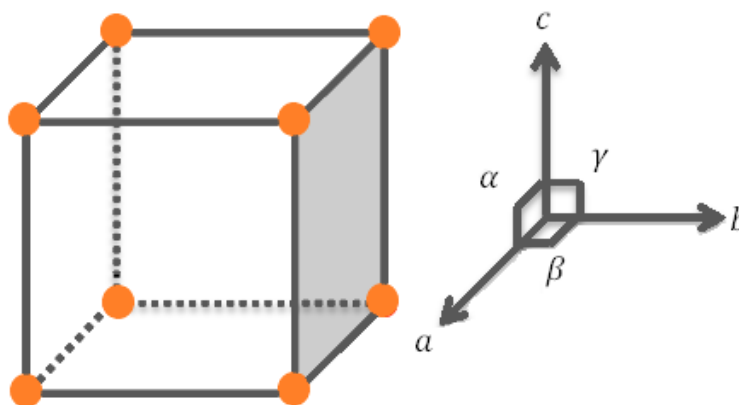
$$d_{h,k,l} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4(h^2+k^2+hk)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2}}} \quad (3.3)$$

โดยที่ a คือ Crystal lattice a ของ ZnO [Å]

c คือ Crystal lattice c ของ ZnO [Å]

h,k,l คือ ตำแหน่งของระนาบที่พิจารณาซึ่ง ZnO พิจารณาระนาบ (0 0 1) และ (0 0 2)

สำหรับซิลิคอนที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Simple cubic และมี Crystal lattice a b และ c เท่ากับ 5.430 Å และมีมุม α β และ γ เท่ากับ 90° (Hubbard, Swanson, and Mauer, 1975) แสดงในรูปที่ 3.12 การหาค่า Crystal lattice สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4



รูปที่ 3.12 โครงผลึกแบบ Simple cubic ของซิลิคอน

$$\frac{1}{d_{h,k,l}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.4)$$

โดยที่ a คือ Crystal lattice a ของซิลิคอน [$\text{\AA}$]

h,k,l คือ ตำแหน่งของระนาบที่พิจารณาโดยซิลิคอนพิจารณาที่ระนาบ (1 1 1)

ลำดับสุดท้ายจากการพิจารณา Crystal lattice ยังสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเครียดตามแนวแกนซีได้จากสมการที่ 3.5

$$\epsilon_{zz} = \frac{c - c_0}{c_0} \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ ϵ_{zz} คือ ความเครียดตามแนวแกนซีของ ZnO และ Si

c_0 คือ ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกซี (c-lattice parameter) ที่ไม่มีความเครียดซึ่งพิจารณาให้ ZnO มีค่า Crystal lattice เท่ากับ $5.207 \text{ \AA}$ (Morkoç, and Özgür, 2009) และสำหรับ Si มีค่า Crystal lattice เท่ากับ $5.430 \text{ \AA}$ (Hubbard et al., 1975)

c คือ ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกซี (c-lattice parameter) จากการคำนวณ

สำหรับ Si สามารถใช้ค่า Crystal lattice a แทนที่โครงผลึกซีได้ เนื่องจากโครงผลึกเป็นแบบ Simple cubic และมี Crystal lattice a b และ c เท่ากับ $5.430 \text{ \AA}$

3.2.5 การวัดความหนาของฟิล์มบาง

ความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO และฟิล์มบางรับแสงซิลิคอนดอท (Silicon dots :SD) สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Optical profiler จากบริษัท Bruker ณ สถาบันวิจัยสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) แสดงในรูปที่ 3.13 เป็นการวัดแบบทำลายชิ้นงานหรือไม่ทำลายชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบาง หากฟิล์มบางมีการสะท้อนแสงกลับที่มากสามารถทำการวัดค่าความหนาได้ทันที ในทางตรงกันข้ามหากฟิล์มบางมีค่าการสะท้อนแสงกลับที่น้อย จำเป็นต้องนำฟิล์มบางมาเคลือบด้วยวัสดุที่มีการสะท้อนแสงที่มาก เช่น ทองคำ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเคลือบทองคำสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Sputtering เคลือบจนกระทั่งสามารถมองเห็นเงาสะท้อนของผู้ปฏิบัติงานได้



รูปที่ 3.13 เครื่อง Optical profiler

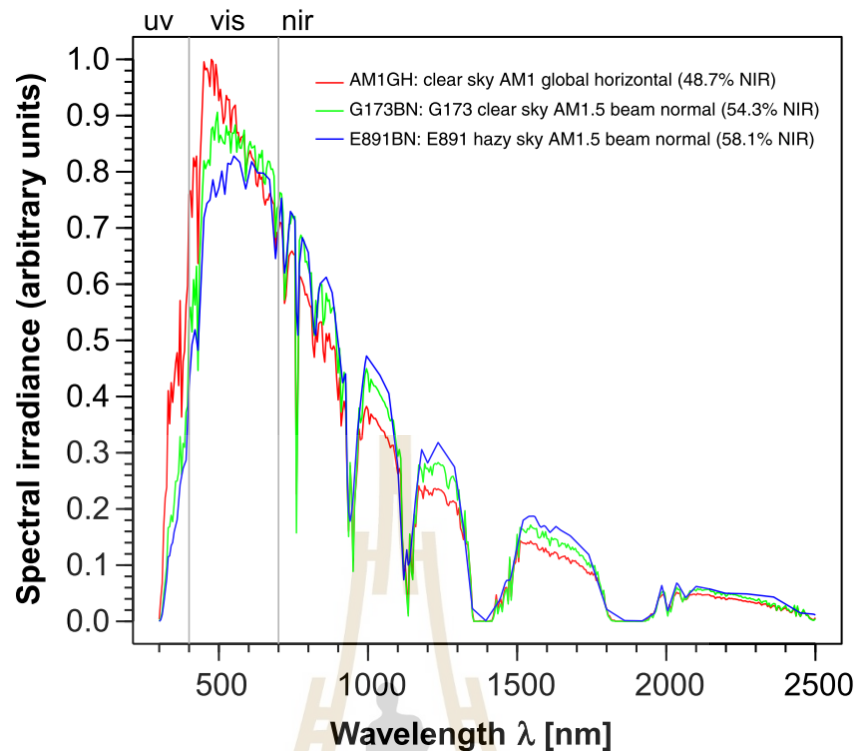
3.2.6 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

การวัดคุณสมบัติทางแสงของบางรับแสงชนิดต่างๆ สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer รุ่น LAMDA 950 จากบริษัท PerkinElmer ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) แสดงในรูปที่ 3.14 ในการวัดได้ใช้รูปแบบ Integrating sphere แบบ Specular include mode ที่สามารถวัดค่าการทะลุผ่านของแสง (%Transmittance: %T) และค่าการสะท้อนแสงกลับ (%Reflectance: %R) ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้วัดที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1500 nm – 200 nm



รูปที่ 3.14 เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer (อ้างอิง: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน))

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองมีการพิจารณาถึงค่า %Weight Reflectance (%WR) เป็นค่าที่ได้จากการนำ %R คูณกับค่า Normalized Irradiance ของ Solar radiation power ในแต่ละค่าความยาวคลื่น แสดงในรูปที่ 3.15 โดยพิจารณาที่ AM 1.5 Clear sky นอกจากนี้ ข้อมูลของ Irradiance ยังสามารถอ้างอิงจากเว็บไซต์ <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html> (สืบค้นในวันที่ 19 สิงหาคม 2567) ซึ่งให้ข้อมูลดิบ และต้องทำการแปลงค่า Irradiance ให้อยู่ในหน่วยของ Arbitrary units ก่อน ซึ่งสามารถทำได้จากการนำค่า Maximum ของกราฟ Irradiance มาหารค่า Irradiance ในแต่ละค่าความยาวคลื่น ตัวอย่างเช่น ต้องการหาค่า %WR ที่ค่าความยาวคลื่น 600 nm ซึ่งมีค่า Irradiance เท่ากับ $1.3278 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ จากนั้นนำมาหารด้วยค่า Maximum ของค่า Irradiance ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.4292 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ (พิจารณาที่ค่า Direct + circumsolar) จะได้ผลลัพธ์ 0.9291 และนำค่าที่ได้นี้มาคูณกับค่า %R ที่ค่าความยาวคลื่น 600 nm เป็นต้น



รูปที่ 3.15 Solar spectral irradiance (อ้างอิง: Levinson, et al., 2010)

และนอกจากนี้ค่า %T และ %R ยังสามารถเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index: n_{ref}) ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสง (Extinction coefficient: k_{Ext}) และค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) ได้เช่นเดียวกัน จากผลการวัดค่า T% และ R% สามารถพิจารณาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient : α) ของฟิล์มบางชนิดต่างๆ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.6 (Pankove, 1997)

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \left(\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right) \quad (3.6)$$

- โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง [cm^{-1}]
 R คือ ร้อยละการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มที่วัดได้
 T คือ ร้อยละการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มที่วัดได้
 t คือ ค่าความหนาของฟิล์มบาง (ไม่รวมแผ่นฐาน) [cm]

นอกจากการพิจารณาขอบการดูดกลืนแสงด้วยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสงยังสามารถพิจารณาการประมาณค่าแถบพลังงานช่องว่าง (Energy bandgap: E_g) ด้วยความสัมพันธ์ของ Tauc's plot ตามสมการที่ 3.7 (Saad, Hannachi, Roisnel, Hlel, 2019)

$$\alpha h\nu = \beta(h\nu - E_g)^{n'} \quad (3.7)$$

โดยที่ $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน [eV]

β คือ ค่าคงที่พิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 1

n' คือ ดัชนีชี้กำลัง มีค่าขึ้นอยู่กับวัสดุที่พิจารณา โดยมีค่าเท่ากับ 2 และ 0.5 เมื่อวัสดุที่พิจารณาเป็นวัสดุชนิด indirect bandgap และ direct band gap ตามลำดับ

การคำนวณค่าดัชนีหักเหของแสงเชิงซ้อน (Complex refractive index, N) ของฟิล์มบางรับแสงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8 ภายในประกอบด้วยพจน์จริงและพจน์จินตภาพของดัชนีหักเหแสง (Refractive index, n_{ref}) และสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง (Extinction coefficient, k_{Ext}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ในสมการที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

$$N = n_{\text{ref}} - ik_{\text{Ext}} \quad (3.8)$$

$$R = \frac{(n_{\text{ref}} - 1)^2 + k_{\text{Ext}}^2}{(n_{\text{ref}} + 1)^2 + k_{\text{Ext}}^2} \quad (3.9)$$

$$k_{\text{Ext}} = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (3.10)$$

ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางรับแสงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 ซึ่งเป็นค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อน (Complex dielectric: ϵ_{com}) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือค่าไดอิเล็กทริกจริง (Real dielectric: ϵ') และค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพ (Imaginary dielectric: ϵ'') ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 3.12 และสมการที่ 3.13 ตามลำดับ

$$\epsilon_{\text{com}} = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (3.11)$$

$$\epsilon' = n_{\text{ref}}^2 - k_{\text{Ext}}^2 \quad (3.12)$$

$$\varepsilon' = 2(n_{\text{ref}}k_{\text{Ext}}) \quad (3.13)$$

ค่าไดอิเล็กทริกจริงคือส่วนที่แสดงความสามารถในการดูดกลืนรังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างของฟิล์มบาง ขณะที่ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพคือความสามารถในการลดทอนการดูดกลืนคลื่นหรือรังสีแปรเปลี่ยนเป็นความร้อนของวัสดุ (Omran, Fabritius, Heikkinen, Chen, 2017) นอกจากนี้ยังมีคำอธิบายอื่นของค่าไดอิเล็กทริกที่กล่าวว่า ค่าไดอิเล็กทริกคือค่าที่ระบุความสามารถในการกักเก็บประจุของวัสดุ โดยเมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกวางไว้ระหว่างแผ่นตัวนำหรืออิเล็กโทรดที่มีการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับภายนอกที่ขั้วของอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการก่อรูปและการจัดเรียง Dipole ของอะตอม ซึ่งกระบวนการจัดเรียง Dipole ถูกเรียกว่า Polarization โดยกระบวนการภายในเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าของ Dipole ที่มีทิศทางสวนทางกับสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาภายนอก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการกักเก็บประจุไฟฟ้า (Kaur, Bharti, Sharma, and Madhu, 2021)

ค่าไดอิเล็กทริกสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นแสงและค่าความถี่ โดยสามารถแปลงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.14

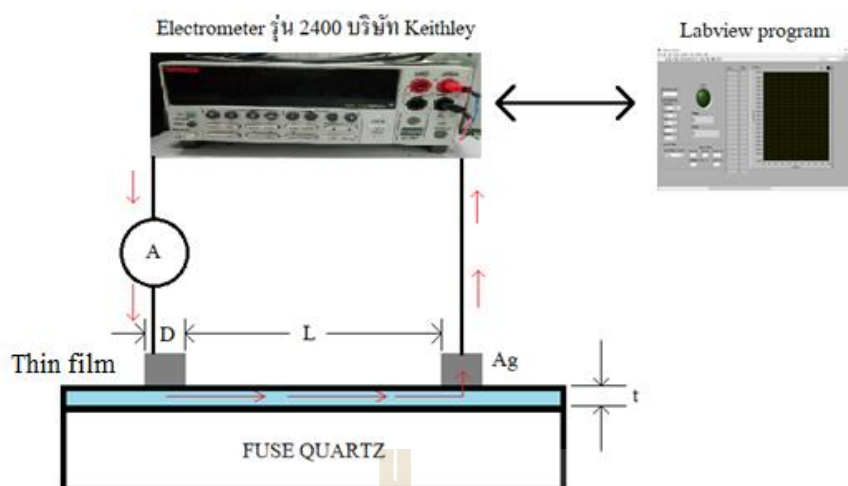
$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3.14)$$

โดยที่ ν คือ ความถี่ [Hz]

c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 2.997×10^8 m/s

3.2.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

วิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรับแสงด้วย 2-probe measurement เป็นการหาค่าความต้านทานจำเพาะของฟิล์มบาง โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วโลหะบนฟิล์มบาง แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้า จากนั้นนำมาคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของฟิล์มบาง วิธีการวัดสามารถแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง Electrometer ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 และอ่านผลการวัดผ่านโปรแกรม LABVIEW



รูปที่ 3.16 แผนผังการวัดด้วยวิธี 2-probe measurement ของฟิล์มบางรับแสง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอยู่ 2 สภาวะ คือสภาวะภายใต้แสงสว่างที่มีค่าพลังงานเท่ากับ 1.77 mW/cm^2 และสภาวะมืด โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าบนขั้วโลหะที่เป็นโลหะเงินตั้งแต่ -10V ถึง 10V จากนั้นทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและนำข้อมูลออกมาด้วยโปรแกรม LABVIEW จากนั้นค่าที่ได้สามารถแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV-Curve) และแปรเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density: J) ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 3.15 เพื่อพิจารณาการเปรียบเทียบระหว่างผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาของชั้นฟิล์มต่อไป

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.15)$$

โดยที่ J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า [mA/cm^2]

I คือ กระแสไฟฟ้า [A]

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R_{resist}) และค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ (Conductivity, σ) จากสมการความต้านทานจำเพาะ (Resistivity, ρ) ตามความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ

$$R_{\text{resist}} = \frac{1}{\text{slope}} \quad (3.16)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R_{\text{resist}} \times A} \quad (3.17)$$

โดยที่ R_{resist} คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง [Ω]

slope คือ ความชันของกราฟ [A / V]

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของฟิล์มบาง [Ωcm]

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วโลหะ (D) คูณกับความหนาของฟิล์มบาง (t) [cm^2]

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ [cm]

3.2.8 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD ทำการวัดผลทางไฟฟ้าด้วยเครื่องจำลองแสงเทียม Solar simulator รุ่น #SS100AAA จากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงในรูปที่ 3.17 (ก) การปรับระยะความสูงได้ใช้แท่นปรับระดับให้ได้ค่าความเข้มแสงที่ 126,600 lux โดยสามารถวัดได้จาก Lux meter แสดงในรูปที่ 3.17 (ข) การวัดพิจารณาปิดแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหลือช่องเปิดเป็นพื้นที่ขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 (ก) เครื่องจำลองแสงเทียม Solar simulation และ (ข) การวัดระดับความเข้มแสงจากแสงเทียมด้วยเครื่อง Lux meter

3.2.9 วัดขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์

เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดอนุภาคคือเครื่อง Particle Size Analysis รุ่น LA – 905 บริษัท Horiba แสดงในรูปที่ 3.18 ในการวัดตัวอย่างจำเป็นต้องทราบถึงข้อมูลค่าดัชนีหักเหแสงของของเหลวที่เป็นตัวกลางและตัวอย่างชิ้นงานที่กำลังศึกษา (ในกรณีของงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ พิจารณาค่าดัชนีของของเหลวและอนุภาคคือ เอทานอลและซิลิคอน มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.36 และ 3.42 ตามลำดับ) การวัดอนุภาคจะใช้แสงเลเซอร์ฉายลงไปในตัวอย่งชิ้นงานที่กระจายตัวอยู่ในสารละลาย แสงจะเกิดการหักเหเมื่อชนกับอนุภาคและกระเจิงออกมาในมุมต่างๆ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่แสดงการเกิดมุมการกระเจิงที่เล็ก ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะแสดงการเกิดมุมการกระเจิงที่กว้าง ซึ่งตัวเครื่องรับสัญญาณจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและประมวลผลออกมา ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค (q) เทียบกับขนาดของผงซิลิคอนในหน่วยไมครอน



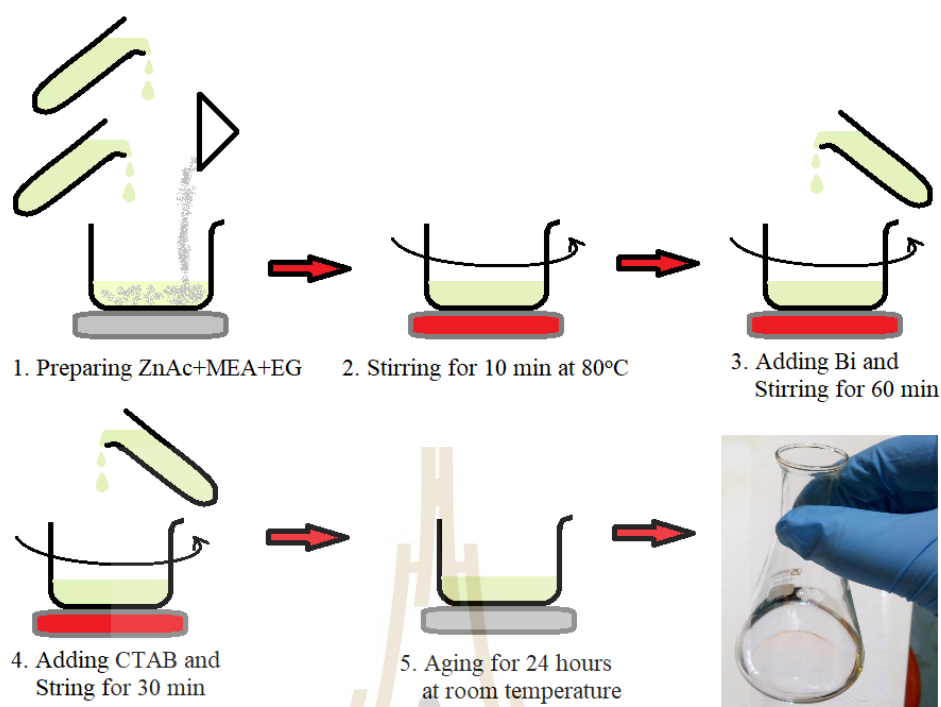
รูปที่ 3.18 เครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (อ้างอิง: ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

3.3 การสังเคราะห์สารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์

3.3.1 การเตรียมสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสมัท

สารละลายเมตริกซ์ BiZnO เป็นสารละลายที่สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการโซล-เจล (Sol-gel) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สารละลายที่เป็นของเหลว (Sol) กลายเป็นเฟสของแข็ง (Gel) ส่วนผสมของสารละลาย BiZnO ประกอบด้วย ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ZnAc , $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.5%) เป็นสารตั้งต้นของซิงค์ ออกไซด์ เอทิลีนไกลคอล (EG, $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$, 99.5%) มีหน้าที่ช่วยในการทำละลาย โมโนเอทานอลามีน (MEA, $\text{NH}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$, 99%) มีหน้าที่ให้สารละลายเกิดความเสถียร บิสมัทไนเตรตเพนตะไฮเดรต (Bi, $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 98%) ใช้เป็นสารเจืออะตอมของบิสมัท เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบไมด์ (CTAB, $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$, 96%) เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีหน้าที่ให้ฟิล์มบางเกิดการกระจายตัวที่ดี ลดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง

ในกระบวนการสังเคราะห์สารละลาย BiZnO อ้างอิงจากงานวิจัยของ Fangsuwannarak et al. (2021) ขั้นตอนแรกทำการละลายสาร MEA Bi และ CTAB ด้วย EG ก่อนเนื่องจากทำให้สารดังกล่าวเป็นของเหลวเพื่อให้สะดวกต่อการสังเคราะห์สารละลาย ZnO:Bi จากนั้นนำ ZnAc ผสมเข้ากับสารละลาย MEA ที่ผสมอยู่กับ EG ให้มีความเข้มข้น 0.7 M โดยที่สัดส่วนของ ZnAc : MEA เท่ากับ 1 : 1 กวนสารละลายที่ 80° เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติม Bi เพื่อให้จำนวนร้อยละอะตอมของ Bi ในสารละลายเท่ากับ 0.2at% แล้วกวนสารละลายอีก 60 นาที ทำการเติม CTAB ให้มีร้อยละโดยน้ำหนักของ CTAB (weight percent, wt%) ในสารละลายเท่ากับ 0.3 wt% แล้วกวนสารละลายอีก 30 นาที หลังจากนั้นทำการบ่มสารละลายที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง สารละลายโซล-เจลที่ได้จะไม่มีสี โดยสารละลายเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่สังเคราะห์ได้สามารถแสดงขั้นตอนการผลิตในรูปแบบที่ 3.19 และปริมาณที่เตรียมแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.19 แผนภาพการเตรียมสารละลายเมตริกซ์ BiZnO

ตารางที่ 3.1 ปริมาณการเตรียมสารละลายเมตริกซ์ BiZnO

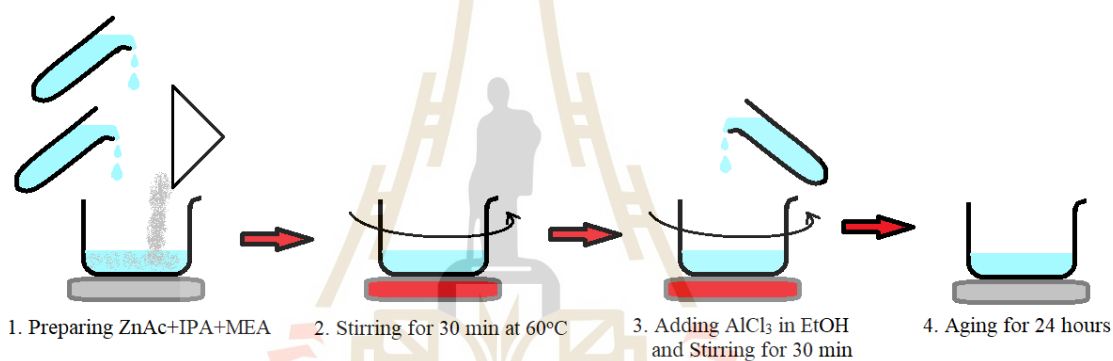
	ปริมาณของสารละลาย			
	ZnAc	EG + MEA	EG + Bi	EG + CTAB
สารละลายที่เตรียมไว้สำหรับสารละลายโซล-เจล ZnO:Bi	-	เตรียม MEA ปริมาตร 4.234 ml แล้วเติม EG ให้ได้ 100 ml	เตรียม Bi น้ำหนัก 0.619 g แล้วเติม EG ให้ได้ 10 ml	เตรียม CTAB น้ำหนัก 0.38 g แล้วเติม EG ให้ได้ 10 ml
ปริมาณการสังเคราะห์พิจารณาที่ 25 ml	3.86 g	20 ml	0.28 ml	2.06 ml

3.3.2 การเตรียมสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม

สารละลายเมตริกซ์ AZO เป็นสารละลายที่สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการโซล-เจลเช่นเดียวกับสารละลายเมตริกซ์ BiZnO ส่วนผสมของสารละลาย AZO ประกอบด้วย ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต (ZnAc , $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.5%) เป็นสารตั้งต้นของซิงค์ออกไซด์ ไอโซโพรพานอล (IPA, $\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$, 99.5%) มีหน้าที่ช่วยในการทำละลาย โมโนเอทานอลเอมีน (MEA,

$\text{NH}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$, 99%) มีหน้าที่ให้สารละลายเกิดความเสถียร อะลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (AlCl_3 , $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 98%) ใช้เป็นสารเจืออะตอมอะลูมิเนียม เอทานอล (EtOH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 99%) ใช้เป็นตัวทำละลายของสาร AlCl_3

กระบวนการสังเคราะห์สารละลาย AZO เริ่มต้นละลายสาร ZnAc ด้วย IPA เพื่อให้ได้ 0.2 M จากนั้นเติม MEA ให้ได้สัดส่วนของ MEA : ZnAc มีค่าเป็น 0.75 : 1 จากนั้นกวนด้วยอุณหภูมิ 60 °C ด้วยเวลา 30 นาที จากนั้นหยดสาร AlCl_3 ที่ถูกละลายด้วย EtOH เพื่อให้สารละลาย ZnAc มีค่าอะตอมเปอร์เซ็นต์ของอะลูมิเนียมเท่ากับ 1 at% จากนั้นทำการกวนสารละลายต่อเนื่องด้วยเวลา 30 นาที และบ่มสารละลายที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง สารละลายโซล-เจลที่สังเคราะห์ได้ลักษณะไม่มีสี สามารถแสดงขั้นตอนการผลิตในรูปที่ 3.20 และสารละลายที่เตรียมได้แสดงปริมาณในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.20 แผนภาพการเตรียมสารละลายเมตริกซ์ AZO

ตารางที่ 3.2 ปริมาณการเตรียมสารละลายโซล-เจล AZO

	ZnAc	IPA	MEA	ปริมาณของสารละลาย
				$\text{AlCl}_3 + \text{EtOH}$
สารละลายที่เตรียมไว้สำหรับสารละลายโซล-เจล ZnO:Al	-	-	-	ละลาย AlCl_3 0.317 g ใน EtOH 10 ml และกวนด้วยอุณหภูมิ 60 °C ด้วยเวลา 60 นาที หรือจนกว่าจะละลายเข้ากันดี
ปริมาณการสังเคราะห์พิจารณาที่ 25 ml	1.103 g	23.70 ml	0.22 ml	0.404 ml

3.4 การสร้างฟิล์มบางซิลิคอนดอท

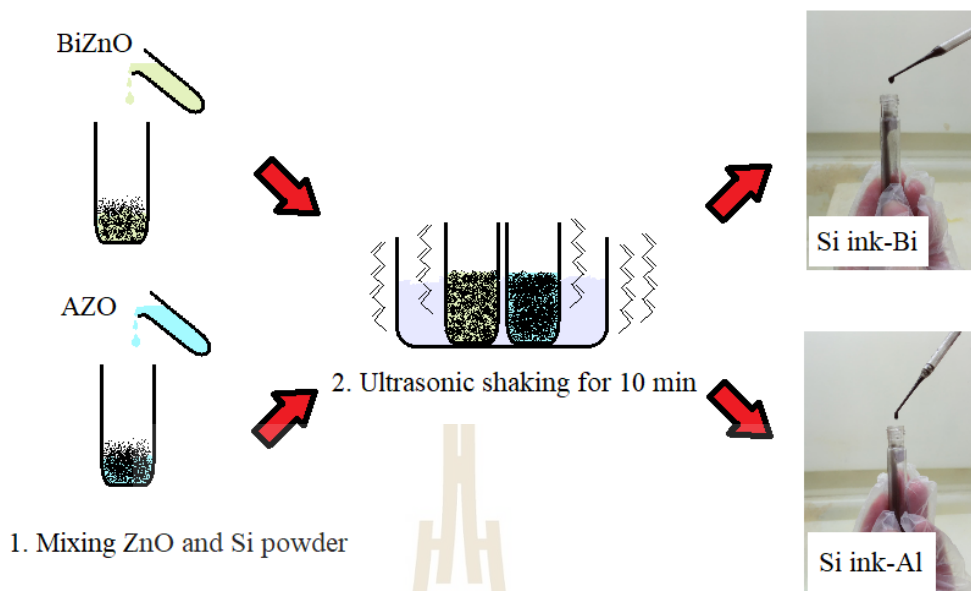
3.4.1 การเตรียมหมึกซิลิคอนคอมโพสิต

การเตรียมหมึกซิลิคอนคอมโพสิต (Si ink) มีองค์ประกอบสำคัญคือผงซิลิคอน เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำแผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพกลับมาใช้ใหม่ในรูปของผงซิลิคอน โดยนำผงซิลิคอนมากระจายตัวในสารละลายเมตริกซ์ BiZnO และ AZO และนำมาผลิตเป็นหมึกซิลิคอนคอมโพสิตจากสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมีท์ (Si ink-Bi) และอะลูมิเนียม (Si ink-Al)

กระบวนการแปรสภาพแผ่นซิลิคอนเสื่อมสภาพให้กลายเป็นผงซิลิคอน เริ่มต้นจากการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และไอออนของโลหะบนพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน ลำดับถัดมานำแผ่นซิลิคอนเข้าสู่กระบวนการบดหยาบ (Course-grinding) โดยใช้โกร่งบดสาร (Mortar) ร่วมกับลูกโกร่ง (Pestle) จากนั้นนำผงซิลิคอนที่ถูกบดหยาบเข้าสู่กระบวนการบดละเอียด (Fine grinding) ด้วยวิธีการบดด้วยลูกบอลแบบ Planetary

การศึกษการบดละเอียดด้วยลูกบอลเป็นรูปแบบการบดแบบเปียก ภายในหม้อบด กำหนดน้ำหนักของผงซิลิคอนจากการบดหยาบ 10 กรัม น้ำ 9 ml เอทานอล 1 ml และลูกบด 10 ลูก โดยพิจารณาการใช้ลูกบด 2 ขนาด คือลูกบดขนาดเล็ก (Small: S) และขนาดใหญ่ (Large: L) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm และ 10 mm ตามลำดับ ด้วยเวลา 12 24 36 และ 48 ชั่วโมง การตั้งค่าเครื่องบด Planetary กำหนดความเร็วการบดเป็น 400 รอบต่อนาที โดยทุกๆ 5 นาที สลับการหมุนในทิศทางตรงกันข้าม เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิคอนภายในหม้อบด และเพิ่มพลังงานการกระทบของลูกบดให้กับผงซิลิคอน ส่งผลให้ผงซิลิคอนมีขนาดเล็กลงรวดเร็วมากกว่าแบบหมุนในทิศทางเดียว (Mio, Kano, Saito, and Kaneko, 2002) จากนั้นผงซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการบดแบบเปียกเข้าสู่กระบวนการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 100 °C ด้วยเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการร่อนผงซิลิคอนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh ซึ่งมีขนาดตาข่าย 45 ไมครอน

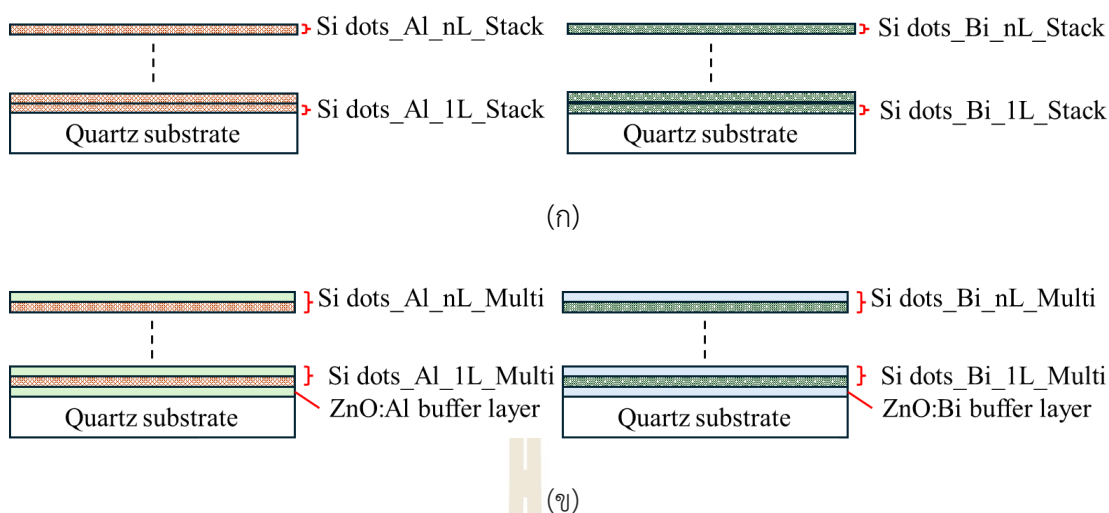
จากนั้นนำผงซิลิคอนที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดมาผลิตเป็นหมึกซิลิคอนคอมโพสิต เริ่มต้นนำสารละลายเมตริกซ์ BiZnO และ AZO ปริมาตร 2 ml มาผสมเข้ากับผงซิลิคอนน้ำหนัก 0.03 g จากนั้นผสมให้เข้ากัน โดยให้ผงซิลิคอนกระจายตัวในเมตริกซ์ BiZnO และ AZO อย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ในท้ายที่สุดจะได้สารละลายเรียกว่าหมึก Si ink-Bi และหมึก Si ink-Al ตามลำดับ สามารถแสดงขั้นตอนการผลิตในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แผนภาพการเตรียมหมึก Si ink-Bi และ Si ink-Al

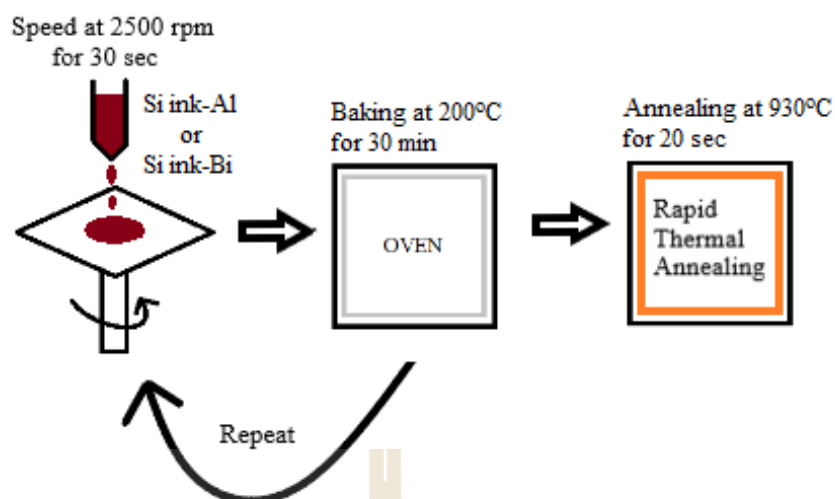
3.4.2 การสร้างฟิล์มบางซิลิคอนดอทคอมโพสิต

จากรูปแบบการสร้างฟิล์มบาง AZO ที่มีจำนวนตั้งแต่ 1 – 5 ชั้น เมื่อนำมาออกแบบโครงสร้างของฟิล์มรับแสงบางคอมโพสิตหรือเรียกว่าฟิล์มบางซิลิคอนดอท (Si dots: SD) สามารถจำแนกออกเป็น 2 โครงสร้างได้แก่ 1. รูปแบบโครงสร้างการซ้อนทับของชั้นฟิล์มบาง SD เป็นโครงสร้างที่เกิดการซ้อนทับกันของฟิล์มบาง SD ทับถมกันจนเกิดเป็นฟิล์มบางที่มีความหนาเพิ่มขึ้น และ 2. รูปแบบโครงสร้างการสลับชั้นระหว่างฟิล์มบาง ZnO และฟิล์มบาง SD เป็นรูปแบบโครงสร้างที่จำลองการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบโครงสร้าง Tandem cell สามารถแสดงภาพจำลองทั้ง 2 โครงสร้างได้ในรูปที่ 3.22

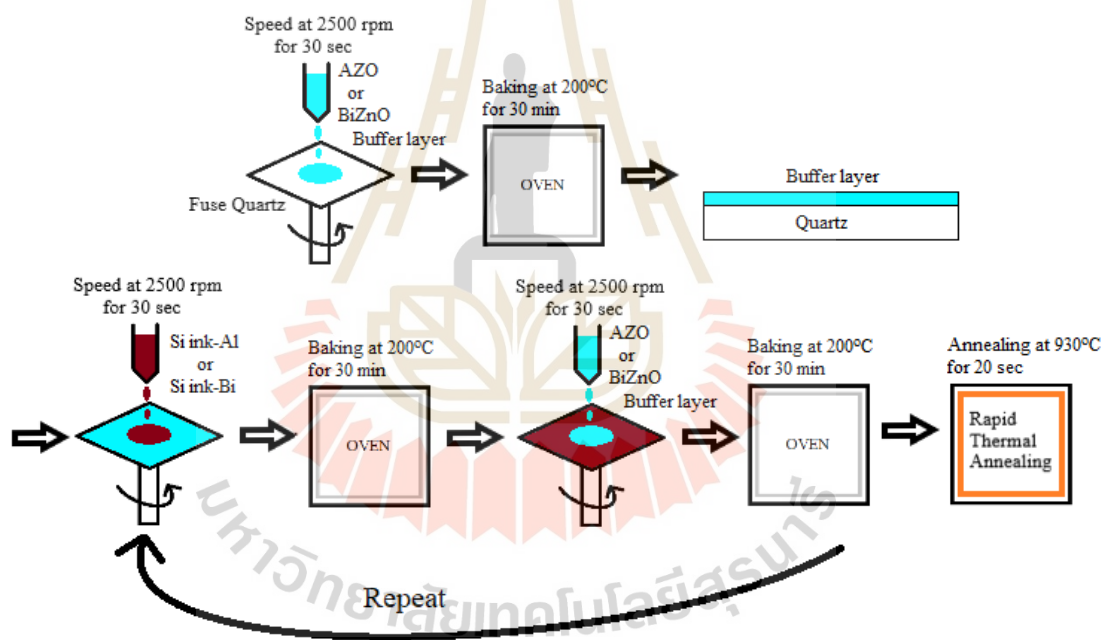


รูปที่ 3.22 फिल्मบางรับแสง SD (ก) โครงสร้างซ้อนทับ และ (ข) โครงสร้างสลับชั้น

กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับมีขั้นตอนคล้ายกับการสร้างฟิล์มบาง ZnO แต่แตกต่างกันที่โครงสร้างซ้อนทับมีการใช้หมึก Si ink-Al หรือหมึก Si ink-Bi และจะศึกษาฟิล์มบางด้วยเงื่อนไขการอบแบบ RTA เท่านั้น โดยสามารถแสดงขั้นตอนการผลิตได้ในรูปที่ 3.23 และสำหรับโครงสร้างสลับชั้นจะใช้สารละลายเมตริกซ์ AZO หรือ BiZnO ร่วมกับหมึก Si ink-Al หรือหมึก Si ink-Bi ในการสร้างฟิล์มบาง เริ่มต้นทำการสร้างชั้น Buffer ด้วยการหมุนเหวี่ยงสารละลายเมตริกซ์ AZO หรือ BiZnO บนแผ่นควอตซ์ก่อน จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C จากนั้นสร้างชั้น SD ด้วยหมึก Si ink-Al หรือ Si ink-Bi ด้วยการหมุนเหวี่ยงบนแผ่นควอตซ์ที่มีชั้น Buffer และอบด้วยอุณหภูมิ 200 °C ลำดับถัดมาทำการหมุนเหวี่ยงสารละลายเมตริกซ์ AZO หรือ BiZnO และอบด้วยอุณหภูมิ 200 °C เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้ฟิล์มบาง SD จำนวน 1 Stack หากต้องการสร้างจำนวนชั้น Stack ที่มากขึ้น สามารถเริ่มขั้นตอนการหมุนเหวี่ยงหมึก Si ink-Al หรือ Si ink-Bi อีกครั้ง ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการผลิตได้ในรูปที่ 3.24 โครงสร้างสลับชั้นสามารถเขียนกำหนดเงื่อนไขขึ้นงานด้วยสัญลักษณ์ AZO/SD/AZO และ BiZnO/SD/BiZnO สำหรับสารละลายเมตริกซ์ AZO และ BiZnO ตามลำดับ นอกจากนี้เงื่อนไขการอบฟิล์มบาง SD จะใช้รูปแบบ RTP เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับ



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางรับแสงซิงค์ออกไซด์ และฟิล์มบางรับแสงซิลิคอนดอท

4.1 บทนำ

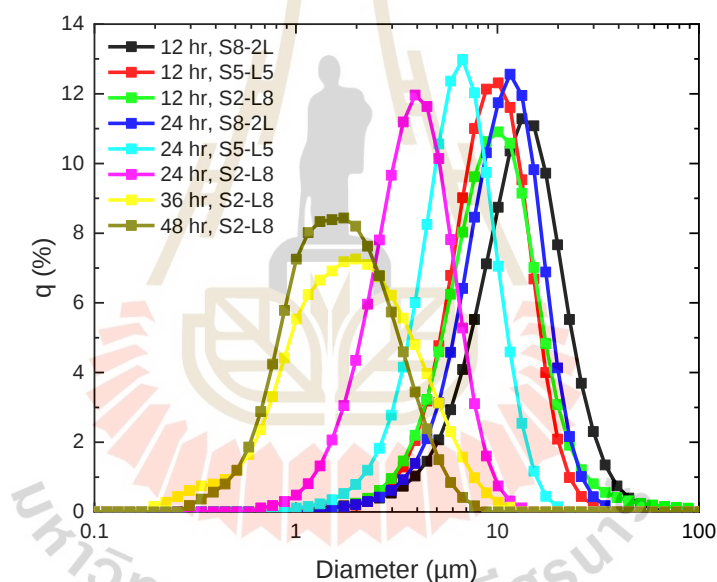
ในบทนี้ได้วิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของผงซิลิคอนที่ผลิตด้วยเทคนิค Planetary และวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติของฟิล์มบางรับแสง BiZnO ฟิล์มบางรับแสง AZO และฟิล์มบาง SD โครงสร้างชั้นทับและสลับชั้นที่ผลิตจากเทคนิคการหมุนเหวี่ยงและการอบด้วยอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งมีการวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบางพิจารณาถึงรอยแตกและความเป็นระเบียบบนพื้นผิว มีการวิเคราะห์จากการเกาะเกี่ยวพันธะของซิงค์ออกไซด์ วิเคราะห์เชิงโครงสร้างของฟิล์มบางที่ผลิตขึ้น พิจารณาถึงผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่ส่งผลการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ทางแสงเช่น การสะท้อนแสงกลับ การทะลุผ่านของแสง การดูดกลืนแสง การหักเหของแสง การสูญเสียทางแสงและค่าไดอิเล็กตริก และวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน อีกทั้งยังพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบาง ซึ่งจากผลต่างๆ ที่ถูกวัดเป็นตัวชี้วัดผลลัพธ์ในการคัดเลือกสร้างเป็นฟิล์มบางบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนต่อไป

4.2 การวิเคราะห์อนุภาคผงซิลิคอน

ผลการทดสอบการวัดขนาดอนุภาคผงซิลิคอนสามารถแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค (q) เทียบกับขนาดของผงซิลิคอนในหน่วยไมครอน และจากตารางที่ 4.1 ซึ่งให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคซิลิคอนที่สามารถเล็กลงได้ด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือการกำหนดสัดส่วนของลูกบดซึ่งจากการทดลองใช้สัดส่วนลูกบดขนาด $S : L$ คือ $8 : 2$, $5 : 5$ และ $2 : 8$ ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่สัดส่วน $2 : 8$ จะทำให้ขนาดผงซิลิคอนมีขนาดเล็กที่สุด และปัจจัยที่ 2 คือเวลาในการบด ในการทดลองได้ใช้เวลาในการบด 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง โดยพบว่าที่ 48 ชั่วโมง สามารถลดขนาดผงซิลิคอนได้เล็กที่สุด ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 1.513 ไมครอน อีกทั้งเมื่อพิจารณาที่ D10 และ D90 ซึ่งระบุที่ตำแหน่ง 10% และ 90% ของรูปกราฟ พบว่าสามารถพบเจออนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.716 ไมครอน และสามารถพบเจอขนาดอนุภาคที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4.314 ไมครอน ตามลำดับ ผลที่ได้จาก

การบดผงซิลิคอนพบว่าค่า %Yield สุดท้ายมีค่ามากกว่า 75% หากไม่เกิดอุบัติเหตุขณะทำการทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับผลการเตรียมผงซิลิคอนจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Laohawiroj, Mangkornkaew, Maneedaeng, and Fangsuwannarak (2018) ที่ได้ใช้กระบวนการบดแบบเปียก ด้วยลูกบดอะลูมินาจำนวน 96 ชั่วโมง ซึ่งได้ผงซิลิคอนอนุภาคเฉลี่ยขนาด 4 ไมครอน พบว่าการเตรียมผงซิลิคอนแบบ Planetary สามารถประหยัดเวลาและได้ผงซิลิคอนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่น้อยกว่าเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้รูปร่างของผงซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการการบดด้วยวิธี Planetary สามารถแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) ซึ่งเป็นภาพถ่ายจากเครื่อง Field emission scanning electron microscope (FESEM) ของเงื่อนไขการบดที่เวลา 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าผงซิลิคอนมีลักษณะรูปร่างไม่เป็นทรงเรขาคณิต และมีขนาดที่เล็กกว่า 4 ไมครอน

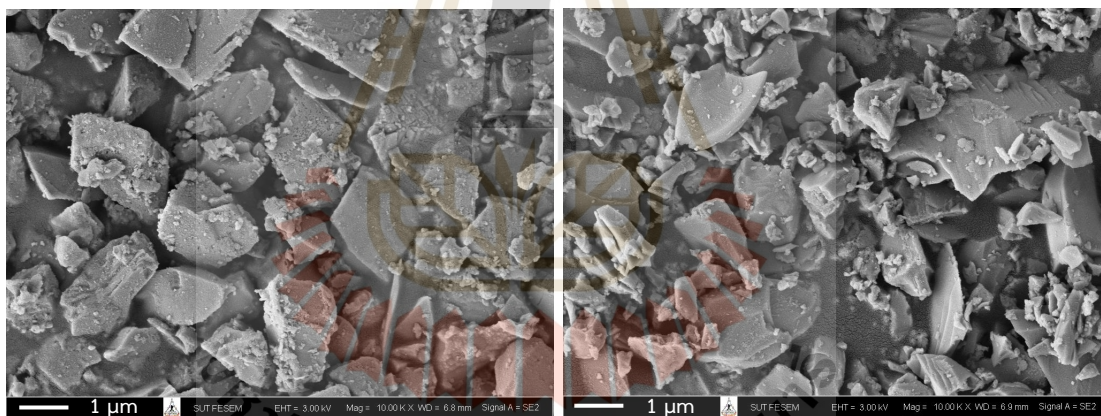


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค และขนาดของอนุภาคที่วัดจากเครื่อง Particle Size Analysis

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดขนาดผงซิลิคอน

จำนวนของลูกบด (ลูก)		เวลาในการ บด (ชั่วโมง)	% Yield (%)	D10 (μm)	Particle size (μm)	D90 (μm)
ขนาด 6 mm	ขนาด 10 mm					
8	2	12	96.32	5.841	12.145	22.133
5	5		91.11	4.674	8.606	14.485
2	8		92.53	4.572	8.996	16.966
8	2	24	39.50	5.220	9.997	16.679
5	5		31.92	3.181	5.910	9.885
2	8		33.72	1.823	3.515	6.044
2	8	36	76.62	0.692	1.749	4.314
2	8	48	75.41	0.716	1.513	3.286

*หมายเหตุ: ที่เวลาในการบด 24 ชั่วโมง เกิดการหกในขณะทำการผ่านตะแกรงร่อน



(ก)

(ข)

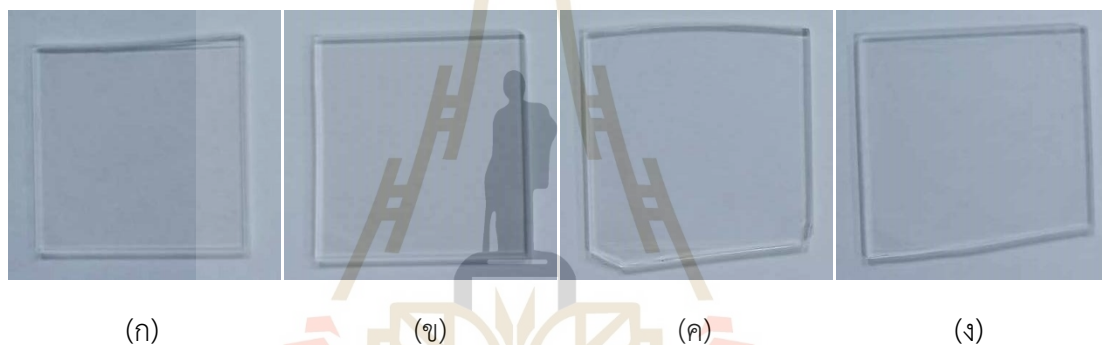
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย FESEM ของเงื่อนไขการบดที่เวลา (ก) 36 ชั่วโมง และ (ข) 48 ชั่วโมง

4.3 ผลการศึกษาจุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางรับแสง

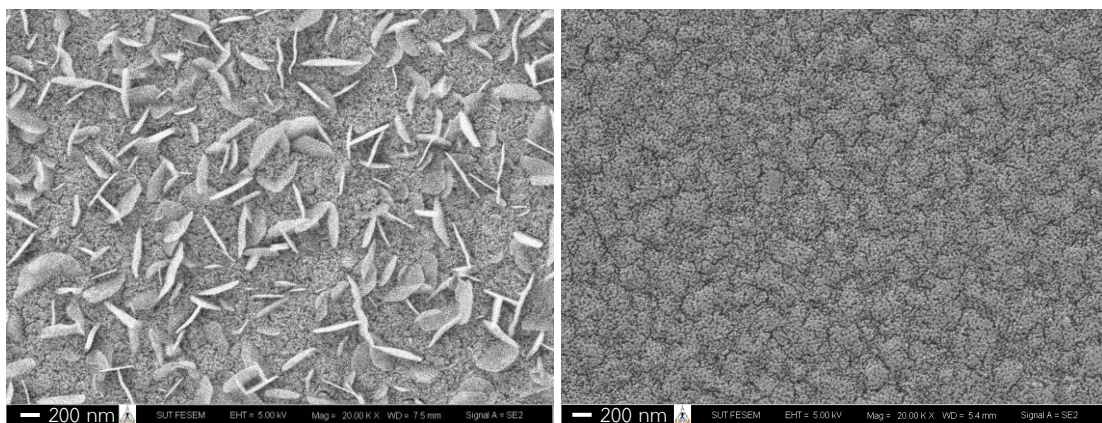
4.3.1 จุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางรับแสงซิงค์ออกไซด์

จากภาพถ่ายชิ้นงานฟิล์มบางรับแสง AZO ที่แสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อนำมาถ่ายด้วยกล้อง FESEM แสดงในรูปที่ 4.4 ด้วยอัตราขยายขนาด 20,000 เท่า พบว่าที่เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ 200 °C แสดงในรูปที่ 4.4 (ก) พื้นผิวของฟิล์มบาง AZO เกิดลักษณะสวดลายคล้ายรูปกลีบ

ดอไม้ขึ้น (Rattanawichai, et al., 2018) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการอบฟิล์มบางด้วยอุณหภูมิ 550 °C และวิธี RTA ด้วยอุณหภูมิ 930 °C พบว่าพื้นผิวของฟิล์มบาง AZO ไม่เกิดลวดลายคล้ายรูปกลีบดอไม้ และพื้นผิวมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) แสดงในรูปที่ 4.4 (ข) และ 4.4 (ค) ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาการเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์มบาง AZO เป็นจำนวน 2 ชั้น และ 3 ชั้น แสดงในรูปที่ 4.4 (ง) และ 4.4 (จ) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มบาง AZO มีลักษณะที่เรียบเนียนมากกว่าฟิล์มบางจำนวน 1 ชั้น นอกจากนี้จากรูปภาพขนาดเล็กที่แทรกในรูปที่ 4.4 (จ) แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง AZO ที่อัตราขยาย 100,000 เท่า พบว่า ผลึกซิงค์ออกไซด์มีขนาด 8 – 23 nm และผลึกมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดนาโนเมตร (Nano spherical grain crystal) สดท้ายรูปที่ 4.4 (ฉ) แสดงภาคตัดขวาง (Cross section) ของฟิล์มบาง AZO จำนวน 5 ชั้น พื้นผิวของฟิล์มบางยังคงเป็น Homogeneous และทดสอบการวัดความหนาพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 255.57 nm

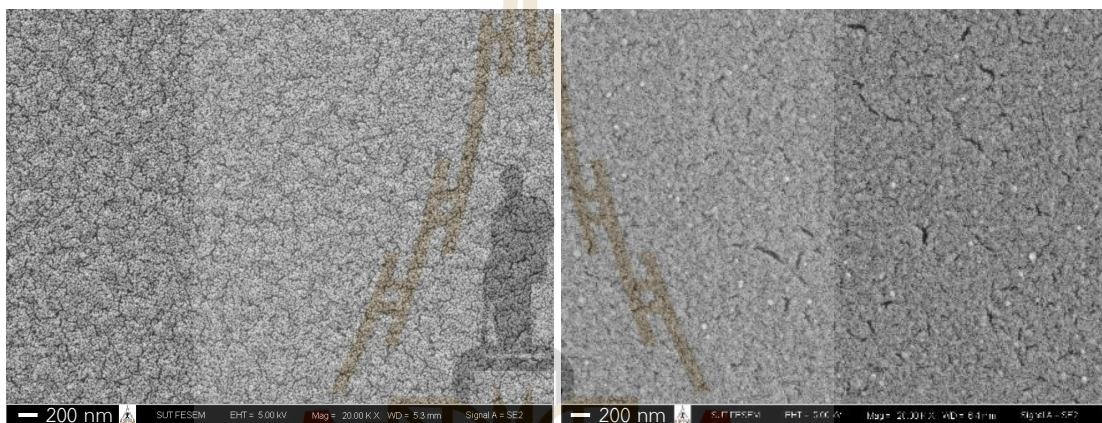


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบแบบ (ก) อบแห้ง (ข) อบด้วย Thermal annealing และ (ค) อบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process ที่มีจำนวนฟิล์มบาง 1 ชั้น และ (ง) ฟิล์มบางรับแสง BiZnO ที่ผ่านการอบด้วยวิธี Rapid thermal annealing process จำนวน 1 ชั้น



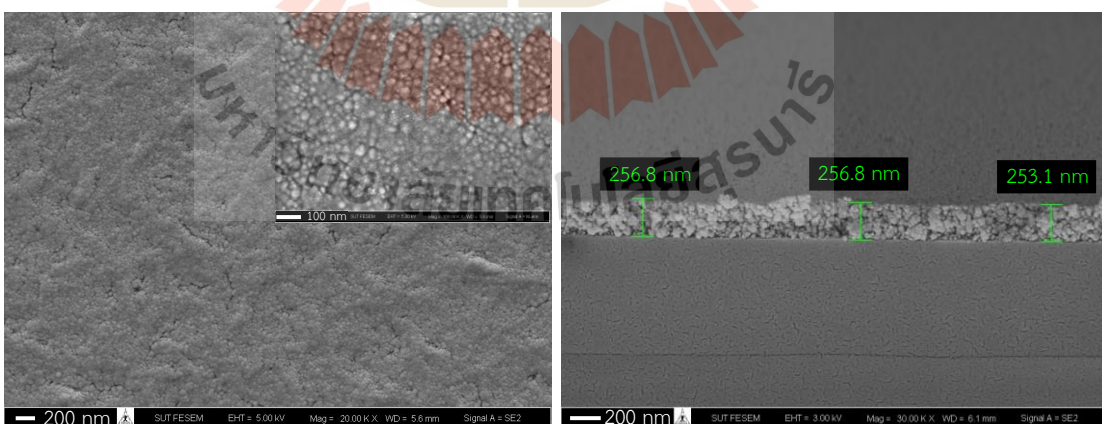
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

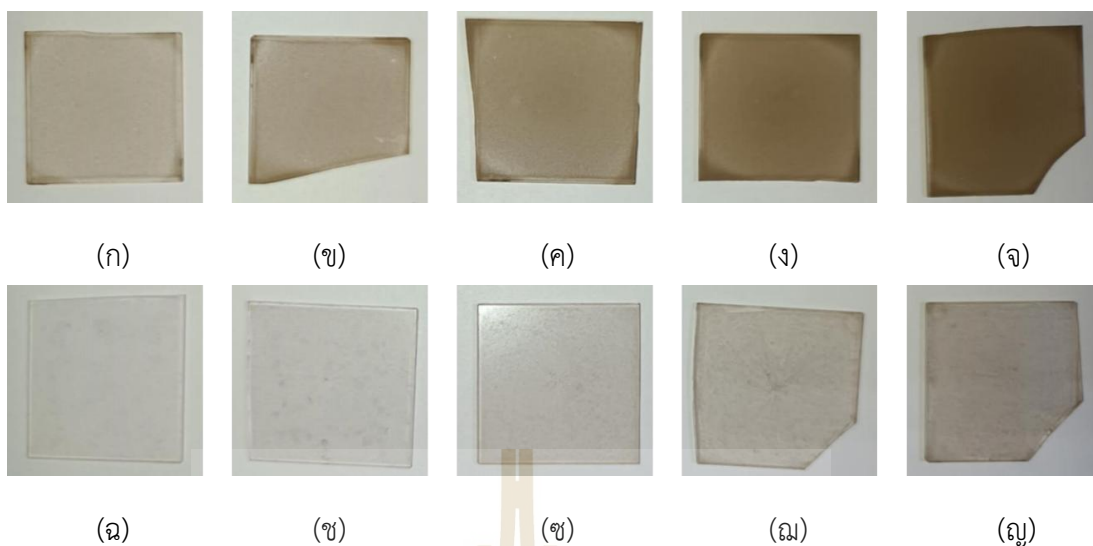
(ฉ)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย FESEM ของฟิล์มบางรับแสง AZO จำนวน 1 ชั้น ที่เงื่อนไข (ก) การอบแห้ง (ข) การอบด้วย TA (ค) การอบด้วยวิธี RTP และฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบด้วย RTP จำนวน (ง) 2 ชั้น (จ) 3 ชั้น และ (ฉ) 5 ชั้น ตามลำดับ

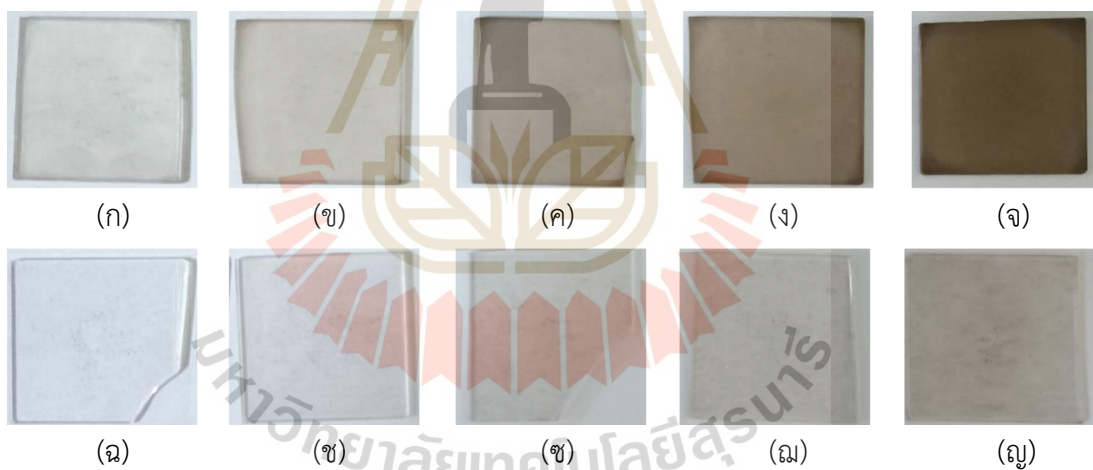
4.3.2 จุลโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางรับแสงซิลิคอนดอท

รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงรูปภาพชิ้นงานของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับทับซ้อน ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่า ฟิล์มบางรับแสง SD จากสารละลายเมตริกซ์ AZO ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและโครงสร้างสลับชั้นมีความหนาแน่นของผงซิลิคอนกระจายตัวบนแผ่นฐานมากกว่าฟิล์มบางรับแสง SD จากสารละลายเมตริกซ์ BiZnO เนื่องจากสารละลายตั้งต้นจาก IPA เป็นสารที่ระเหยออกได้ง่ายมากกว่า EG เป็นผลทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรของผงซิลิคอนในขณะทำการหมุนเหวี่ยงมีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลให้มีค่าความเข้มข้นของผงซิลิคอนเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีปริมาณของผงซิลิคอนเกาะที่พื้นผิวมากขึ้น (Routh, and Zimmerman, 2004; Tyona, 2013)

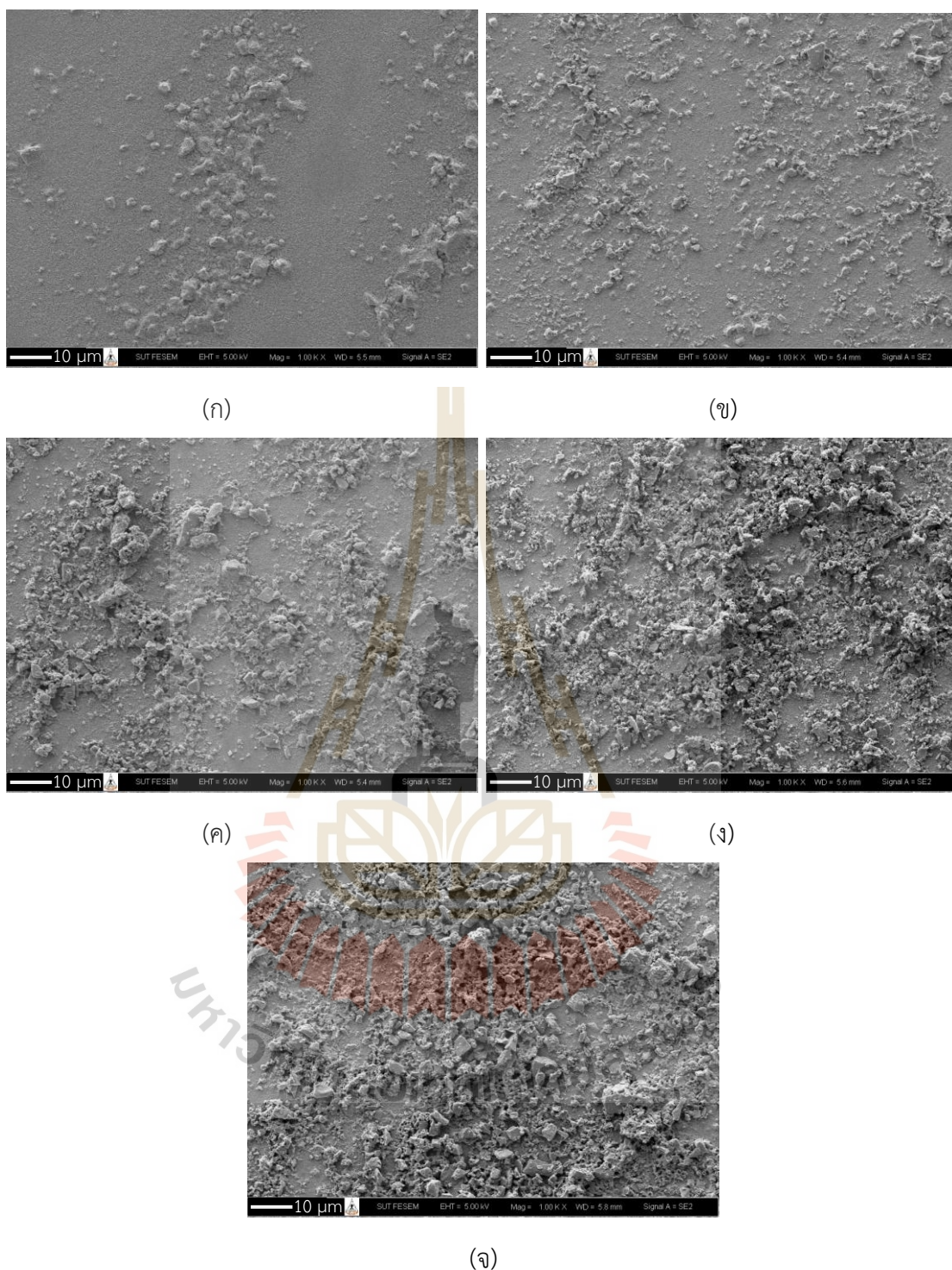
รูปที่ 4.7 กับรูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย FESEM ขนาด 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD โครงสร้างซ้อนทับ ตามลำดับ และรูปที่ 4.9 กับรูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่าย FESEM ขนาด 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD โครงสร้างสลับชั้น ตามลำดับ พบว่าการกระจายตัวของผงซิลิคอนในฟิล์มบางเป็นรูปแบบ Random และมีการเกาะกลุ่มกันของผงซิลิคอนหนาแน่นมากขึ้นเมื่อมีจำนวนชั้นของฟิล์มบางรับแสง SD เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเงื่อนไขฟิล์มบางรับแสง AZO-SD จะพบว่าปริมาณของผงซิลิคอนจะมีมากกว่าฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับความทึบแสงจากภาพถ่ายฟิล์มบาง นอกจากนี้เมื่อทำการขยายขนาดภาพเป็น 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD โครงสร้างซ้อนทับแสดงในรูปที่ 4.11 กับรูปที่ 4.12 ตามลำดับ และฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD โครงสร้างสลับชั้น แสดงในรูปที่ 4.13 กับรูปที่ 4.14 ตามลำดับ พบว่าในทุกๆ เงื่อนไขพบผงซิลิคอนมีอนุภาคของผลึกซิงค์ออกไซด์เกาะอยู่บนพื้นผิว



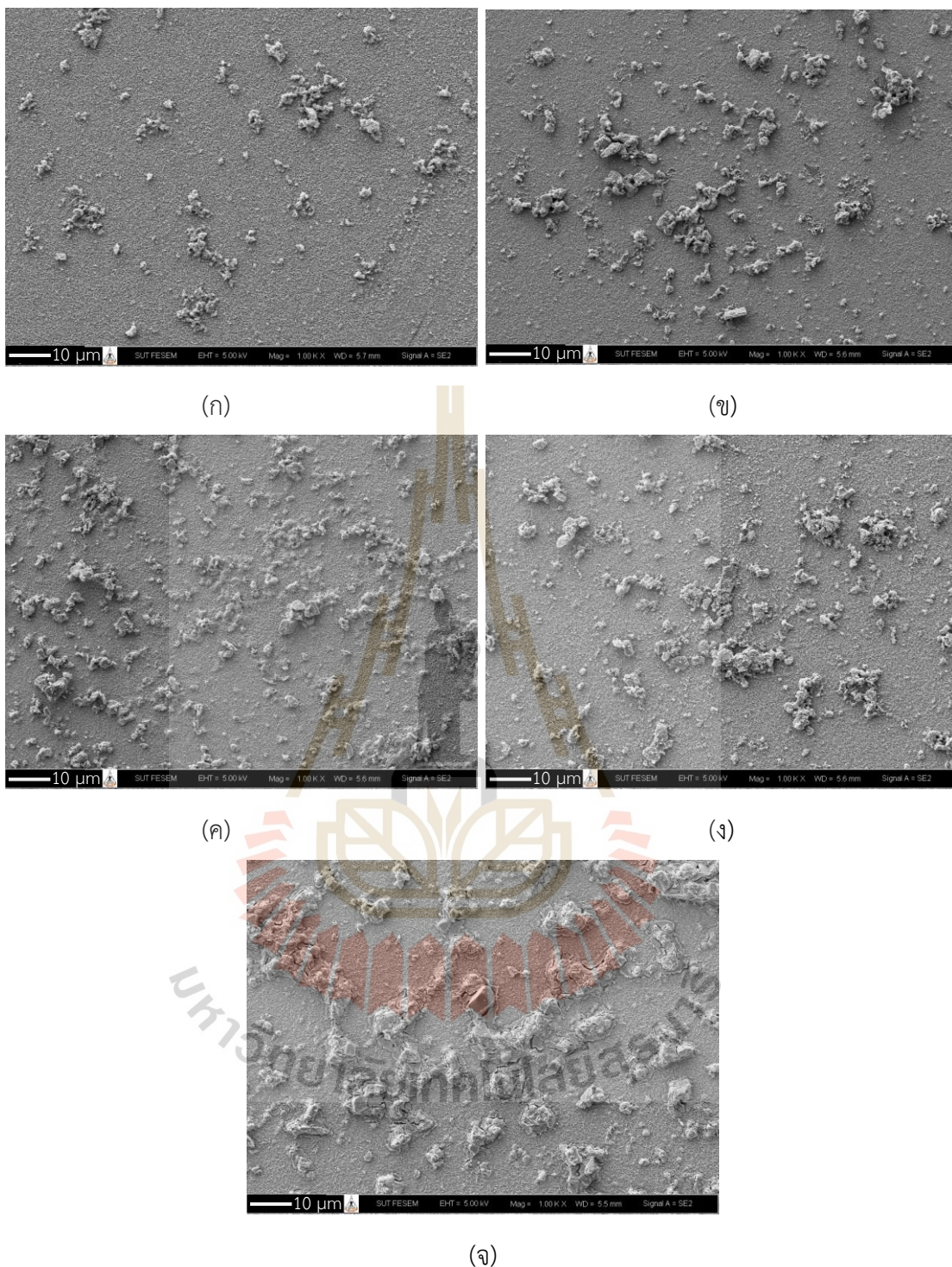
รูปที่ 4.5 फिल्मบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับจากสารละลายเมตริกซ์ AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และจากสารละลายเมตริกซ์ BiZnO จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ณ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น



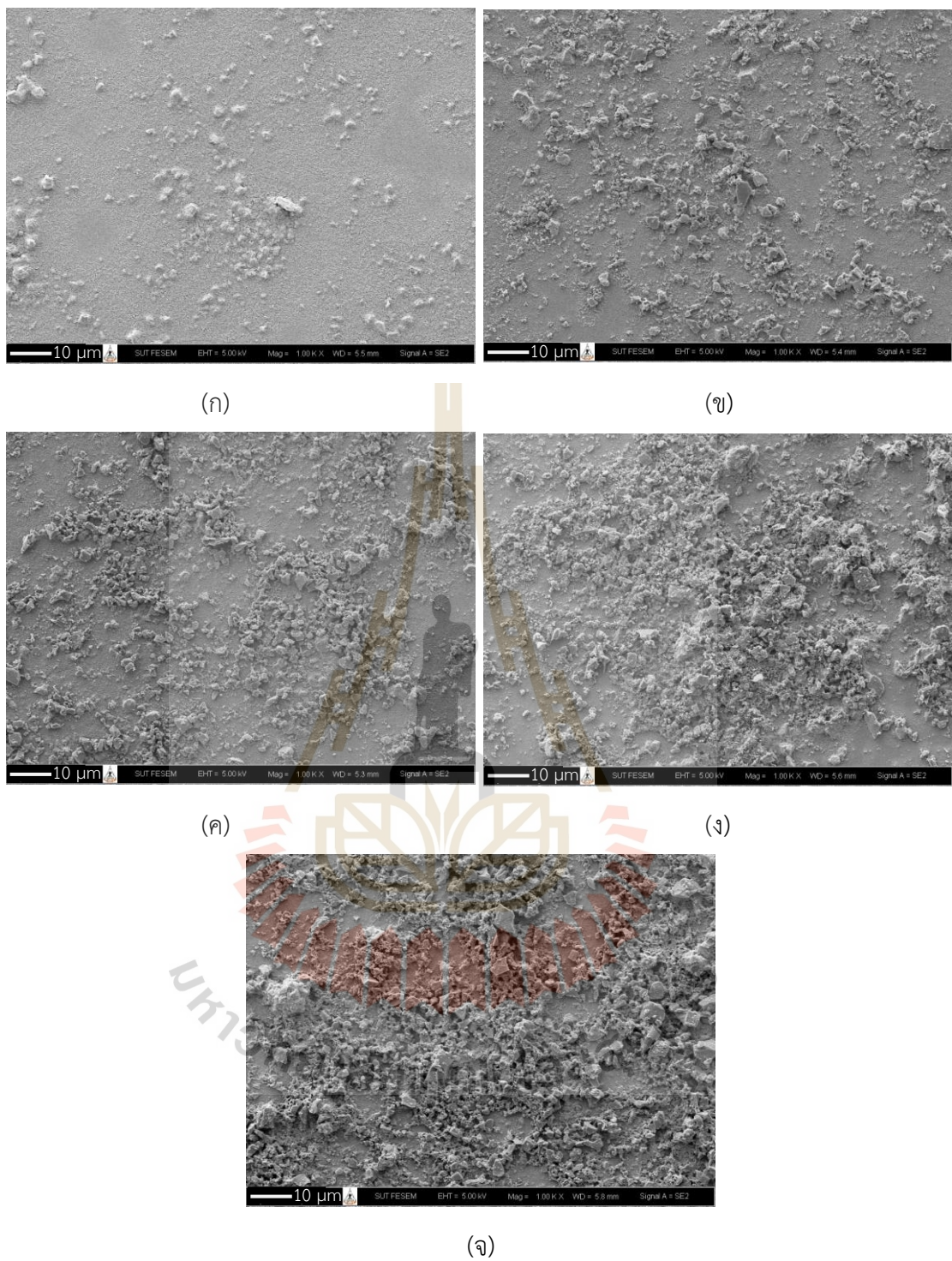
รูปที่ 4.6 फिल्मบางรับแสง SD โครงสร้างสลับชั้นจากสารละลายเมตริกซ์ AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และจากสารละลายเมตริกซ์ BiZnO จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ณ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น



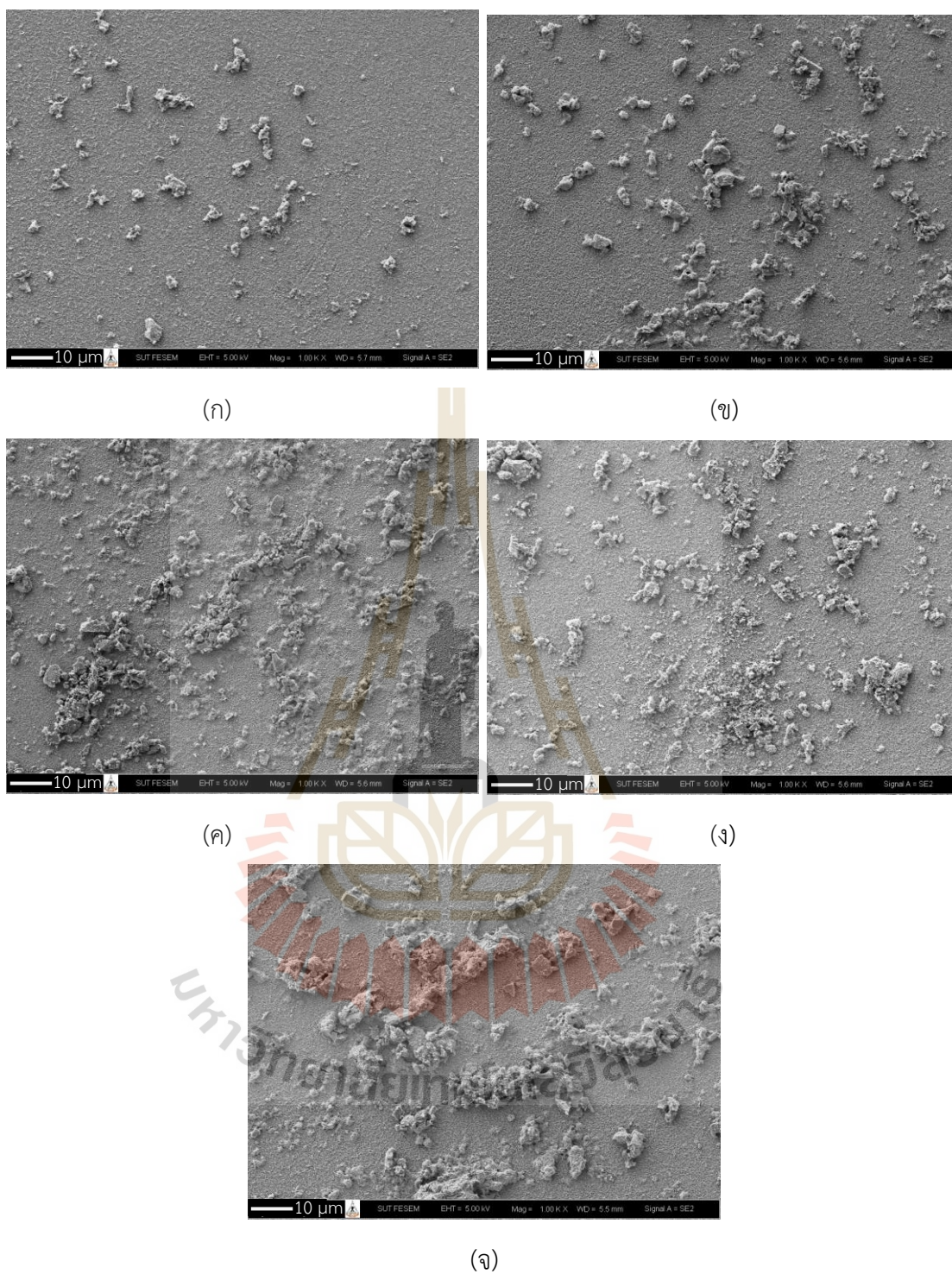
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างซ้อนทับ



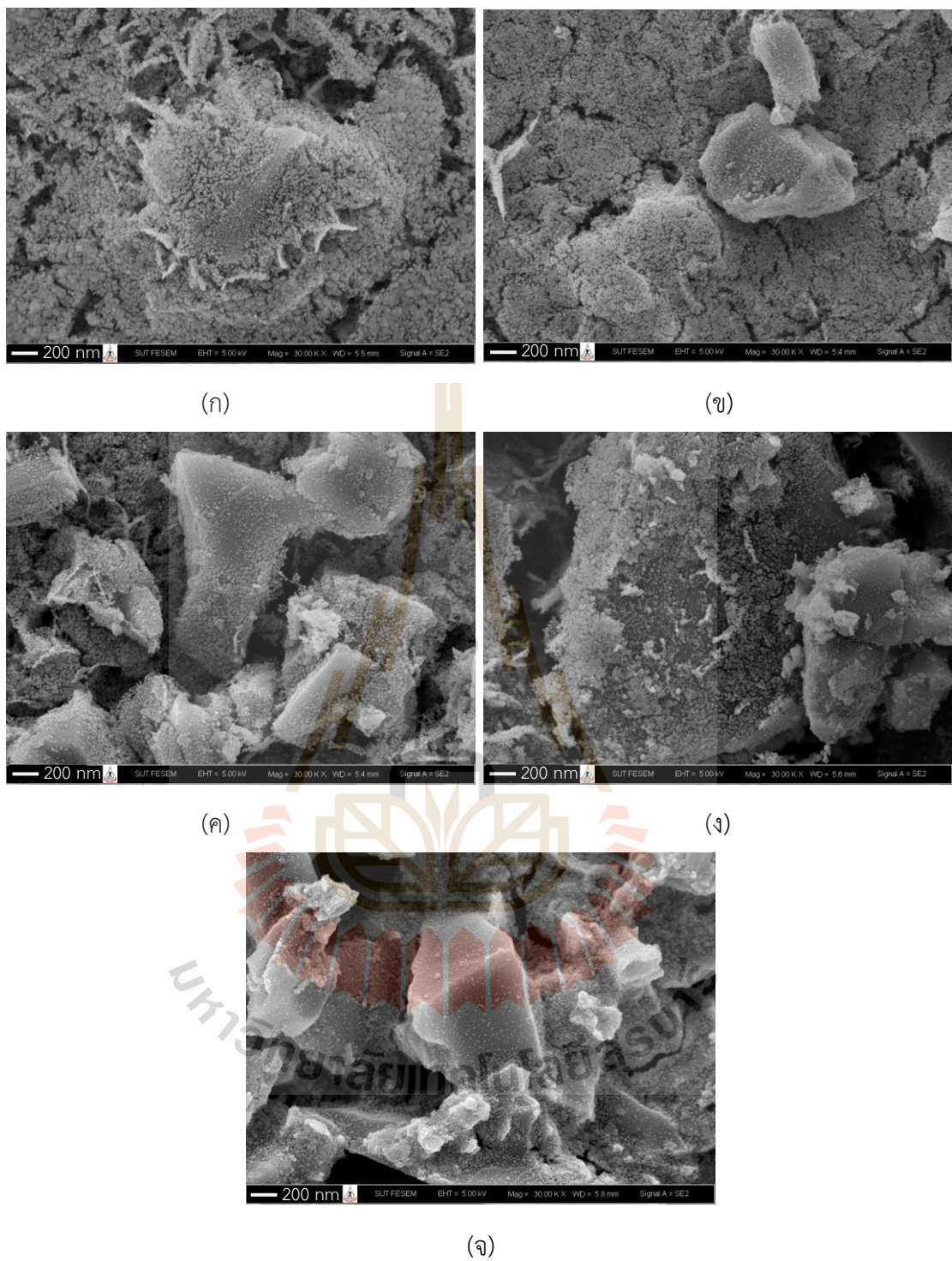
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD จำนวน
(ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างซ้อนทับ



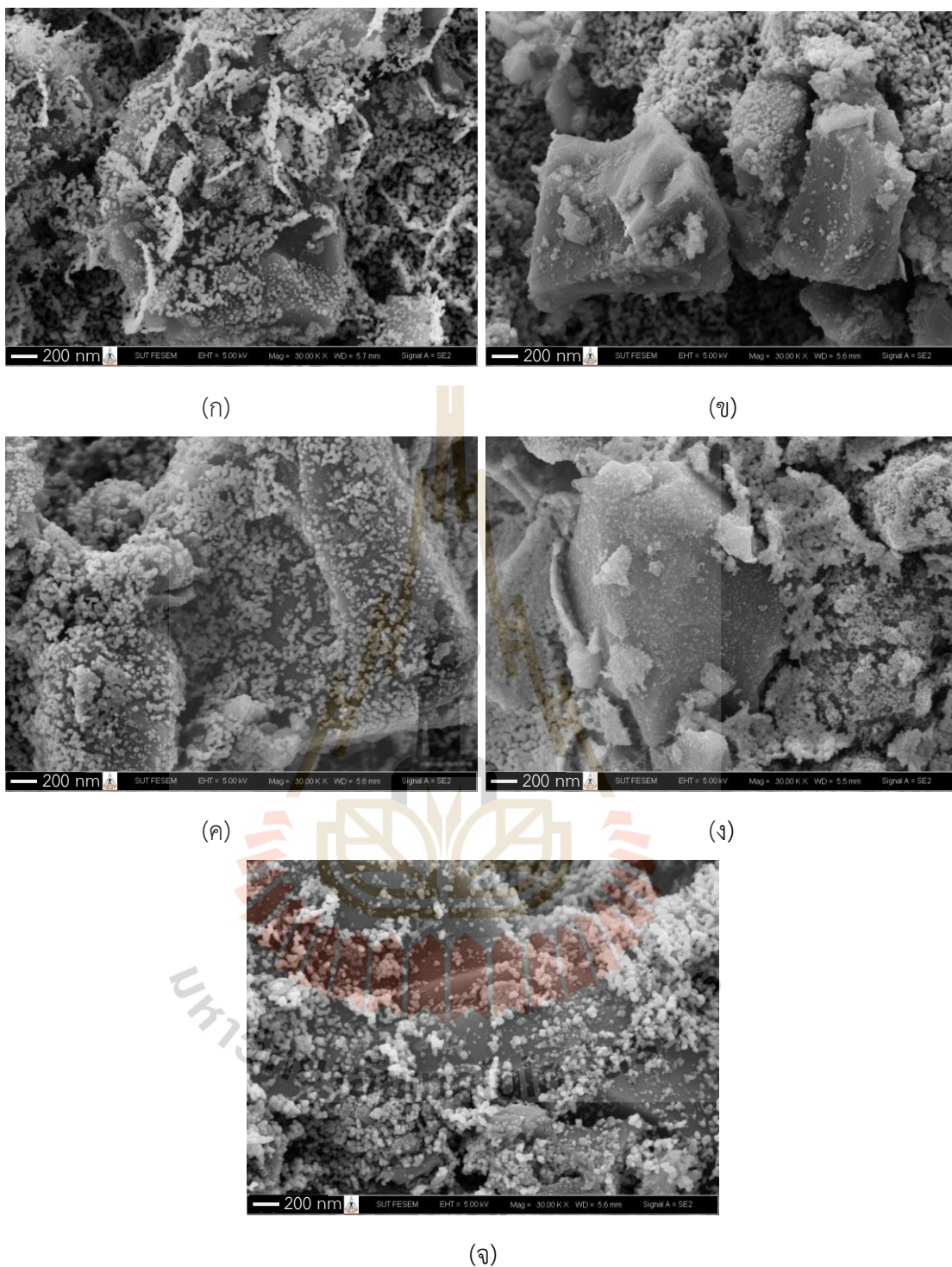
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO/SD/AZO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น



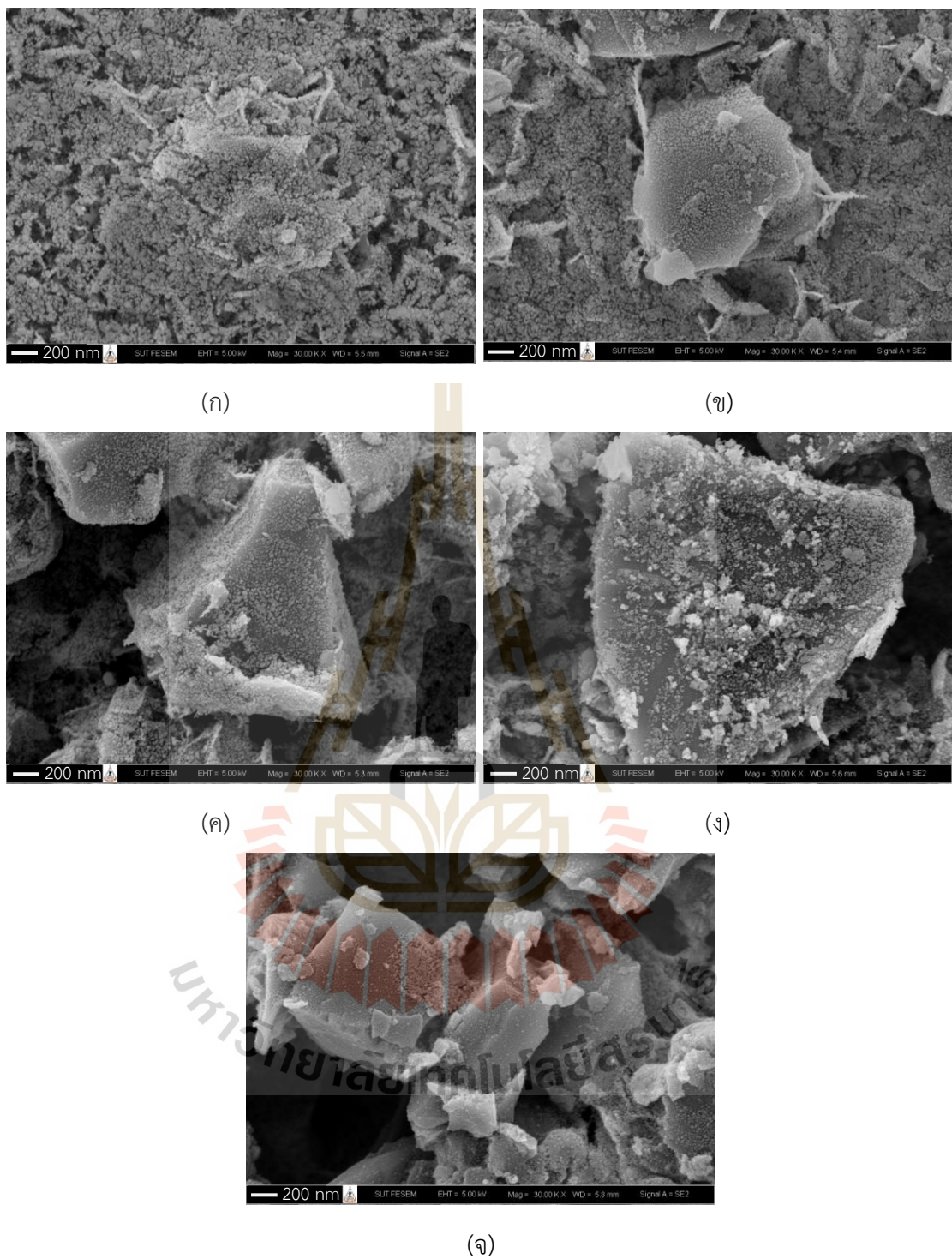
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 1,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO/SD/BiZnO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น



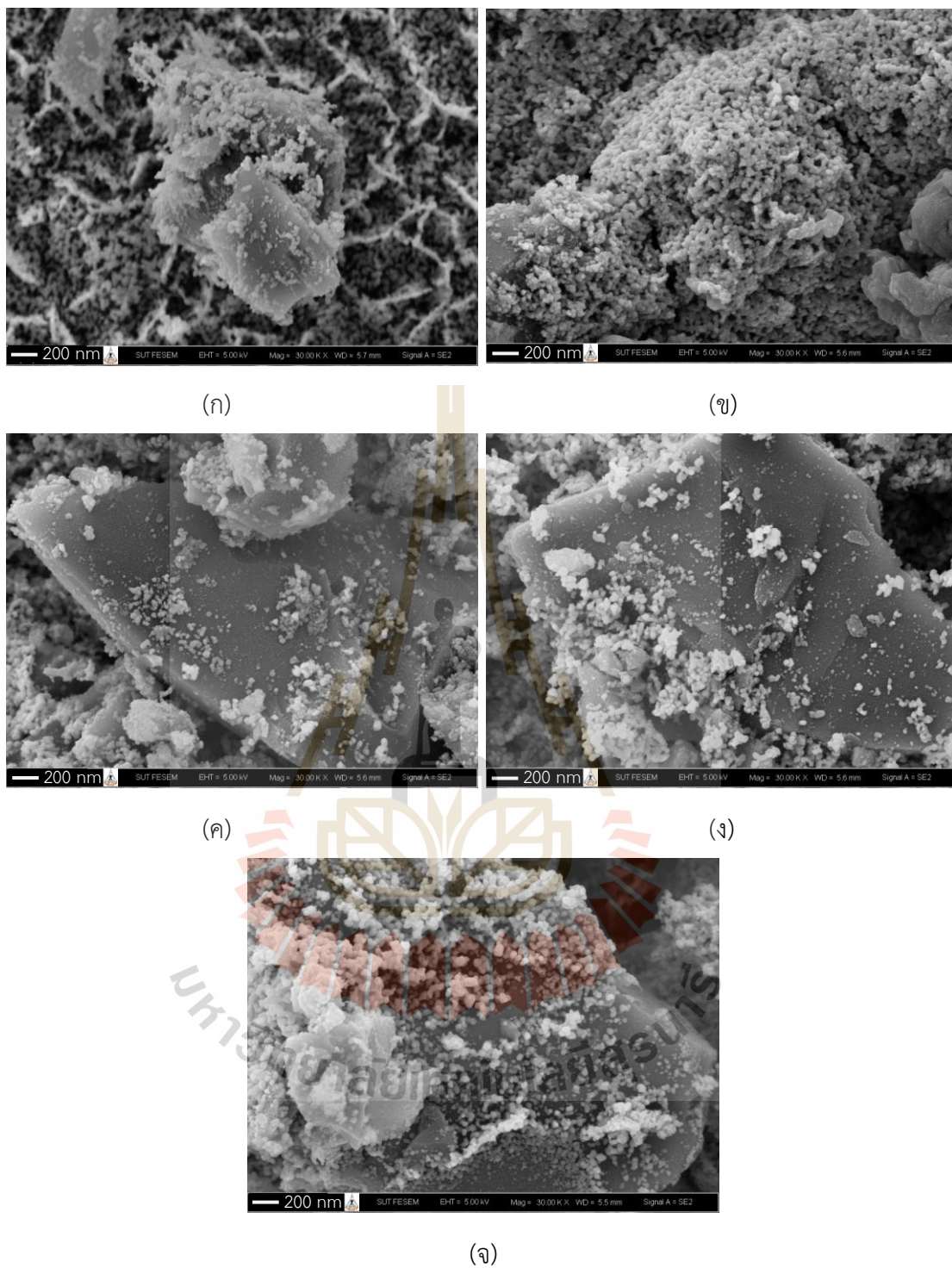
รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD จำนวน
(ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างทับซ้อน



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD จำนวน
(ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างทับซ้อน



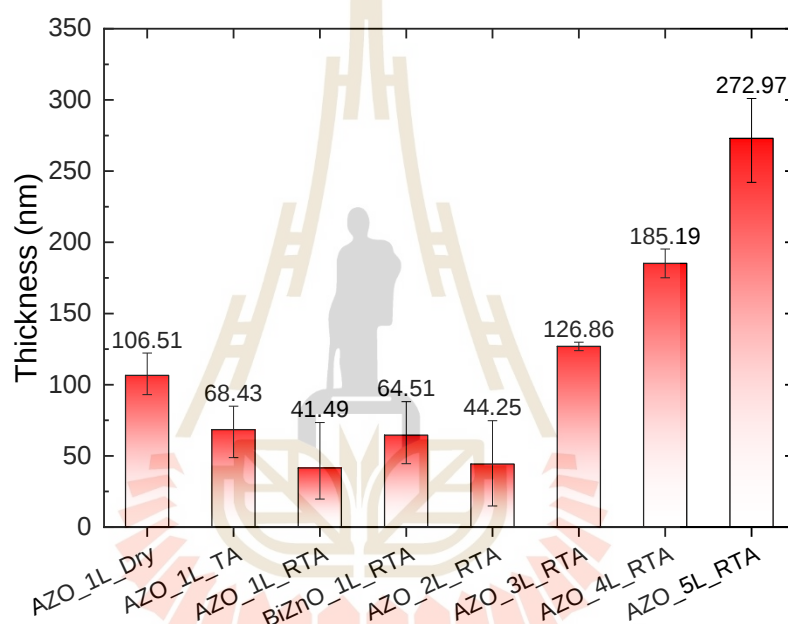
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง AZO/SD/AZO จำนวน
(ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย FESEM ที่อัตราขยาย 30,000 เท่า ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO/SD/BiZnO จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น รูปแบบโครงสร้างสลับชั้น

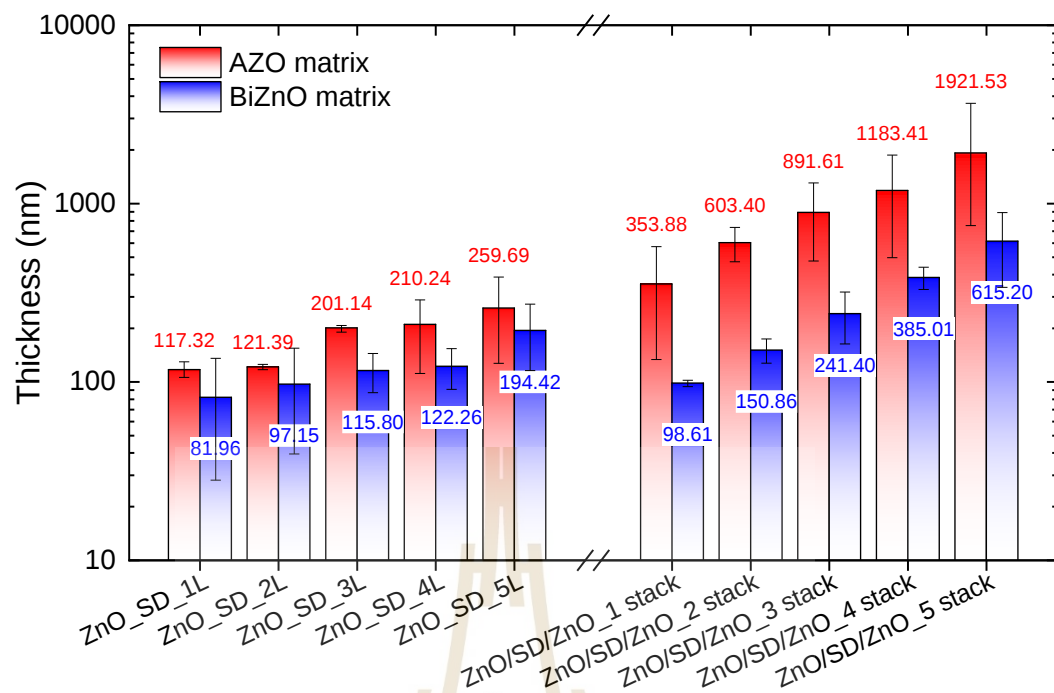
4.3.3 ความหนาของฟิล์มบางรับแสง

รูปที่ 4.15 แสดงความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO และ ฟิล์มบางรับแสง BiZnO ที่ผ่านการอบรูปแบบต่างๆ และการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นฟิล์มบาง AZO ตั้งแต่ 1 – 5 ชั้น ที่ผ่านการอบแบบ RTA พบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการอบแบบ Dry มีความหนาที่มากกว่าแบบ TA และ RTA เนื่องจากเกิด ZnO เกิดการก่อรูปลักษณะคล้ายกลีบของดอกไม้ ในขณะที่การอบด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า ฟิล์มบางมีลักษณะที่เรียบเนียนมากกว่า สอดคล้องกับผลการถ่ายภาพ FESEM และสำหรับฟิล์มบางที่มีจำนวนชั้นที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

รูปที่ 4.16 แสดงความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น ซึ่งจากผลการวัดความหนาพบว่า ฟิล์มบางโครงสร้างสลับชั้นมีความหนาที่มากกว่าโครงสร้างซ้อนทับ และฟิล์มบาง AZO-SD มีความหนามากกว่าฟิล์มบางรับแสง BiZnO-SD เมื่อพิจารณาจำนวนชั้นฟิล์มบางที่เท่ากัน

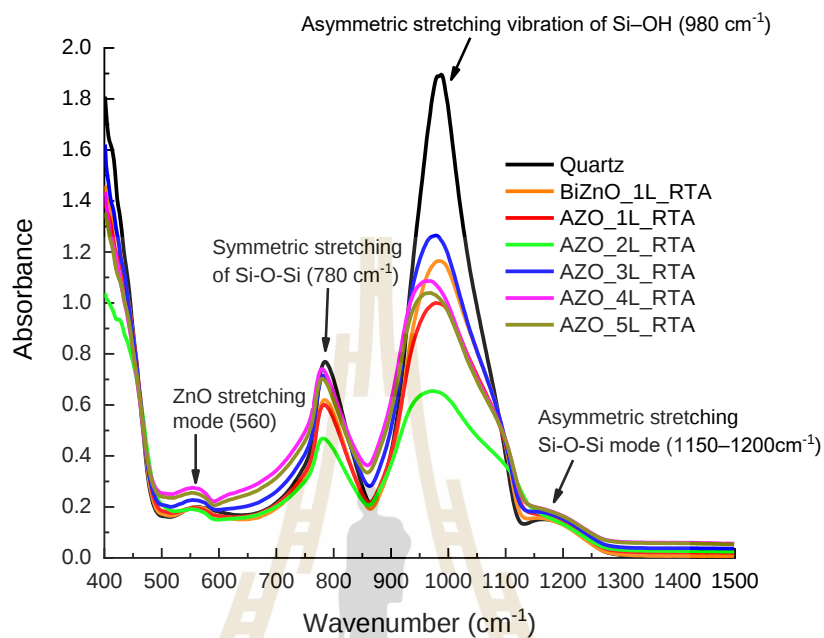


รูปที่ 4.16 ความหนาของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น

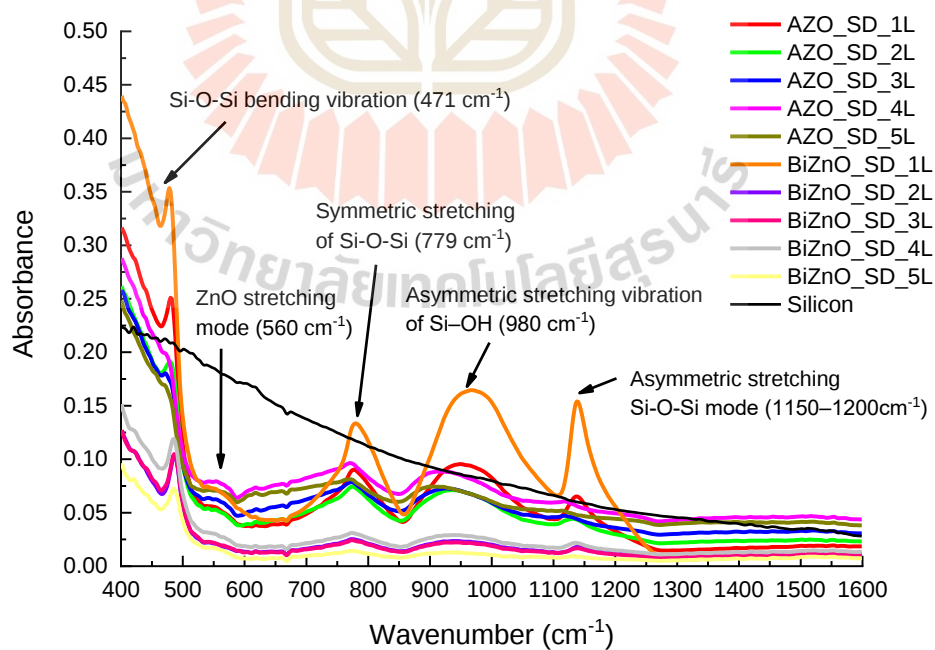
4.4 การวิเคราะห์การเกาะเกี่ยวพันธะของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การวิเคราะห์การเกาะเกี่ยวพันธะของฟิล์มบาง BiZnO AZO และฟิล์มบาง SD สามารถตรวจสอบได้จากการวัดด้วยวิธี Fourier Transform Infrared (FTIR) รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจากผลการวัด FTIR ของฟิล์มบางรับแสง BiZnO และ AZO และรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางรับแสงโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นตามลำดับ จากผลชี้ให้เห็นถึงการดูดกลืนแสงช่วง WN บริเวณ 1150 cm^{-1} 980 cm^{-1} และ 780 cm^{-1} คือ Asymmetrical stretching ของพันธะ Si-O-Si (Zelenina et al., 2015) Asymmetric stretching vibration ของหมู่ฟังก์ชัน Si-OH (Labidi, and Mechat, 2023) และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si (Ellerbrock, Stein, and Schaller, 2022) ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ถึงพันธะจากแผ่นฐานควอตซ์ และสำหรับ ZnO พบว่าที่บริเวณ WN ที่ 560 cm^{-1} มีการปรากฏยอดสเปกตรัมของ Stretching Zn-O (Alsaba, Ashoush, Elsayed, Eid, and Abdelghany, 2019) อย่างไรก็ตาม สำหรับฟิล์มบาง SD พบว่าเกิดยอดสเปกตรัมของ Si-O-Si bending vibration ที่บริเวณ WN ที่ 471 cm^{-1} ซึ่งสังเกตได้ว่าที่ยอดตำแหน่งนี้มีค่า Absorbance ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้น SD เป็นการบ่งชี้ถึงปริมาณของ SiO_2 ที่ลดลง (Pantohan, Candidato, and Vequizo, 2015) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นพบว่า ตำแหน่งยอดของซิงค์ออกไซด์

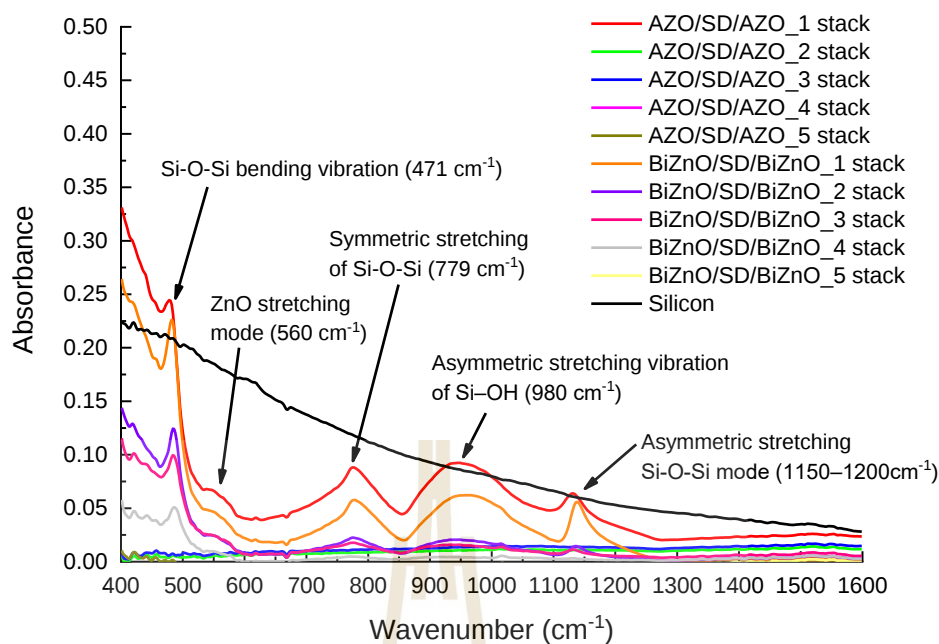
และซิลิคอนมีตำแหน่งที่ตรงกัน แต่ฟิล์มบางโครงสร้างสลับชั้นมีค่า Absorbance ที่ต่ำกว่าโครงสร้างซ้อนทับ ทั้งนี้เนื่องมาจากจำนวนชั้นฟิล์มบางที่มากอาจส่งผลให้เกิดการบดบังการตรวจจับสัญญาณของตำแหน่งที่พิจารณา



รูปที่ 4.17 ผลการวัด FTIR ของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO



รูปที่ 4.18 ผลการวัด FTIR ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างทับซ้อน

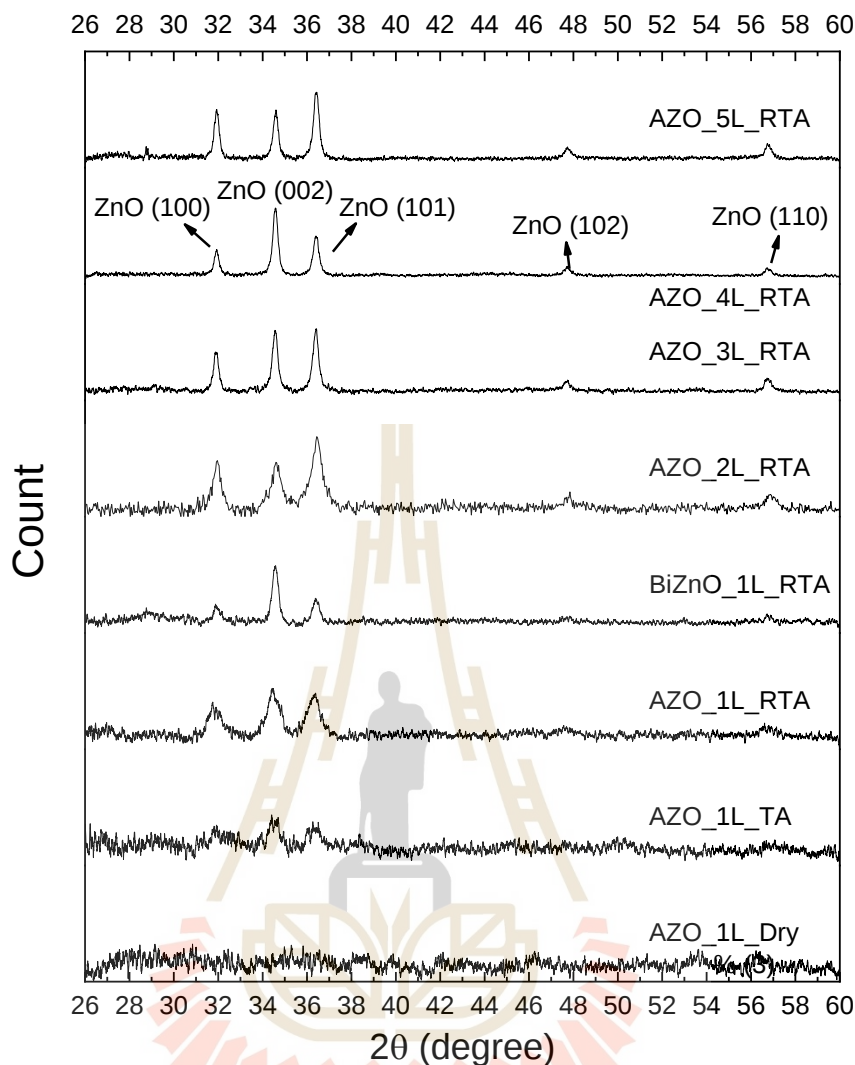


รูปที่ 4.19 ผลการวัด FTIR ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้น

4.5 การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างด้วย XRD

4.5.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO

ผลการวัดฟิล์มบางรับแสง AZO จำนวน 1 ชั้น ที่ผ่านการอบด้วยกระบวนการอบแบบ Dry TA และ RTA และฟิล์มบางรับแสง AZO ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 – 5 ชั้น ที่ผ่านการอบด้วยกระบวนการอบแบบ RTA เปรียบเทียบกับฟิล์มบางรับแสง BiZnO จำนวน 1 ชั้น ที่ผ่านการอบด้วยกระบวนการอบแบบ RTA ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลการวัด XRD ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

ผลการวัดพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ ZnO ปรากฏยอดที่มุม 2θ ประมาณ 31.8° 34.5° 36.5° 47.65° และ 56.85° ซึ่งตรงกับ (100) (002) (101) (102) และ (110) ตามลำดับ โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนนี้บ่งชี้ถึงผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม (Spherical ZnO crystal) มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal wurtzite ตรงกับรหัส Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) หมายเลข 36-1451 จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 200°C ไม่ปรากฏยอดมุมการเลี้ยวเบนใดๆ แสดงให้เห็นว่าการอบด้วยอุณหภูมิที่ต่ำ ส่งผลให้ ซิงค์ออกไซด์ไม่เกิดการก่อรูปของเกรนผลึก เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขการอบที่อุณหภูมิ 550°C พบว่าขนาด Count หรือ Intensity ของ XRD pattern ที่มุม 2θ ประมาณ 31.8° 34.5° 36.5° มีขนาดที่เล็กกว่าเงื่อนไขการอบด้วย RTA ที่อุณหภูมิ 930°C ซึ่งสามารถระบุได้ว่า

ความเป็นผลึก (Crystallinity) ที่ก่อรูปด้วยอุณหภูมิสูงมีการเกิดที่มากกว่าแบบอุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังไม่เกิดการปรากฏยอดมุมของเฟส Al_2O_3 และ ZnAl_2O_4 จากการอบด้วยอุณหภูมิสูง อันส่งผลให้ผลึก ZnO เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Koralli et al., 2022) อย่างไรก็ตาม ฟิล์มบาง ZnO ที่มีการเพิ่มจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 – 5 ชั้น มีเกิดผลของ interference effects ขึ้น เนื่องจากจุดผิดพร่องที่เกิดขึ้นของช่องว่างระนาบผลึก (Defect-induced local fluctuations of interplanar spacing) (Zolotoyabko, 1998) ทำให้มีความเป็นไปได้ที่ทำให้ค่า intensity ของระนาบเด่นเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างระนาบ 002 เป็นระนาบ 101 นอกจากนี้ฟิล์มบาง BiZnO ยังคงพบยอดมุมที่ระนาบเดียวกันกับฟิล์มบาง AZO แต่ Count ที่ระนาบของ (100) และ (101) มีขนาดที่น้อยกว่า อีกทั้งการอบฟิล์มบาง BiZnO ด้วยกระบวนการ RTA ไม่ก่อให้เกิดเฟสของ Bi_2O_3

ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแสดงค่าการวัดตำแหน่งระนาบ 2θ ค่า FWHM และผลคำนวณขนาดเกรนผลึกตามสมการที่ 2.33 ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดตำแหน่งระนาบ 2θ ค่า FWHM และผลการคำนวณขนาดผลึกของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

เงื่อนไข	ระนาบของซิงค์ออกไซด์								
	100			002			101		
	2θ (°)	B (°)	d (nm)	2θ (°)	B (°)	d (nm)	2θ (°)	B (°)	d (nm)
AZO_1L_Dry	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AZO_1L_TA	-	-	-	34.56	0.75	11.09	36.48	0.85	9.81
AZO_1L_RT	31.76	0.55	15.11	34.45	0.43	19.36	36.34	0.49	17.15
BiZnO_1L_RT	31.87	0.709	11.66	34.58	0.295	28.23	36.36	0.294	28.46
AZO_2L_RT	31.89	0.50	16.66	34.59	0.38	21.74	36.40	0.50	16.91
AZO_3L_RT	31.91	0.22	37.59	34.56	0.272	30.61	36.39	0.268	31.23
AZO_4L_RT	31.92	0.231	35.80	34.57	0.245	33.99	36.41	0.269	31.11
AZO_5L_RT	31.92	0.241	34.31	34.59	0.24	34.70	36.42	0.278	30.11

ผลการคำนวณขนาดเกรนผลึกพบว่าฟิล์มบาง AZO ผ่านการอบด้วยวิธี TA ที่อุณหภูมิ 550 °C มีขนาดเล็กกว่าฟิล์มบาง AZO ที่อบด้วยวิธี RTA ด้วยอุณหภูมิ 930 °C ในทุกๆ ระนาบที่พิจารณา เมื่อพิจารณาที่ระนาบเด่น (002) พบว่าฟิล์มบาง AZO มีขนาดเกรนผลึกใหญ่ขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้น AZO ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ชั้นงานระหว่างฟิล์มบาง

AZO และ BiZnO ที่จำนวน 1 ชั้น พบว่าขนาดของผลึก ZnO ที่ระนาบเด่น (002) ของฟิล์มบาง BiZnO จะมีขนาดที่ใหญ่มากกว่า

สำหรับผลการคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบ ($d_{h,k,l}$) ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกซี (c) และความเครียดตามแนวแกนซี (ϵ_{zz}) ของ ZnO ที่ระนาบ (002) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.34 สมการที่ 2.35 และสมการที่ 2.37 ตามลำดับ และผลการคำนวณในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณระยะระหว่างระนาบ ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกและค่าความเครียดตามแนวแกนซีที่ระนาบ (002) ของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

เงื่อนไข	$d_{h,k,l}$ (Å)	c (Å)	ϵ_{zz}
AZO_1L_Dry	-	-	-
AZO_1L_TA	2.595	5.190	-0.328
AZO_1L_RT	2.603	5.206	-0.014
BiZnO_1L_RT	2.594	5.188	-0.358
AZO_2L_RT	2.593	5.186	-0.392
AZO_3L_RT	2.594	5.188	-0.372
AZO_4L_RT	2.594	5.188	-0.356
AZO_5L_RT	2.593	5.186	-0.411

จากการคำนวณพบว่าค่าพารามิเตอร์โครงผลึกซีมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 5.207 Å ส่งผลให้เกิดความเครียดในผลึก เมื่อทำการคำนวณค่าความเครียดของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO พบว่ามีค่าติดลบ บ่งบอกลักษณะของฟิล์มบางที่สร้างขึ้นมีความเครียดของผลึกในรูปแบบกด (Compressive strain) หรือแลตทิซเกิดการหดตัว ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกตัวของอะตอมสารเจืออย่าง Al และ Bi และมีความเป็นไปได้ที่การเลื่อนตัวของตำแหน่งระนาบมาจากการที่ชั้นงานผ่านอุณหภูมิการอบมากกว่า 500 °C (Rattanachan et al., 2013)

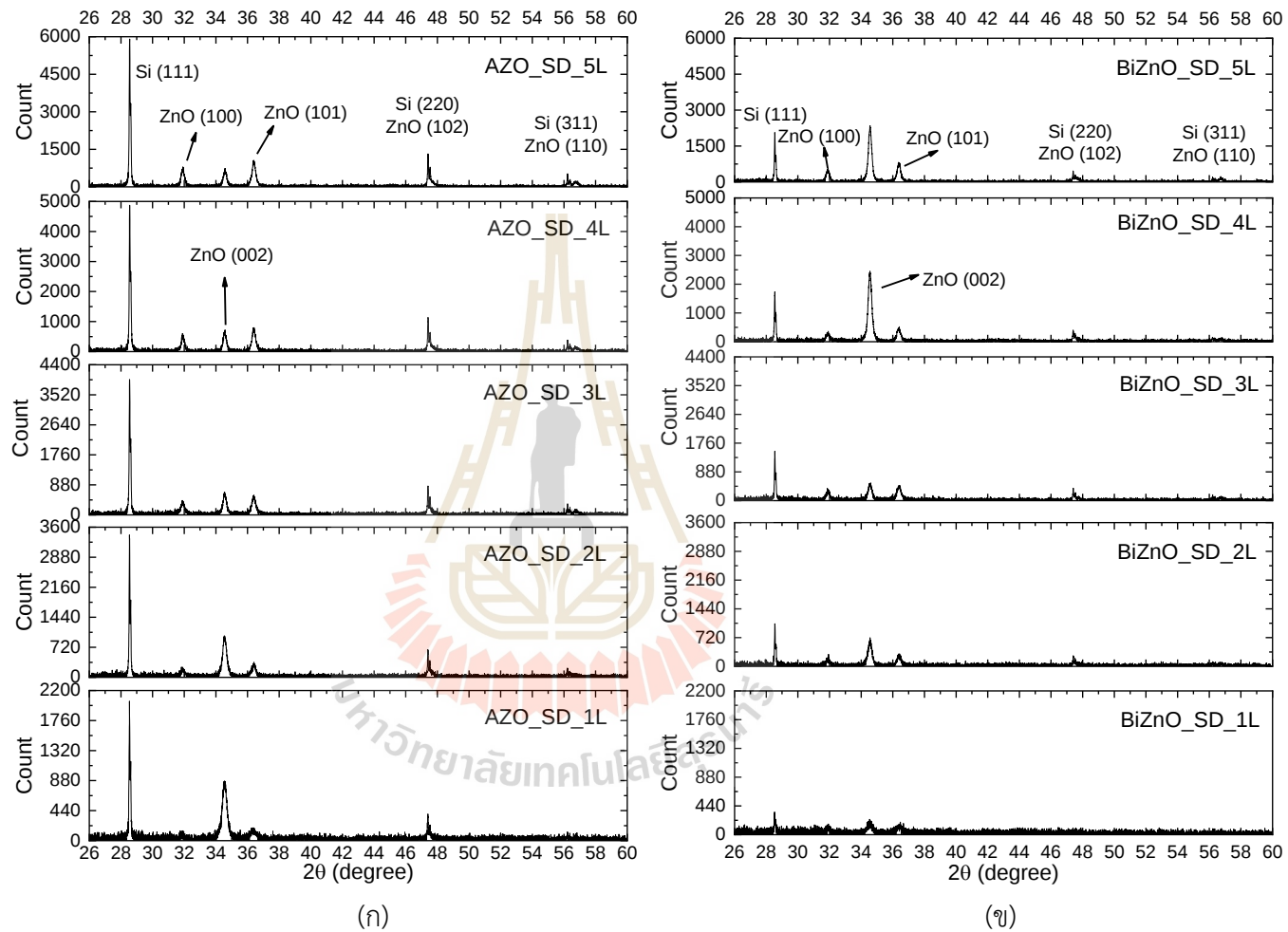
4.5.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางรับแสง SD

รูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงผลการวัดด้วย XRD ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นในช่วงมุม $25^\circ - 60^\circ$ ตามลำดับ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงซิลิคอนปรากฏยอดที่มุม 2θ ประมาณ 28.47° 47.34° และ 56.15° ซึ่งถึงระนาบ (111)

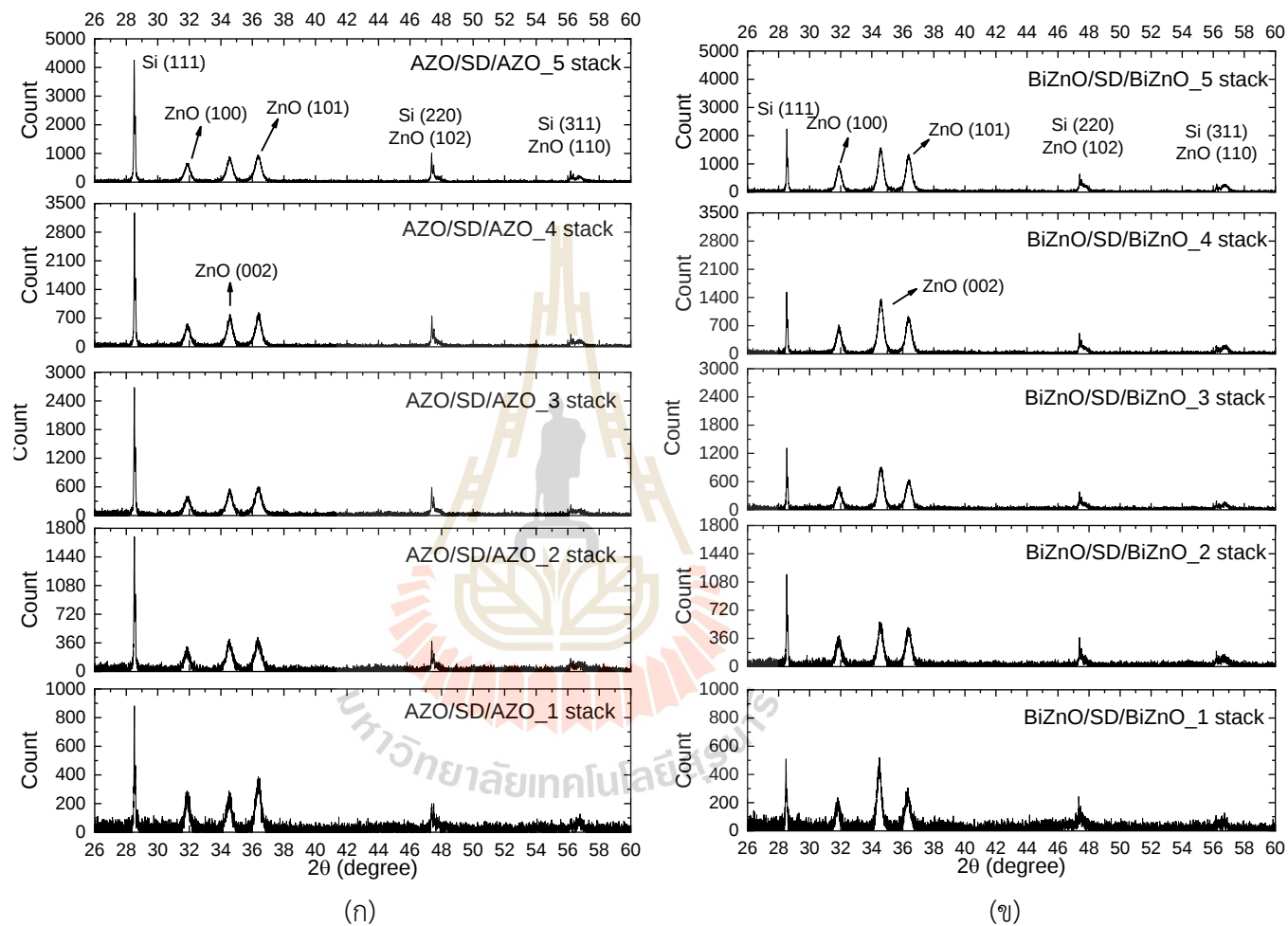
(220) และ (311) ตามลำดับ ตรงกับรหัส JCPDS หมายเลข 00-027-1402 ที่บ่งบอกถึงโครงสร้างของ ซิลิคอนที่ฝังในเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียมเป็นรูปแบบ Simple cubic นอกจากนี้จากผลการ ทดลองพบว่า จำนวนชั้นของฟิล์มบาง SD ทั้งโครงสร้างโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นที่มากขึ้น จะ ส่งผลให้ความสูงของ Intensity ของซิลิคอนมีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณความเป็นผลึกของซิลิคอน มีปริมาณที่มากขึ้น สอดคล้องกับผลของ FTIR ที่แสดงปริมาณยอดของพันธะ Si-O-Si ที่มีค่าลดลง

สำหรับการพิจารณาผลึกซิงค์ออกไซด์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ปรากฏยอดที่มุม 2θ ประมาณ 31.8° 34.5° 36.5° 47.65° และ 56.85° ซึ่งถึงระนาบ (100) (002) (101) (102) และ (101) ตามลำดับ ซึ่งยังคงมีตำแหน่งเดียวกันกับฟิล์มบาง AZO หรือ BiZnO นอกจากนี้เมื่อพิจารณายอดมุม 2θ ของผลึกซิงค์ออกไซด์ พบว่าฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง ซ้อนทับและสลับชั้นของ BiZnO-SD มีค่า Intensity สูงกว่าฟิล์มบางรับแสง AZO-SD และนอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจำนวนชั้นฟิล์มบางรับแสง SD ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ Intensity สูงมากขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งชี้ถึงปริมาณความเป็นผลึกที่มีมากกว่า และสำหรับซิลิคอนที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Simple cubic สามารถหาค่า Crystal lattice ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.36 และสามารถหาค่าความเครียด ตามแนวแกนซีจากสมการที่ 2.37 โดยผลการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและ สลับชั้น เมื่อพิจารณาระนาบของซิลิคอน (111) พบว่า เจือไนโครงสร้างสลับชั้นมีค่าที่สูงมากกว่า โครงสร้างซ้อนทับอยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้นี้ยังมีค่าที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับแลตทิซ ผลึกที่มีค่าเท่ากับ $5.43 \text{ \AA}$ ส่งผลให้แลตทิซเกิดความเครียด ซึ่งผลการคำนวณค่าความเครียดตาม แนวแกนซีพบว่ามีความที่ติดลบ แสดงให้เห็นถึงความเครียดของผลึกอยู่ในรูปแบบกด และสำหรับผลึก ซิงค์ออกไซด์ที่ระนาบเด่น (002) ยังคงแสดงค่าความเครียดตามแนวซีในรูปแบบกดเช่นเดิม อีกทั้งเมื่อ พิจารณาที่จำนวนชั้นของฟิล์มบาง SD ที่เพิ่มขึ้น พบว่าแต่ละเจือไนมีความเครียดในรูปแบบ กดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้จากฟิล์มบางที่มีจำนวนชั้นที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดความเครียดสะสมใน แลตทิซมากขึ้น นอกจากนี้ตามข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SD ทั้งโครงสร้าง ซ้อนทับและสลับชั้น เมื่อนำมาคำนวณหาขนาดของเกรนผลึกในแต่ละระนาบด้วยสมการ Scherrer สามารถแสดงในตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณขนาดเกรนผลึก ZnO ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง ซ้อนทับและสลับชั้น พบว่าเมื่อฟิล์มบางรับแสงมีจำนวนชั้นที่มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดเกรนผลึกมีค่า ลดลง ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นถึงการยับยั้งการก่อรูปของผลึก ZnO เมื่อมีความหนาแน่นของผงซิลิคอนที่มาก ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามขนาดผลึก ZnO ที่คำนวณยังพบว่ามีความไม่แตกต่างจากฟิล์มบาง AZO และ BiZnO



รูปที่ 4.21 ผลการวัด XRD ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับเงื่อนไข (ก) AZO_SD และ (ข) BiZnO_SD



รูปที่ 4.22 ผลการวัด XRD ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้นเงื่อนไข (ก) AZO/SD/AZO และ (ข) BiZnO/SD/BiZnO

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณระยะระหว่างระนาบ ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกและค่าความเครียดตาม
แนวแกนซีของฟิล์มบาง SD

เงื่อนไข	ระนาบของซิลิคอน (111)			ระนาบของซิงค์ออกไซด์ (002)		
	$d_{h,k,l}$ (Å)	พารามิเตอร์ โครงผลึกซี (Å)	ϵ_{zz}	$d_{h,k,l}$ (Å)	พารามิเตอร์ โครงผลึกซี (Å)	ϵ_{zz}
AZO_SD_1L	3.126	5.414	-0.295	2.596	5.192	-0.291
AZO_SD_2L	3.126	5.414	-0.298	2.595	5.189	-0.339
AZO_SD_3L	3.125	5.413	-0.312	2.595	5.190	-0.328
AZO_SD_4L	3.125	5.412	-0.325	2.595	5.190	-0.319
AZO_SD_5L	3.125	5.413	-0.319	2.594	5.188	-0.370
BiZnO_SD_1L	3.127	5.415	-0.267	2.598	5.195	-0.230
BiZnO_SD_2L	3.125	5.413	-0.319	2.596	5.191	-0.300
BiZnO_SD_3L	3.126	5.414	-0.302	2.595	5.191	-0.317
BiZnO_SD_4L	3.126	5.414	-0.298	2.596	5.191	-0.300
BiZnO_SD_5L	3.126	5.414	-0.295	2.595	5.190	-0.328
AZO/SD/AZO_1 stack	3.130	5.421	-0.151	2.598	5.196	-0.210
AZO/SD/AZO_2 stack	3.130	5.421	-0.158	2.596	5.192	-0.294
AZO/SD/AZO_3 stack	3.130	5.422	-0.154	2.594	5.189	-0.353
AZO/SD/AZO_4 stack	3.129	5.420	-0.178	2.594	5.187	-0.375
AZO/SD/AZO_5 stack	3.131	5.420	-0.182	2.595	5.190	-0.333
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	3.129	5.429	-0.027	2.600	5.199	-0.157
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	3.129	5.420	-0.182	2.597	5.194	-0.249
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	3.129	5.419	-0.199	2.593	5.186	-0.395
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	3.128	5.421	-0.237	2.593	5.186	-0.411
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	3.127	5.416	-0.257	2.594	5.188	-0.367

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดตำแหน่งระนาบ 2 θ ค่า FWHM และผลการคำนวณขนาดผลึกของฟิล์มบาง SD

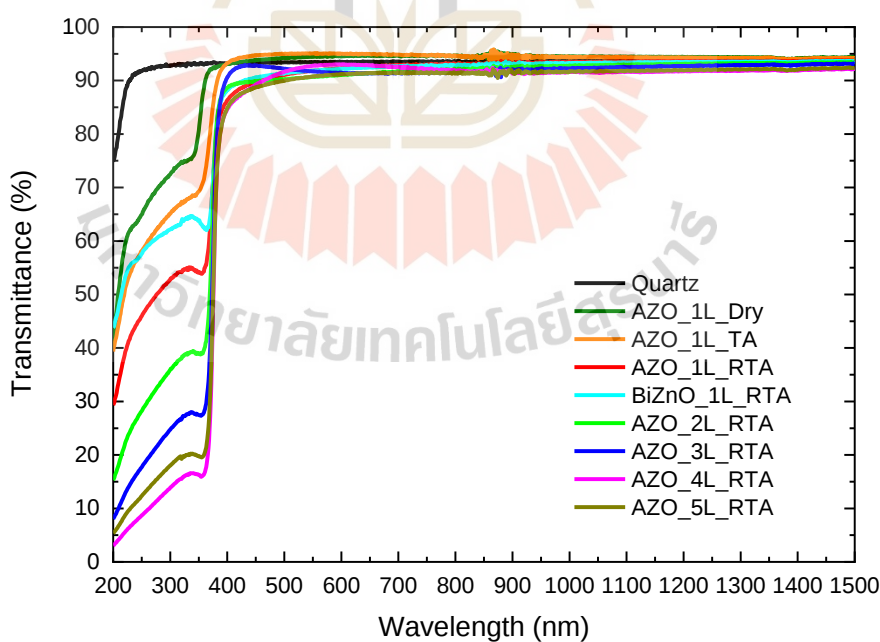
เงื่อนไข	ระนาบของซิงค์ออกไซด์									ระนาบของซิลิคอน		
	100			002			101			111		
	2 θ ($^{\circ}$)	B ($^{\circ}$)	d (nm)	2 θ ($^{\circ}$)	B ($^{\circ}$)	d (nm)	2 θ ($^{\circ}$)	B ($^{\circ}$)	d (nm)	2 θ ($^{\circ}$)	B ($^{\circ}$)	d (nm)
AZO_SD_1L	31.906	0.416	19.88	34.551	0.336	24.78	36.339	0.392	21.35	28.556	0.091	90.15
AZO_SD_2L	31.852	0.279	29.63	34.568	0.301	27.66	36.404	0.265	31.58	28.557	0.087	94.30
AZO_SD_3L	31.898	0.232	35.64	34.564	0.244	34.12	36.396	0.265	31.58	28.561	0.089	92.18
AZO_SD_4L	31.926	0.224	36.92	34.561	0.225	37.01	36.400	0.249	33.61	28.565	0.088	93.23
AZO_SD_5L	31.899	0.216	38.28	34.579	0.223	37.34	36.407	0.244	34.30	28.563	0.089	92.18
BiZnO_SD_1L	31.905	0.218	37.93	34.529	0.272	30.61	36.488	0.387	21.63	28.548	0.08	102.55
BiZnO_SD_2L	31.909	0.143	57.83	34.554	0.262	31.78	36.397	0.284	29.47	28.563	0.088	93.23
BiZnO_SD_3L	31.893	0.159	52.00	34.560	0.267	31.18	36.384	0.275	30.43	28.558	0.088	93.23
BiZnO_SD_4L	31.897	0.182	45.43	34.554	0.266	31.30	36.373	0.256	32.69	28.557	0.089	92.18
BiZnO_SD_5L	31.891	0.210	39.37	34.564	0.245	33.99	36.387	0.249	33.61	28.556	0.083	98.84
AZO/SD/AZO_1 stack	31.864	0.288	28.7	34.522	0.287	29.0	36.372	0.388	21.6	28.514	0.078	105
AZO/SD/AZO_2 stack	31.825	0.299	27.6	34.552	0.398	20.9	36.33	0.414	20.2	28.516	0.082	100
AZO/SD/AZO_3 stack	31.954	0.398	20.8	34.573	0.375	22.2	36.379	0.481	17.4	28.515	0.082	100
AZO/SD/AZO_4 stack	31.840	0.376	22.0	34.581	0.381	21.9	36.382	0.424	19.7	28.522	0.082	100
AZO/SD/AZO_5 stack	31.877	0.435	19.0	34.566	0.426	19.5	36.374	0.440	19.0	28.523	0.084	97.7
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	31.793	0.270	30.6	34.503	0.313	26.6	36.314	0.375	22.3	28.478	0.077	107
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	31.914	0.356	23.2	34.536	0.389	21.4	36.356	0.413	20.3	28.523	0.082	100
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	31.888	0.387	21.4	34.588	0.425	19.6	36.387	0.432	19.4	28.528	0.088	93.2
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	31.877	0.356	23.2	34.594	0.402	20.7	36.381	0.425	19.7	28.539	0.097	84.6
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	31.889	0.387	21.4	34.578	0.378	22.0	36.379	0.417	20.1	28.545	0.085	96.5

4.6 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วย UV-VIS-NIR

4.6.1 การศึกษาคุณสมบัติการทะลุผ่านของแสง

4.6.1.1 คุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO

ในรูปที่ 4.23 แสดงสเปกตรัม T% ของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO พบว่า ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 380 nm แสดงค่า T% ที่น้อยกว่า 75% ในทุกๆ เจือไน เมื่อพิจารณาฟิล์มบางที่ผ่านการอบแบบ Dry TA และ RTA พบว่า รูปแบบ RTA มีค่าการทะลุผ่านของแสงน้อยที่สุดที่ค่าความยาวคลื่นช่วง 200 – 380 nm ซึ่งเมื่อพิจารณาจำนวนชั้นฟิล์มบางรับแสงที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าการทะลุผ่านของแสงในทุกๆ ความยาวคลื่นมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามที่แสงความยาวคลื่นมากกว่า 380 nm พบว่าค่า T% ของฟิล์มบางรับแสง ZnO:Al และ BiZnO มีค่ามากกว่า 90% ทั้งนี้เมื่อพิจารณาคำนวณค่าเฉลี่ย T% ที่ความยาวคลื่นแสง 200 – 380 nm (Ultraviolet: UV) 380 – 780 nm (Visible: VIS) 780 – 1500 nm (Infrared: IR) และ 200 – 1500 nm สามารถแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าแสงช่วง UV มีค่าการทะลุผ่านน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแสงช่วงอื่นๆ



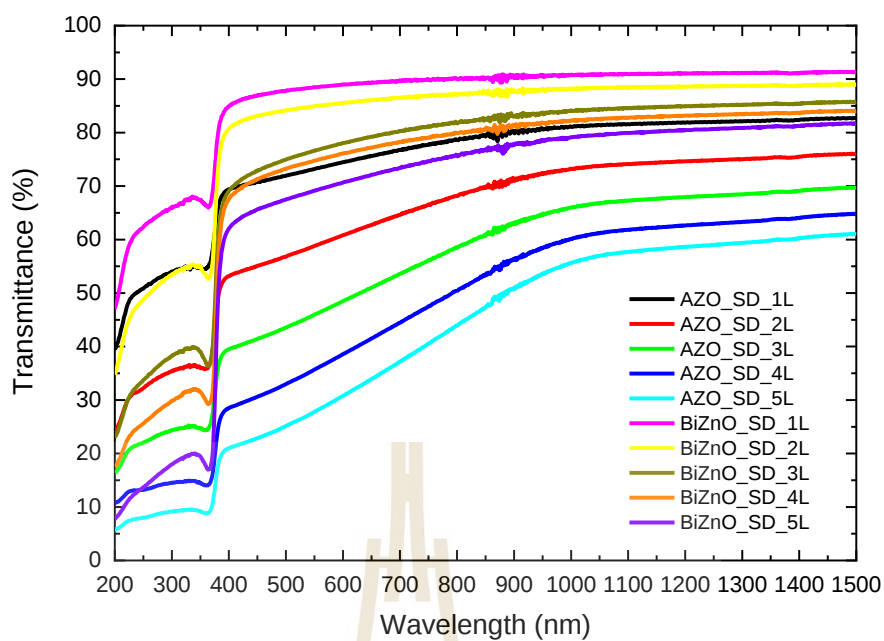
รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO

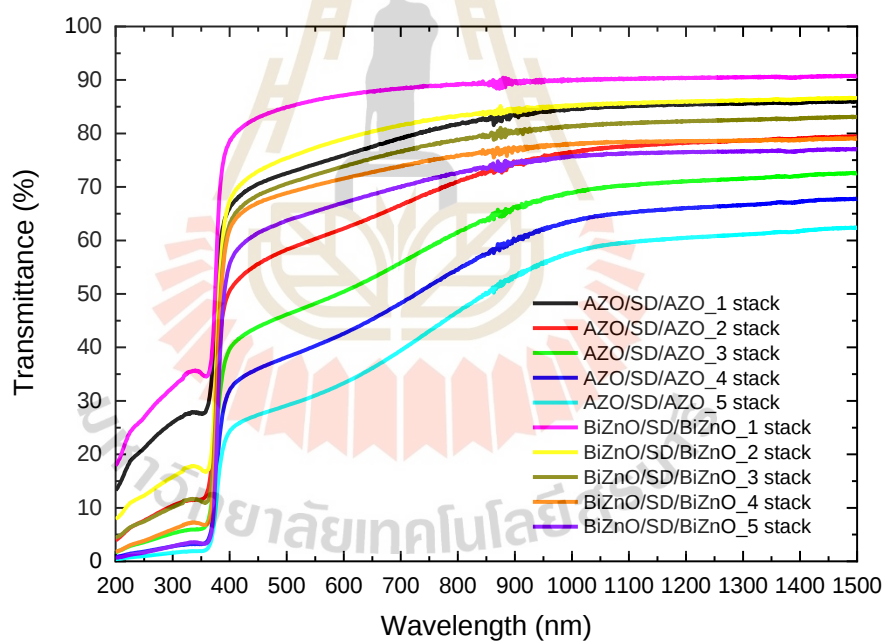
เงื่อนไข	%Transmittance: (%)			
	UV	VIS	IR	All wave range
Quartz	91.07	93.44	93.67	93.23
AZO_1L_Dry	71.02	94.27	94.41	91.12
AZO_1L_TA	62.89	94.66	94.31	90.05
AZO_1L_RTA	49.96	91.23	93.50	86.76
BiZnO_1L_RTA	60.03	91.48	93.35	88.15
AZO_2L_RTA	34.21	90.62	92.91	84.05
AZO_3L_RTA	23.70	91.46	92.47	82.60
AZO_4L_RTA	13.89	91.01	91.74	80.70
AZO_5L_RTA	17.45	89.87	91.84	80.90

4.6.1.2 คุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD

ผลการวัดค่า T% ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นสามารถแสดงในรูปที่ 4.24 เมื่อเปรียบเทียบค่าการทะลุผ่านของแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นสามารถ พิจารณาค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยในแต่ละช่วงความยาวคลื่น แสดงในตารางที่ 4.7 โดยพบว่า ทั้งสองโครงสร้างเมื่อพิจารณาจำนวนชั้นของฟิล์มบางที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการทะลุผ่านของแสงมีค่าลดลงในทุกๆ ย่านความยาวคลื่น ทั้งนี้ที่เงื่อนไขแสง UV ฟิล์มบางโครงสร้างซ้อนทับมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่ารูปแบบสลับชั้น แต่สำหรับแสง VIS และ IR ทั้งสองโครงสร้างมีค่าการทะลุผ่านของแสงที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากเมตริกซ์ AZO และ BiZnO พบว่าฟิล์มบางที่ผลิตจากเมตริกซ์ของ BiZnO ให้ค่าการทะลุผ่านของแสงที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FESEM ที่แสดงปริมาณผงซิลิคอนบนพื้นผิวของฟิล์มบางเมตริกซ์ BiZnO มีปริมาณที่น้อยกว่าฟิล์มบางเมตริกซ์ AZO ทำให้ไม่เกิดการบดบังแสงนั่นเอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD (ก) โครงสร้างซ้อนทับ และ (ข) โครงสร้างสลับชั้น

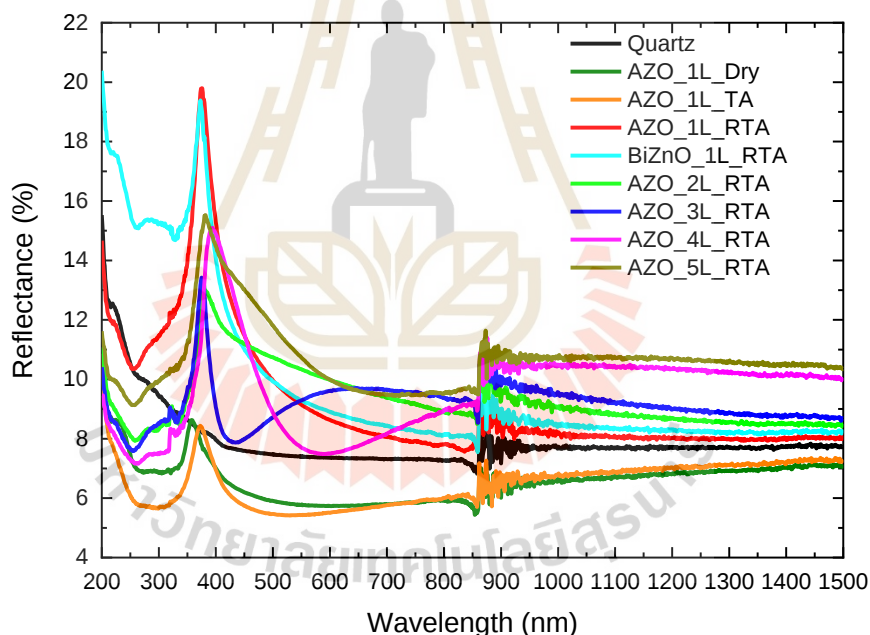
ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยของฟิล์มบาง SD

เงื่อนไข	%Transmittance: (%)			
	UV	VIS	IR	All wave range
AZO_SD_1L	52.31	73.80	81.35	75.00
AZO_SD_2L	34.05	59.96	73.56	63.90
AZO_SD_3L	23.38	47.64	66.38	54.65
AZO_SD_4L	14.09	37.70	60.59	47.10
AZO_SD_5L	8.75	30.14	56.13	41.57
BiZnO_SD_1L	63.83	88.25	90.86	86.31
BiZnO_SD_2L	50.95	84.72	88.34	82.04
BiZnO_SD_3L	35.94	76.57	84.39	75.26
BiZnO_SD_4L	28.20	74.68	82.58	72.61
BiZnO_SD_5L	16.56	69.38	79.62	67.72
AZO/SD/AZO_1 stack	25.03	74.65	84.76	73.36
AZO/SD/AZO_2 stack	10.49	60.96	76.95	62.81
AZO/SD/AZO_3 stack	5.62	49.61	69.40	54.47
AZO/SD/AZO_4 stack	3.14	41.91	64.06	48.80
AZO/SD/AZO_5 stack	1.92	33.14	58.09	42.63
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	31.26	85.59	90.14	80.57
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	15.48	76.99	85.48	73.16
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	10.15	72.16	81.67	68.82
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	6.29	70.05	78.08	65.65
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	3.29	65.29	75.80	62.51

4.6.2 การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับ

4.6.2.1 คุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO

จากการวัดค่าการสะท้อนแสงกลับของแสงในรูปแบบที่ 4.25 แสดงสเปกตรัม R% ของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO ที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 1500 nm เบื้องต้นพบว่าในที่มีความยาวคลื่นบริเวณ 380 nm มีค่า R% ที่มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การพิจารณาการสะท้อนกลับของแสงนั้นจะพิจารณาด้วยค่า %Weight Reflectance (%WR) ซึ่งได้อธิบายนิยามในหัวข้อที่ 3.2.6 ในบทที่ 3 ซึ่งผลการสรุปการคำนวณข้อมูลจะแสดงอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง UV VIS IR และ ทุกๆ ย่านคลื่นแสง สามารถแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งผลการคำนวณแสงค่าตัวเลข %WR ที่มีค่าต่ำมากกว่า 10% ในทุกๆ ช่วงที่พิจารณา ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้อย่างมากที่ฟิล์มบาง AZO และ BiZnO มีคุณสมบัติที่ดีในการทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป



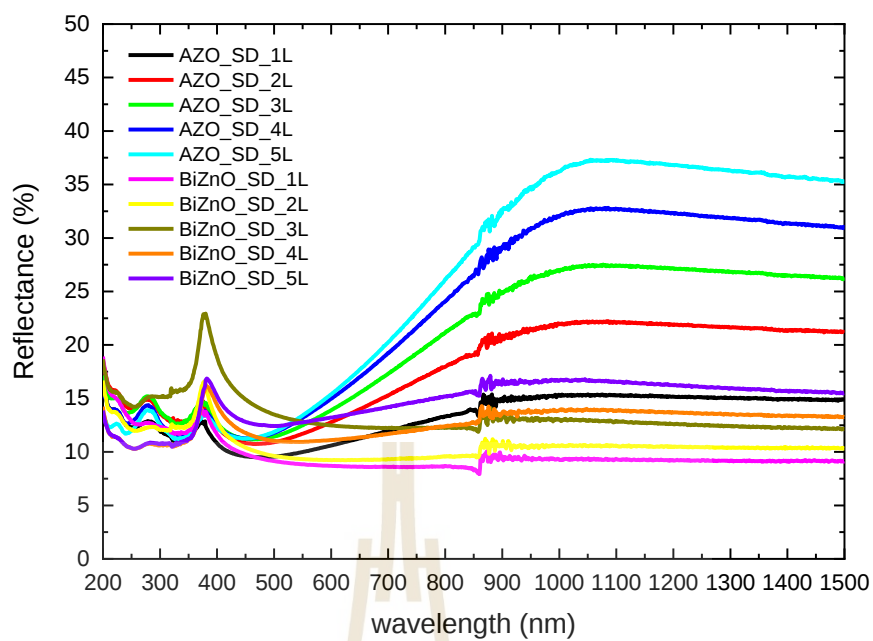
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณค่า %WR ของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

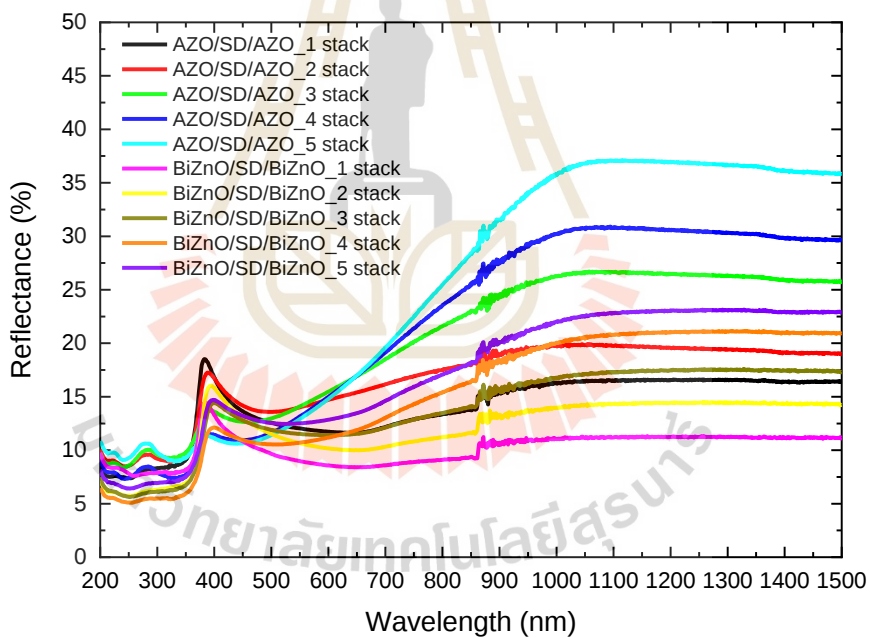
เงื่อนไข	%Weight Reflectance (%)			
	UV	VIS	IR	All wave range
Quartz	1.236	6.002	2.495	3.403
AZO_1L_Dry	1.114	4.746	1.949	2.698
AZO_1L_TA	1.029	4.574	1.995	2.656
AZO_1L_RTA	2.243	7.687	2.431	4.044
BiZnO_1L_RTA	2.386	7.706	2.525	4.122
AZO_2L_RTA	1.468	8.179	2.703	4.230
AZO_3L_RTA	1.519	7.349	2.820	4.039
AZO_4L_RTA	1.386	7.240	3.029	4.098
AZO_5L_RTA	1.763	8.720	3.144	4.680

4.6.2.2 คุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD

ผลการวัดค่า R% ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นสามารถแสดงในรูปที่ 4.26 และเมื่อคำนวณค่า %WR ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นสามารถแสดงในตารางที่ 4.9 โดยพบว่า ฟิล์มบางทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นเมื่อพิจารณาจำนวนชั้นของฟิล์มบางที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า %WR มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ ย่านความยาวคลื่น อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบค่า %WR โครงสร้างซ้อนทับ จะมีค่าที่น้อยกว่าโครงสร้างสลับชั้นเล็กน้อย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่ฟิล์มบาง SD ในเมตริกซ์ AZO จะมีค่า %WR ที่มากกว่าฟิล์มบาง SD ในเมตริกซ์ BiZnO ทั้งสองโครงสร้างสุดท้ายนี้เมื่อพิจารณาฟิล์มบางรับแสง AZO ที่จำนวน 1 ชั้น และฟิล์มบาง AZO_SD ที่จำนวน 1 ชั้นพบว่าฟิล์มบางที่มีการเติมผงซิลิคอนจะช่วยลดการสะท้อนแสงกลับในช่วงคลื่นแสง UV แต่จะเพิ่มช่วง VIS และ IR แทน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบางรับแสง SD (ก) โครงสร้างซ้อนทับ และ (ข) โครงสร้างสลับชั้น

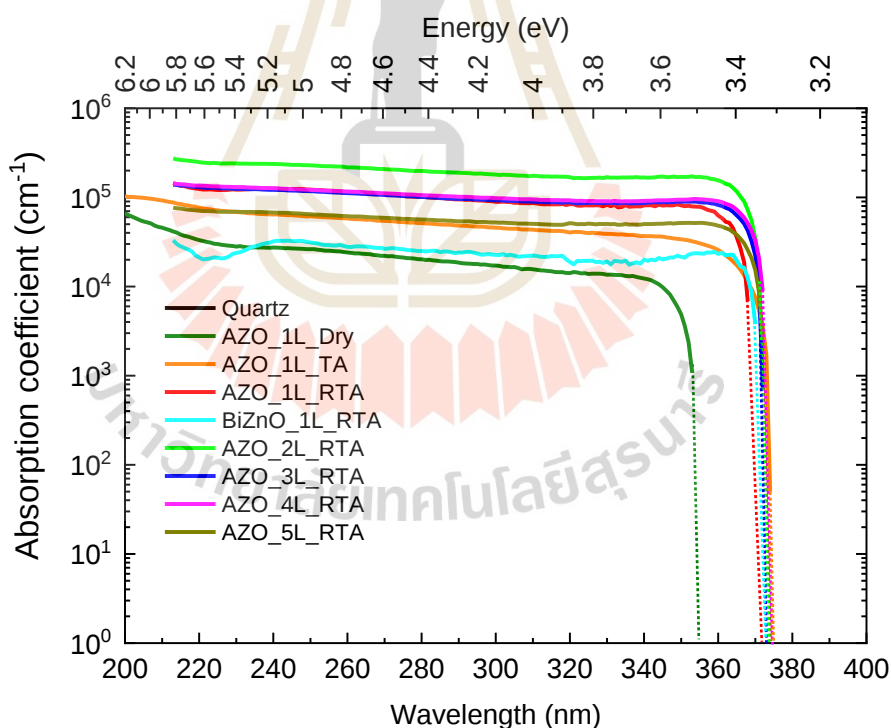
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่า %WR ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น

เงื่อนไข	%Weight Reflectance (%)			
	UV	VIS	IR	All wave range
AZO_SD_1L	1.707	8.574	4.430	5.315
AZO_SD_2L	1.936	10.372	6.265	6.897
AZO_SD_3L	1.945	11.302	7.632	7.923
AZO_SD_4L	1.758	12.086	8.979	8.863
AZO_SD_5L	1.743	12.466	10.079	9.570
BiZnO_SD_1L	1.795	7.288	2.745	4.022
BiZnO_SD_2L	1.962	7.826	3.103	4.407
BiZnO_SD_3L	2.601	10.731	3.822	5.797
BiZnO_SD_4L	1.767	9.292	4.042	5.340
BiZnO_SD_5L	1.785	10.775	4.859	6.246
AZO/SD/AZO_1 stack	1.625	10.156	4.673	5.928
AZO/SD/AZO_2 stack	1.581	12.003	5.728	7.066
AZO/SD/AZO_3 stack	1.518	12.352	7.507	8.121
AZO/SD/AZO_4 stack	1.211	11.909	8.537	8.489
AZO/SD/AZO_5 stack	1.409	11.949	9.960	9.295
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	1.354	7.565	3.185	4.279
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	1.170	9.006	4.013	5.148
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	1.092	9.681	4.824	5.783
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	0.966	9.344	5.716	6.137
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	1.214	10.819	6.284	6.941

4.6.3 การศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง

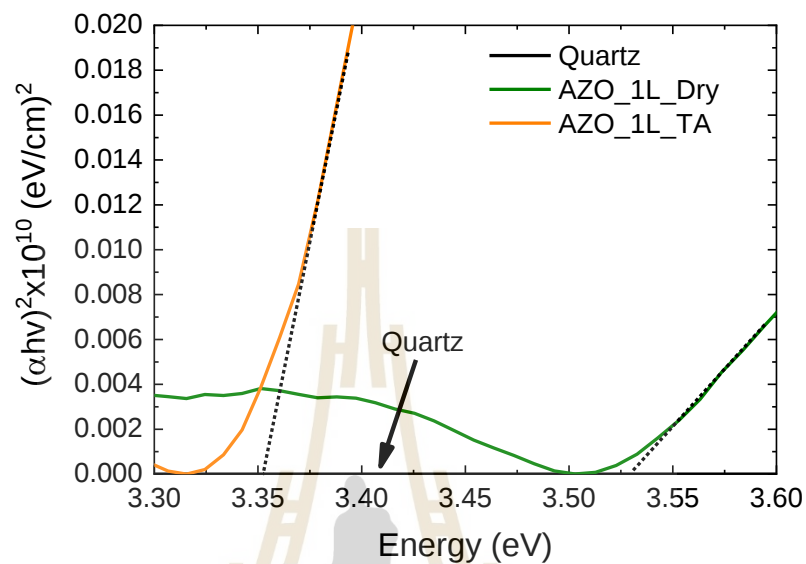
4.6.3.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO

รูปที่ 4.27 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางรับแสงกลุ่มนี้ ดูดกลืนแสงเฉพาะช่วงค่าความยาวคลื่นแสง UV เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้หาพิจารณาที่ขอบการดูดกลืนแสง (Absorption edge) ที่แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าฟิล์มบาง AZO ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 200 °C แสดงการดูดกลืนขอบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 355 nm หรือที่บริเวณพลังงานโฟตอน 3.5 eV แต่สำหรับฟิล์มบาง AZO หรือ BiZnO ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 550 °C และด้วยวิธี RTA ที่อุณหภูมิ 930 °C พบว่าขอบการดูดกลืนแสงสามารถขยายจนถึง 370 nm หรือที่บริเวณ 3.3 eV เนื่องจากผลของการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัม (Quantum confinement) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของวัสดุได้ (Repp, and Erdem, 2016)

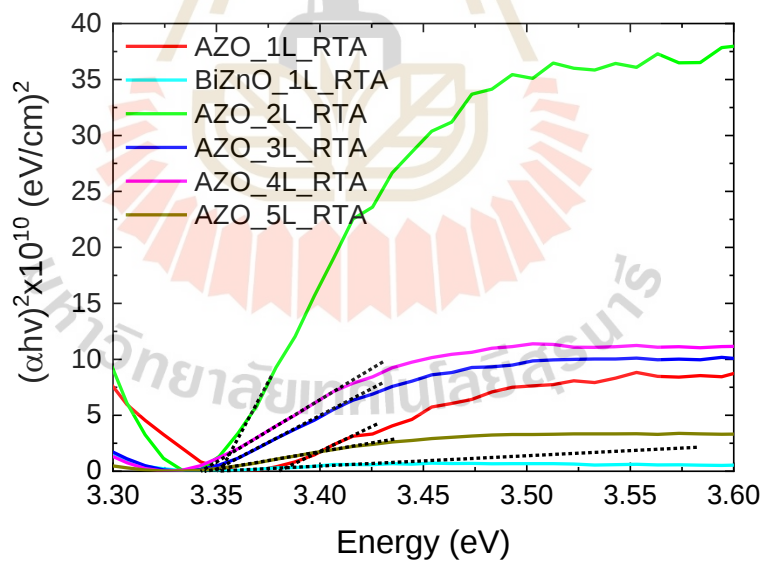


รูปที่ 4.27 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

ฟิล์มบางรับแสง ZnO เป็นวัสดุชนิด Direct bandgap สามารถพิจารณาให้ค่าดัชนีกำลังในสมการที่ 3.7 จากบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.6 มีค่าเท่ากับ 0.5 จะได้กราฟ Tauc's plot แสดงในรูปที่ 4.28 และผลการประมาณค่า E_g แสดงในตารางที่ 4.9



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.28 Tauc's plot ของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

ตารางที่ 4.10 ขอบการดูดกลืนแสงและผลการประมาณค่าแถบพลังงานช่องว่างของฟิล์มบาง AZO
ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

เงื่อนไข	ขอบการดูดกลืนแสง		การประมาณค่า E_g (eV)
	nm	eV	
Quartz	131	9.470*	9.470*
Q/AZO_1L_Dry	354.786	3.495	3.530
Q/AZO_1L_TA	374.949	3.307	3.352
Q/AZO_1L_RTA	371.772	3.335	3.380
Q/BiZnO_1L_RTA	372.851	3.326	3.350
Q/AZO_2L_RTA	373.686	3.318	3.352
Q/AZO_3L_RTA	373.035	3.324	3.349
Q/AZO_4L_RTA	374.623	3.310	3.342
Q/AZO_5L_RTA	374.114	3.314	3.344

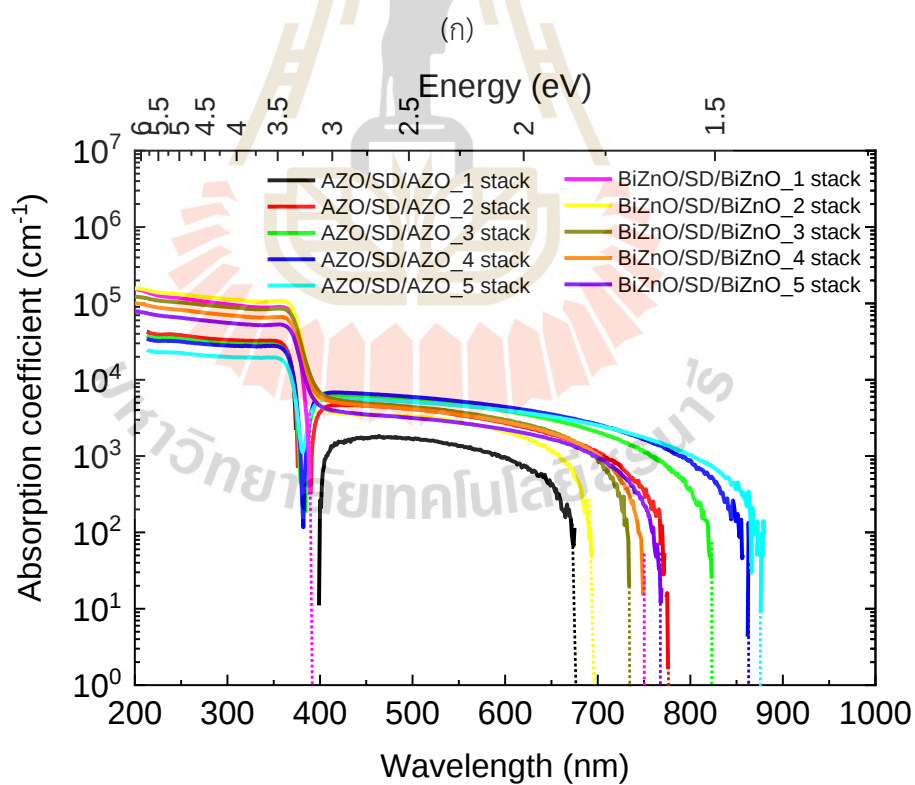
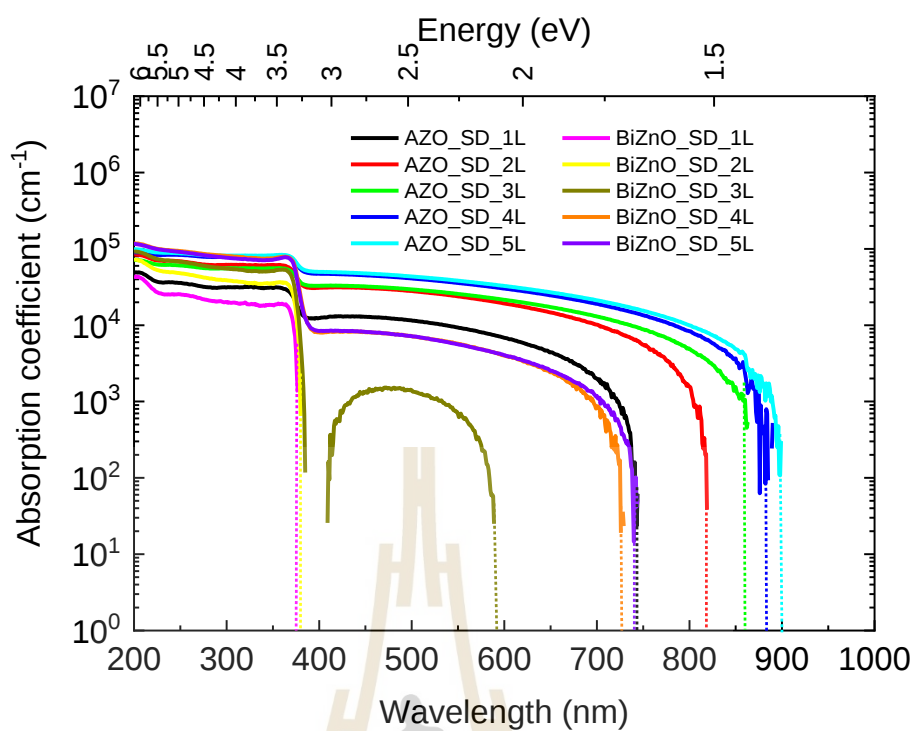
หมายเหตุ * อ้างอิงจาก Güler, E., Uğur, G., Uğur, Ş, and Güler, M. (2020)

จากผลการประมาณค่าแถบพลังงานช่องว่างด้วย Tauc's plot พบว่าผลที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับการประมาณขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO ทั้งนี้ในเงื่อนไขฟิล์มบาง AZO ที่มีการอบด้วย TA และ RTA แสดงค่า E_g ที่ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Dry เนื่องจากมีความเป็นไปได้จากเกรนนาโนผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น จำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในผลึก ทำให้เกิดการจำกัดพลังงานเชิงควอนตัม (Quantum confinement) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Quantize effect ที่ทำให้ระดับ E_g เปลี่ยนแปลง (Movlaroooy, 2018) นอกจากนี้ความเครียดในโครงผลึกแลตทิซของฟิล์มบางจากผลของ XRD เป็นรูปแบบกด สามารถส่งผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงของค่า E_g ได้เช่นเดียวกัน (Xu, Hou, Guo, Li Yong, Li Cong, 2019) อย่างไรก็ตามการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO สามารถดูดกลืนแสงช่วง UV ได้เพียงอย่างเดียว

4.6.3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD

ในการพิจารณาการประมาณแถบพลังงานช่องว่างของฟิล์มบางรับแสง SD ทั้งโครงสร้างชั้นทับและสลับชั้น จะพิจารณาโดยใช้กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเท่านั้น เนื่องจากฟิล์มบางรับแสง SD เป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite material) ระหว่าง Si และ ZnO ที่เป็นวัสดุชนิด Indirect bandgap และ Direct bandgap ซึ่งไม่สามารถนำมาคำนวณด้วยสมการของ Tauc ได้ ดังนั้นจึงพิจารณาให้ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางรับแสง SD คือการประมาณค่าจากขอบการดูดกลืนแสง ซึ่งจากรูปกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง SD โครงสร้างชั้นทับและสลับชั้น แสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งพบว่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง SD เกิดการเลื่อนขยายของขอบการดูดกลืนแสงออกมาจากแสง UV ถึงบริเวณแสง IR นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อจำนวนของชั้น SD ทั้งโครงสร้างชั้นทับและสลับชั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขอบการดูดกลืนแสงขยายออกมาในรูปแบบ Red shift ซึ่งการประมาณค่าขอบการดูดกลืนแสงสามารถแสดงในตารางที่ 4.11

จากตารางที่ 4.11 พบว่าฟิล์มบางรับแสง SD แสดงขอบการดูดกลืนแสงที่มีค่าที่ถูกขยายแบบ Red shift เมื่อเงื่อนไขจำนวนชั้น SD ที่มากขึ้นทั้งโครงสร้างชั้นทับและสลับชั้น โดยฟิล์มบางรับแสง SD ในเมตริกซ์ AZO สามารถขยายขอบการดูดกลืนแสงได้มากกว่า BiZnO ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณผงซิลิคอนบนแผ่นฐานที่มากกว่า ทำให้ขีดจำกัดของฟิล์มบางรับแสง SD ในเมตริกซ์ AZO สามารถดูดกลืนแสงที่เป็นค่าความยาวคลื่นช่วง IR ในขณะที่ฟิล์มบางรับแสง SD ในเมตริกซ์ BiZnO สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดอยู่ในช่วงปลายของคลื่นแสง VIS อย่างไรก็ตามคุณลักษณะของการขยายแถบพลังงานช่องว่างจากอิทธิพลของผงซิลิคอนในเมตริกซ์ซึ่งคือออกไซด์นี้ มีความเป็นไปได้กับการนำมาประยุกต์ใช้กับฟิล์มบางในเมตริกซ์ชนิดอื่น เช่น Phosphosilicate-glass Cadmium-sulphide Cadmium-telluride และ Titanium dioxide เป็นต้น เพื่อปรับขอบการดูดกลืนแสงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงหรือประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ชั้นทับ และ (ข) สลับชั้น

ตารางที่ 4.11 ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น

เงื่อนไข	ขอบการดูดกลืนแสง	
	nm	eV
AZO_SD_1L	743.38	1.668
AZO_SD_2L	818.33	1.515
AZO_SD_3L	860.04	1.442
AZO_SD_4L	883.34	1.404
AZO_SD_5L	899.96	1.378
BiZnO_SD_1L	375.15	3.305
BiZnO_SD_2L	379.88	3.264
BiZnO_SD_3L	591.85	2.095
BiZnO_SD_4L	726.93	1.706
BiZnO_SD_5L	740.45	1.675
AZO/SD/AZO_1 stack	676.41	1.833
AZO/SD/AZO_2 stack	776.46	1.597
AZO/SD/AZO_3 stack	823.06	1.507
AZO/SD/AZO_4 stack	862.97	1.437
AZO/SD/AZO_5 stack	875.68	1.416
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	391.61	3.166
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	695.80	1.782
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	734.58	1.688
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	750.22	1.653
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	767.66	1.615

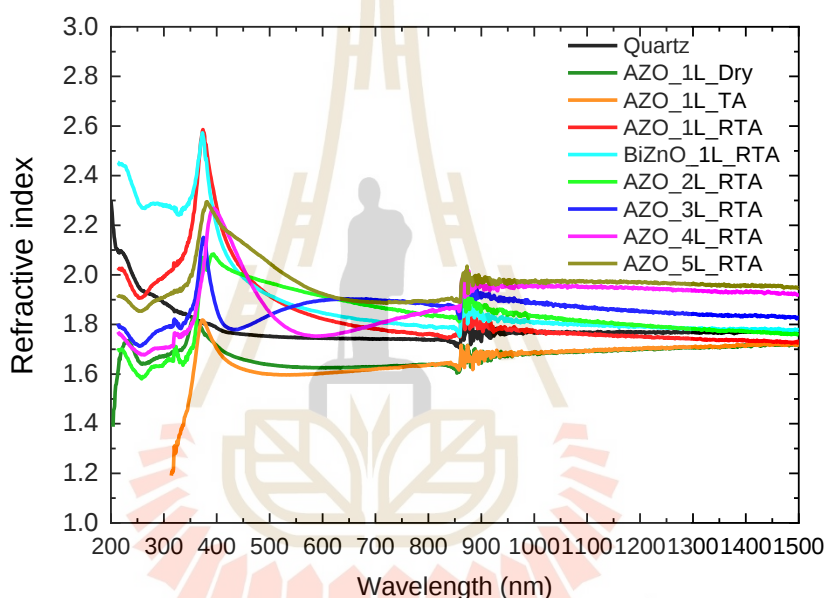
4.6.4 การศึกษาค่าดัชนีหักเหของแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสง

4.6.4.1 ค่าดัชนีหักเหของแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO

รูปที่ 4.30 แสดงกราฟดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO ซึ่งพบว่ามีความถี่น้อยกว่า 3.2 ในทุกๆ ช่วงความยาวคลื่น เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นที่ 600 nm แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านการอบแบบ Dry และ TA มีค่าดัชนีหักเหแสงที่น้อยกว่าฟิล์มบางที่ผ่านการอบแบบ RTA แต่สำหรับฟิล์มบางรับแสงที่ผ่านการอบแบบ RTA จะมีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ในช่วง 1.7 – 1.9 โดยจะสังเกตได้ว่า เมื่อจำนวนชั้นฟิล์มบางรับแสงมากขึ้น จะส่งผล

ให้มีค่าดัชนีหักเหแสงที่มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางรับแสงระหว่าง AZO และ BiZnO พบว่าค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

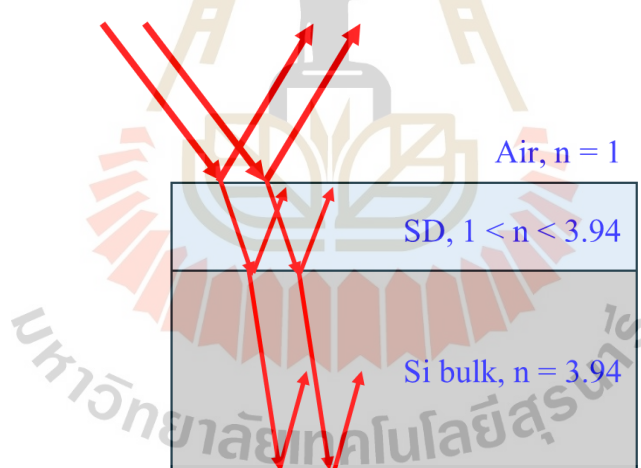
อย่างไรก็ตามค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO แต่ละเงื่อนไขไม่ได้มีค่าที่สูงกว่าค่าของ Si ที่มีค่าเท่ากับ 3.94 ที่ความยาวคลื่น 600 nm (Green, 2008) ดังนั้นจากกฎการหักเหแสงของ สเนลล์ (Snell's law) เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบางที่ด้านบนที่มีค่าน้อยกว่าชั้นด้านล่าง แสงจะเกิดการหักเหลงด้านล่าง แสดงแบบจำลองในรูปที่ 4.31 ดังนั้นจากค่าดัชนีหักเหของแสงพบว่า เป็นค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการเป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน



รูปที่ 4.30 ค่าดัชนีหักเหแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 1500 nm ของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

ตารางที่ 4.12 ค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

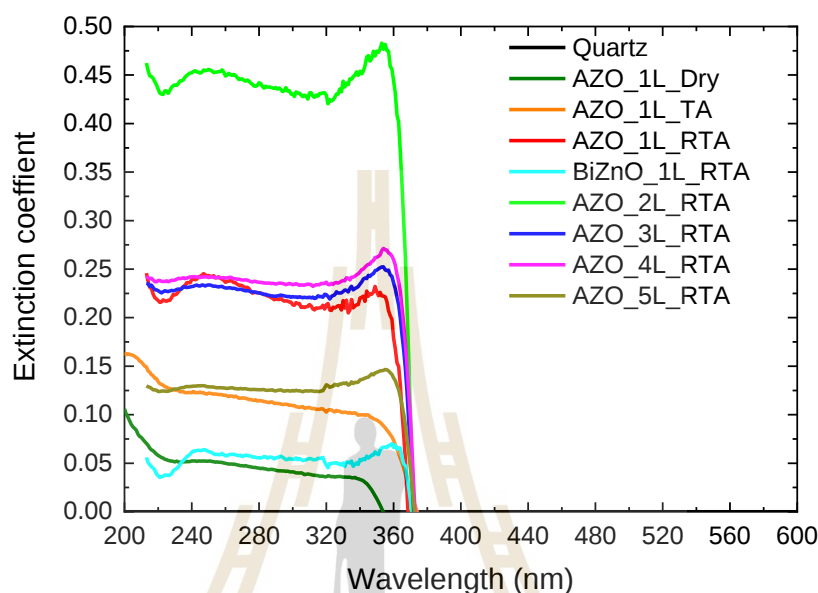
เงื่อนไข	ค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความคลื่น 600 nm
Quartz	1.745
AZO_1L_Dry	1.626
AZO_1L_TA	1.602
AZO_1L_RTA	1.823
BiZnO_1L_RTA	1.847
AZO_2L_RTA	1.914
AZO_3L_RTA	1.897
AZO_4L_RTA	1.754
AZO_5L_RTA	1.924



รูปที่ 4.31 แบบจำลองการหักเหของแสงของฟิล์มบาง

จากรูปที่ 4.32 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO โดยพบว่าฟิล์มบางมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงอยู่เฉพาะที่บริเวณความยาวคลื่นแสง UV โดยเงื่อนไขฟิล์มบาง AZO ที่ผ่านการอบแบบ Dry ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการอบฟิล์มบางด้วยวิธี TA และ RTA เนื่องจากการสูญเสียของแสงจะแสดงถึงคุณสมบัติ 2 รูปแบบ คือการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนของแสงของวัสดุและการกระเจิงของแสง ซึ่งจากรูปสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง AZO ในหัวข้อ 4.5.3.1 จะพบว่า

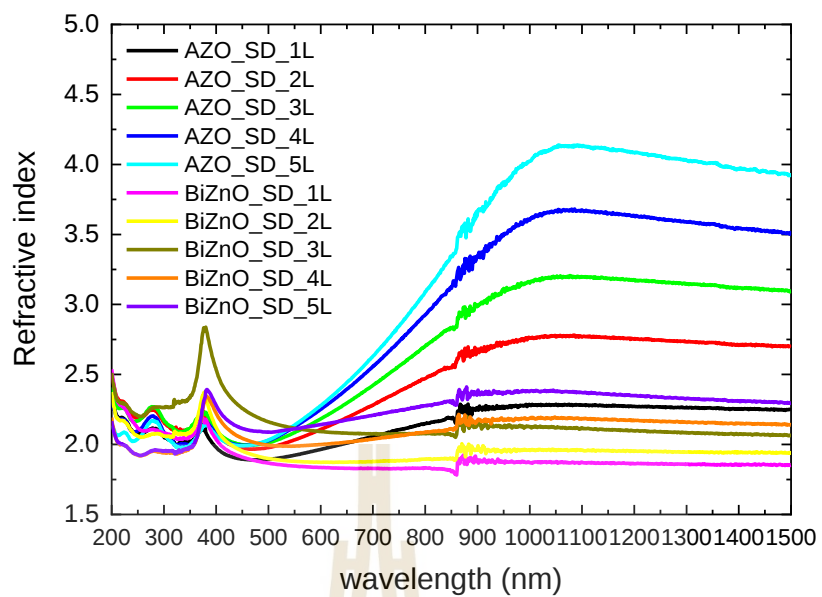
ที่ฟิล์มบางเงื่อนไข AZO_2L มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การสูญหายนี้เกิดจากการดูดกลืนของแสง อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสงมีค่าที่ต่ำมาก ซึ่งมีผลกระทบที่น้อยมากหากพิจารณากับการนำมาประยุกต์เป็นชั้นรับแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์



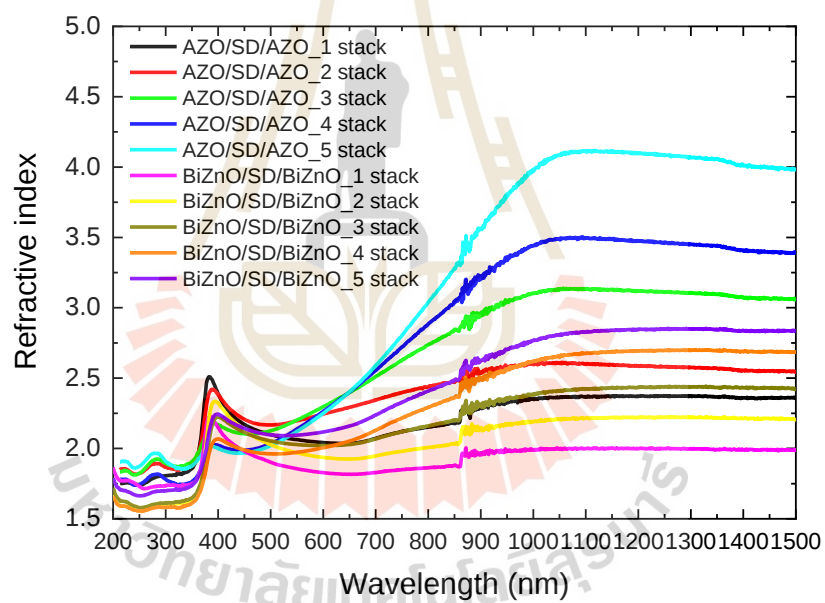
รูปที่ 4.32 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

4.6.4.2 ค่าดัชนีหักเหของแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD

รูปที่ 4.33 (ก) และรูปที่ 4.33 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 200 – 1500 nm ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อฟิล์มบางมีจำนวนชั้นที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับช่วงคลื่นแสงที่พิจารณา อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นที่ 600 nm แสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าฟิล์มบาง SD มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่น้อยกว่า 3.94 ซึ่งยังคงมีคุณสมบัติการหักเหแสงให้ตกกระทบกับแผ่นฐานซิลิคอนที่อยู่ข้างใต้ฟิล์มบางได้ตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) แต่สำหรับฟิล์มบาง SD ในสารละลายเมตริกซ์ AZO ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นที่มีจำนวน 5 ชั้น พบว่า ณ ค่าความยาวคลื่นแสงที่ 1100 nm มีค่าดัชนีหักเหแสงมากกว่า 4 ทำให้แสงช่วงนี้เกิดการหักเหออก ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำมาเป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน



(ก)



(ข)

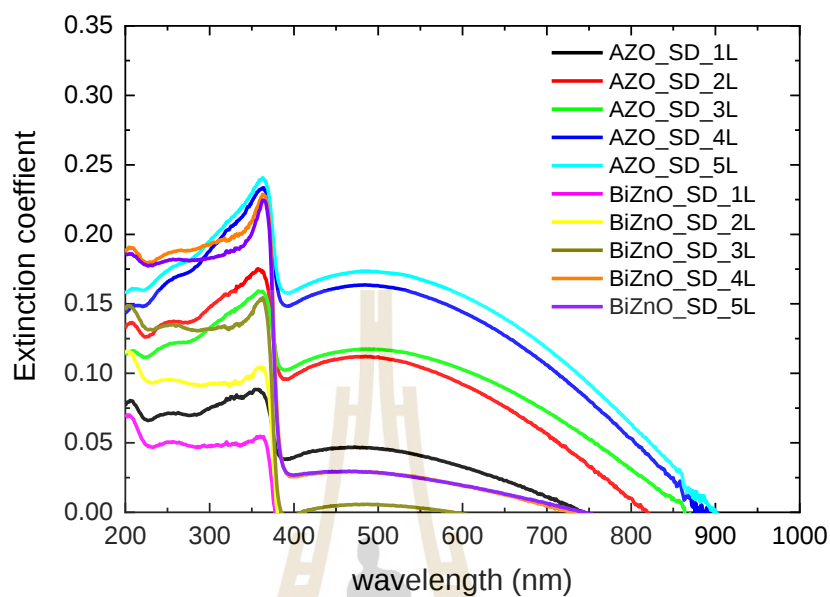
รูปที่ 4.33 ค่าดัชนีหักเหแสง ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น

ตารางที่ 4.13 ค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น

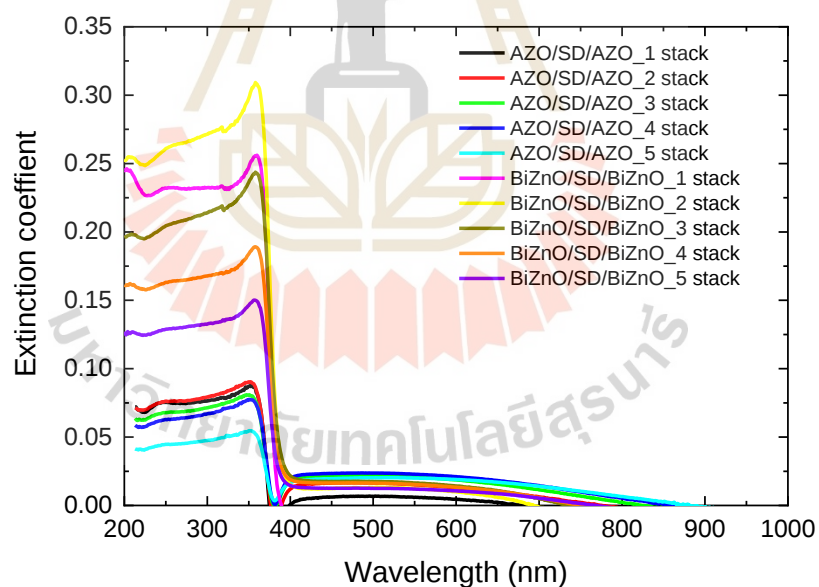
เงื่อนไข	ค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความคลื่น 600 nm
AZO_SD_1L	1.965
AZO_SD_2L	2.108
AZO_SD_3L	2.183
AZO_SD_4L	2.251
AZO_SD_5L	2.277
BiZnO_SD_1L	1.836
BiZnO_SD_2L	1.873
BiZnO_SD_3L	2.092
BiZnO_SD_4L	1.999
BiZnO_SD_5L	2.142
AZO/SD/AZO_1 stack	2.041
AZO/SD/AZO_2 stack	2.245
AZO/SD/AZO_3 stack	2.297
AZO/SD/AZO_4 stack	2.263
AZO/SD/AZO_5 stack	2.250
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	1.828
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	1.936
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	2.020
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	2.005
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	2.117

จากรูปที่ 4.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD เมื่อพิจารณาที่ค่าความยาวคลื่นช่วงแสง UV พบว่า เงื่อนไขฟิล์มบาง SD ทั้งในเมตริกซ์ AZO และ BiZnO โครงสร้างซ้อนทับ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนชั้นที่มากขึ้น ในขณะที่ฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้นมีค่าลดลง ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าแสงเกิดการกระเจิงมากกว่าการดูดกลืนเนื่องจากผลึกซิงโครไดต์ที่มีปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางรับแสง SD ทั้ง 2 โครงสร้างมีการสูญเสียทางแสงเพิ่มมากกว่าฟิล์มบาง AZO และ BiZnO โดยกราฟ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงแสดงการขยายมายังบริเวณแสง VIS และ IR ซึ่งฟังก์ชันคอนมืปริมาณที่มากขึ้นหรือจำนวนชั้นมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการขยายขอบการสูญเสียที่มากขึ้น



(ก)

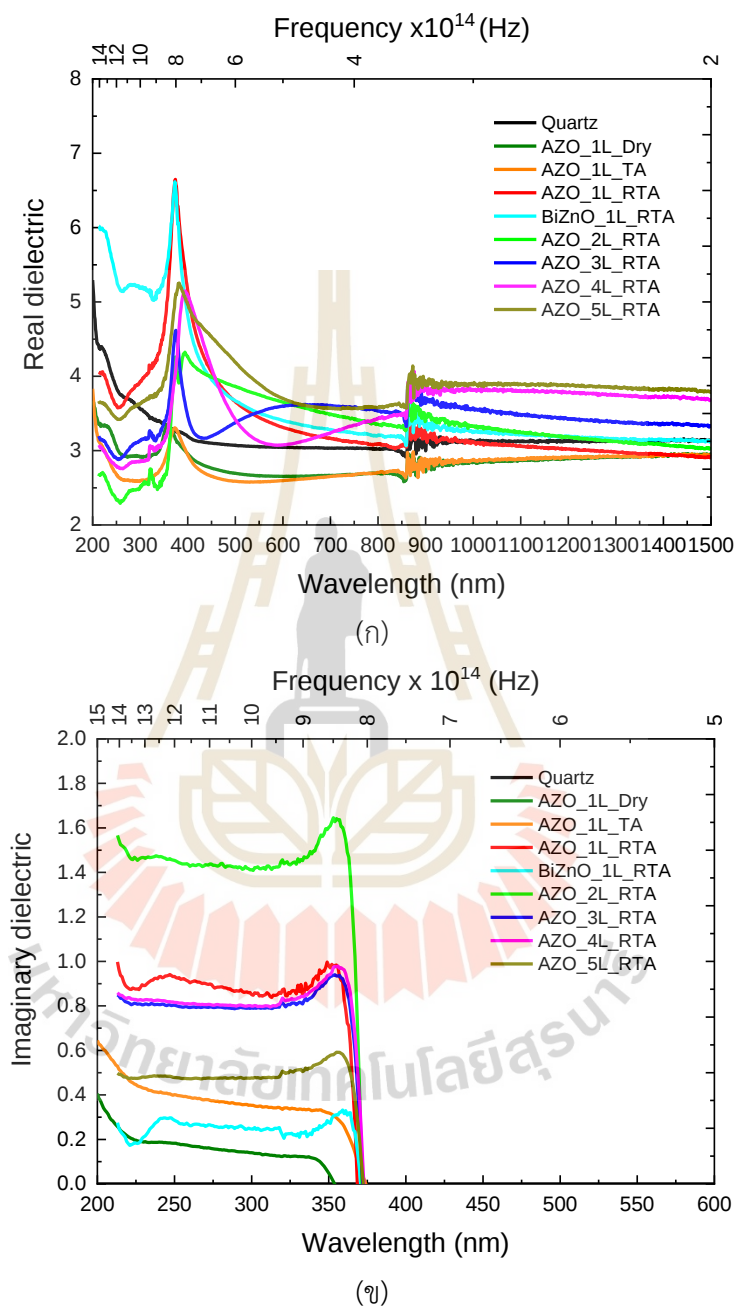


(ข)

รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น

4.6.5 การศึกษาค่าไดอิเล็กทริก

4.6.5.1 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO



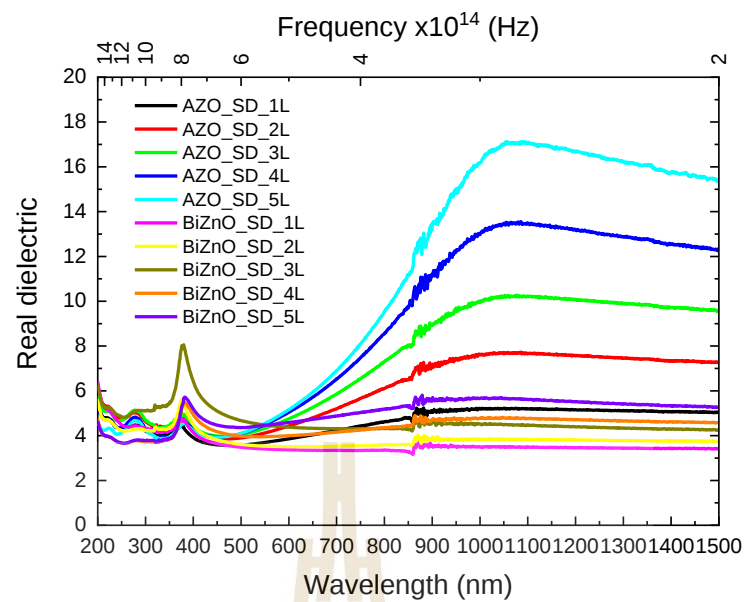
รูปที่ 4.35 (ก) ค่าไดอิเล็กทริกจริง และ (ข) ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

รูปที่ 4.35 (ก) แสดงค่าไดอิเล็กทริกจริงของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าไดอิเล็กทริกที่แสง UV พบว่ามีค่ามากกว่าแสง VIS และ IR และสำหรับรูปที่ 4.35 (ข) แสดงค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO โดยพบว่าที่แสง UV มีค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพที่บริเวณนี้เพียงอย่างเดียว

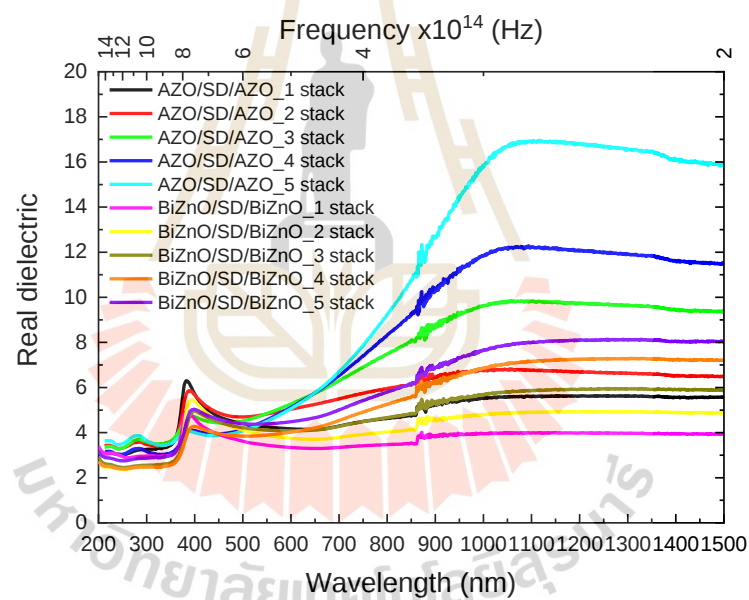
4.6.5.2 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น

รูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.36 แสดงค่าไดอิเล็กทริกจริงและค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 4.36 (ก) และรูปที่ 4.36 (ข) ค่าไดอิเล็กทริกจริงช่วงแสง UV และ VIS แสดงค่าไดอิเล็กทริกไม่เกิน 8 ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มบาง AZO และ BiZnO อย่างไรก็ตาม ที่แสงช่วง IR มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงเพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกลุ่มฟิล์มบาง SD ในเมตริกซ์ของ AZO ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น และสำหรับค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพที่ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นแสดงในรูปที่ 4.37 (ก) และรูปที่ 4.37 (ข) ตามลำดับ พบว่าค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพมีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกๆ ช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณา ทั้งนี้เนื่องด้วยอิทธิพลของผงซิลิคอนทำให้เกิดค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพขยายมายังบริเวณความยาวคลื่นแสงช่วง VIS และ UV ตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากพิจารณาช่วงแสง UV จะพบว่ามีค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับแสง VIS และ IR



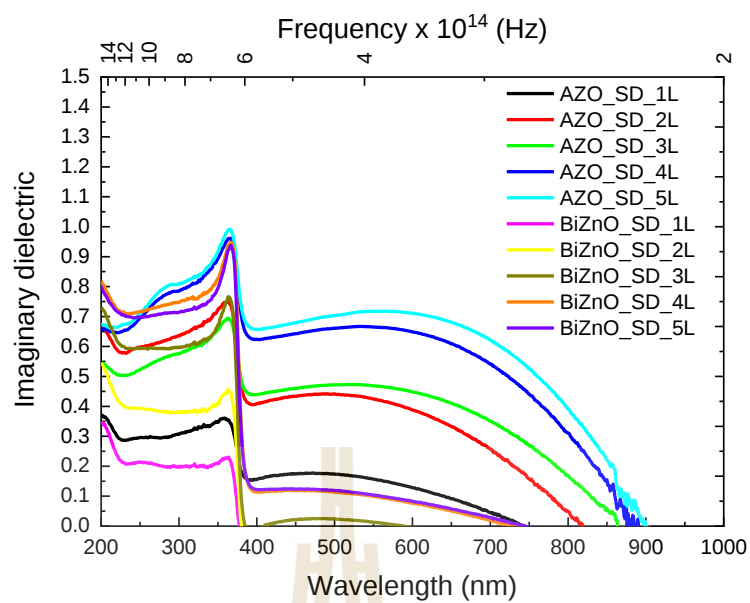


(ก)

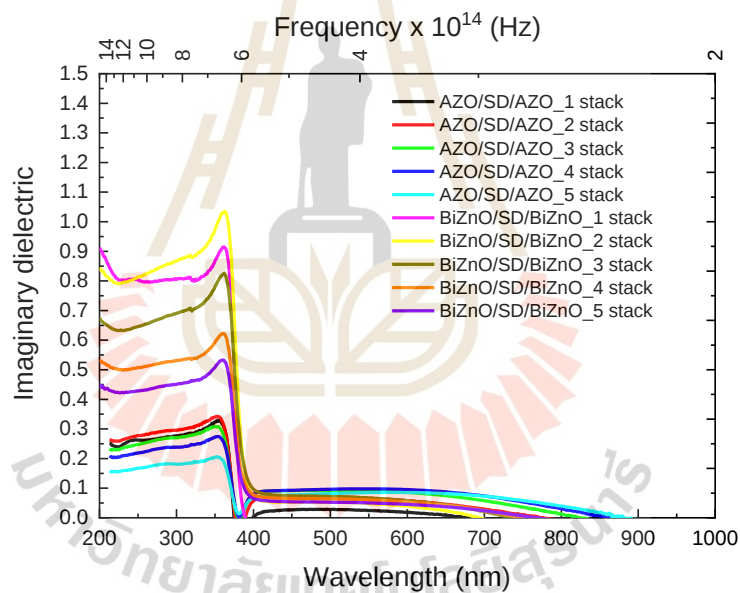


(ข)

รูปที่ 4.36 ค่าไดอิเล็กทริกจริงของฟิล์มบาง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น



(ก)

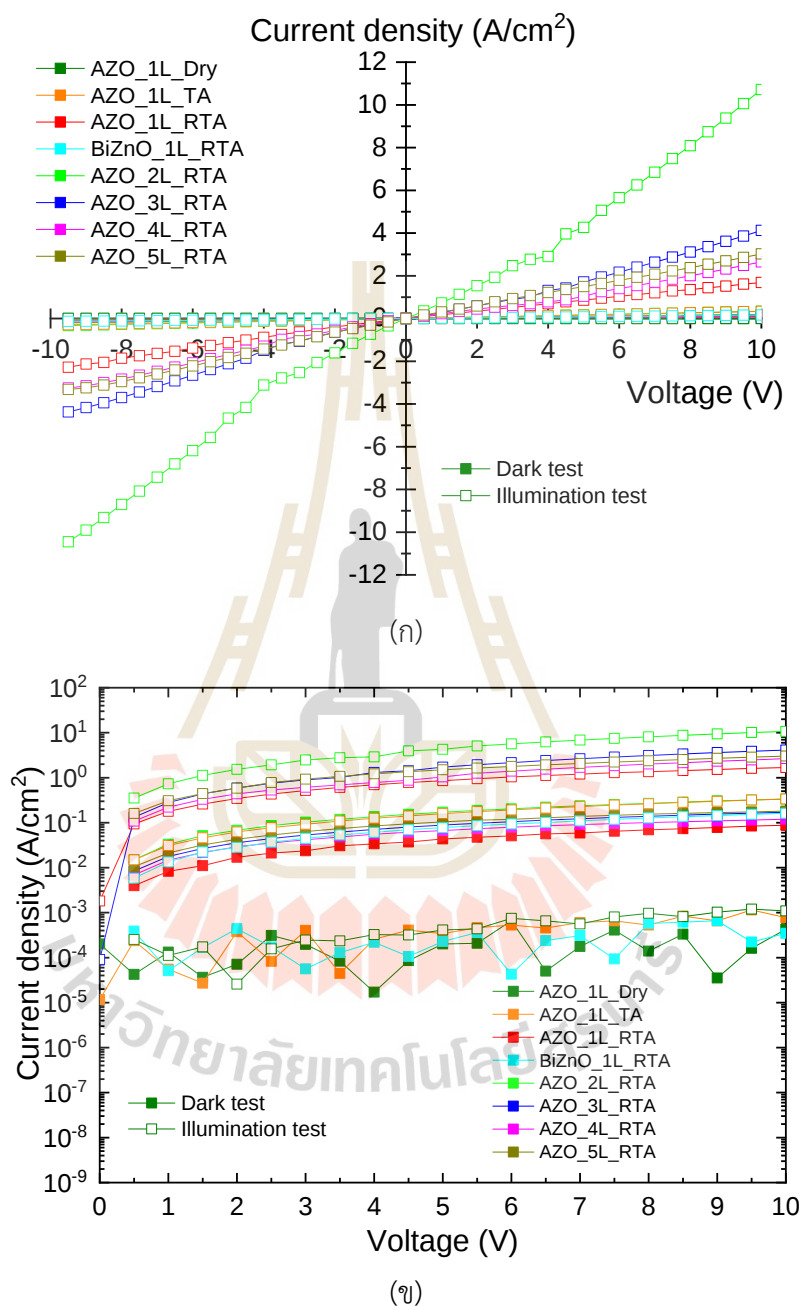


(ข)

รูปที่ 4.37 ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพของฟิล์มบาง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น

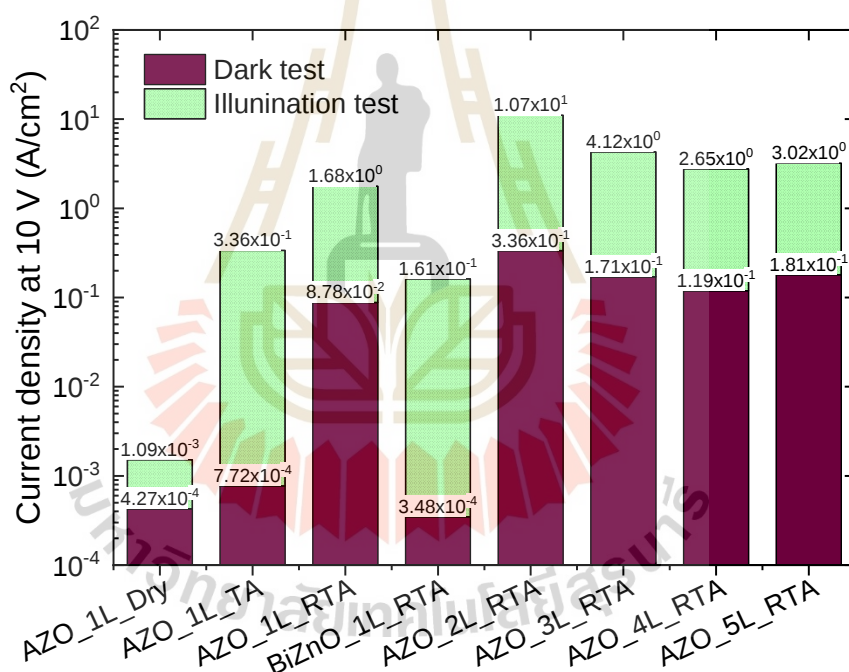
4.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย 2-probe

4.7.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO ในรูปแบบ (ก) Linear และ (ข) Semi-log

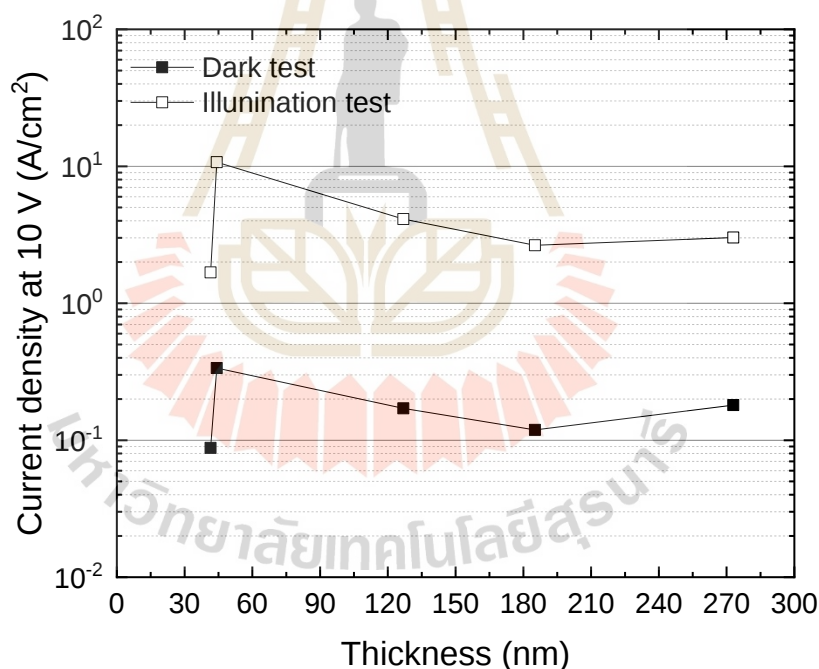
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO สามารถพิจารณาได้ 2 รูปแบบคือรูปแบบ Linear และ Semi-log ที่แสดงในรูปที่ 4.38 (ก) และรูปที่ 4.38 (ข) ตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 4.38 (ก) พบว่ารูปกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งบ่งชี้ถึงคุณลักษณะของ Ohmic contact ระหว่างขั้วโลหะไฟฟ้าและฟิล์มบาง โดยคุณลักษณะนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการยินยอมให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้ง 2 ทิศทาง ทั้งนี้เมื่อมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าใดๆ จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงตามกฎของโอห์ม สำหรับรูปที่ 4.38 (ข) รูปแบบกราฟ Semi-log แสดงความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง AZO และ BiZnO พบว่าฟิล์มบางเกิด Photo-generation ขึ้น ทำให้ภายใต้สภาวะสว่างมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าที่ 10 V สามารถแสดงกราฟในรูปที่ 4.39



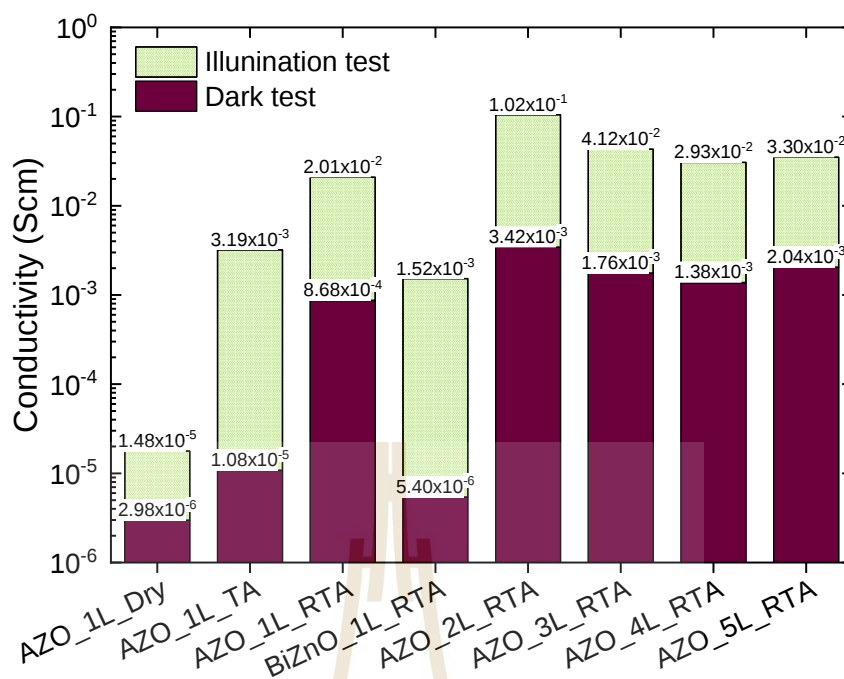
รูปที่ 4.39 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 10 V ภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

จากรูปที่ 4.39 พบว่าฟิล์มบาง AZO ในเงื่อนไขการอบแบบ Dry เกิด Photo-generation น้อยมากที่สุด ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากฟิล์มบางในเงื่อนไขนี้ไม่มีการก่อรูปของผลึกซึ่งคือออกไซด์ที่เป็นแหล่งกำเนิดของพาหะอิเล็กตรอน ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่ไม่ปรากฏยอดของผลึกใดๆ อย่างไรก็ตามฟิล์มบาง AZO ที่ผ่านการอบแบบ TA และ RTA และฟิล์มบาง BiZnO ที่ผ่านการอบแบบ RTA แสดงการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อพิจารณาฟิล์มบาง AZO และ BiZnO ที่มีจำนวน 1 ชั้น พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง AZO มีค่าที่สูงกว่าประมาณ 10 เท่าในสภาวะสว่าง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาอัตราขยายเนื่องจากแสง (Photo current gain) จะพบว่าฟิล์มบาง BiZnO สามารถเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้มากถึง 1000 เท่า ในขณะที่ฟิล์มบาง AZO ที่มีจำนวนชั้น 1 – 5 ชั้นสามารถมีอัตราขยายเพียง 10 – 100 เท่า และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์มบาง AZO เป็น 2 - 5 ชั้นพบว่ามีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นกว่าฟิล์มบางที่มีจำนวน 1 ชั้น เนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มบางถูกปรับปรุงให้มีความเป็น Homogeneous มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM และยังสามารถแสดงผลของ Grain boundary ระหว่างหน้าสัมผัสของขอบเกรนผลึกได้อีกด้วย โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาของฟิล์มบาง AZO จะพบว่าที่ความหนาประมาณ 45 nm ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดแสดงในรูปที่ 4.40 นอกจากนี้ค่า Conductivity ที่แสดงในรูปที่ 4.41 ในสภาวะสว่างมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นเป็นเช่นเดียวกันกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



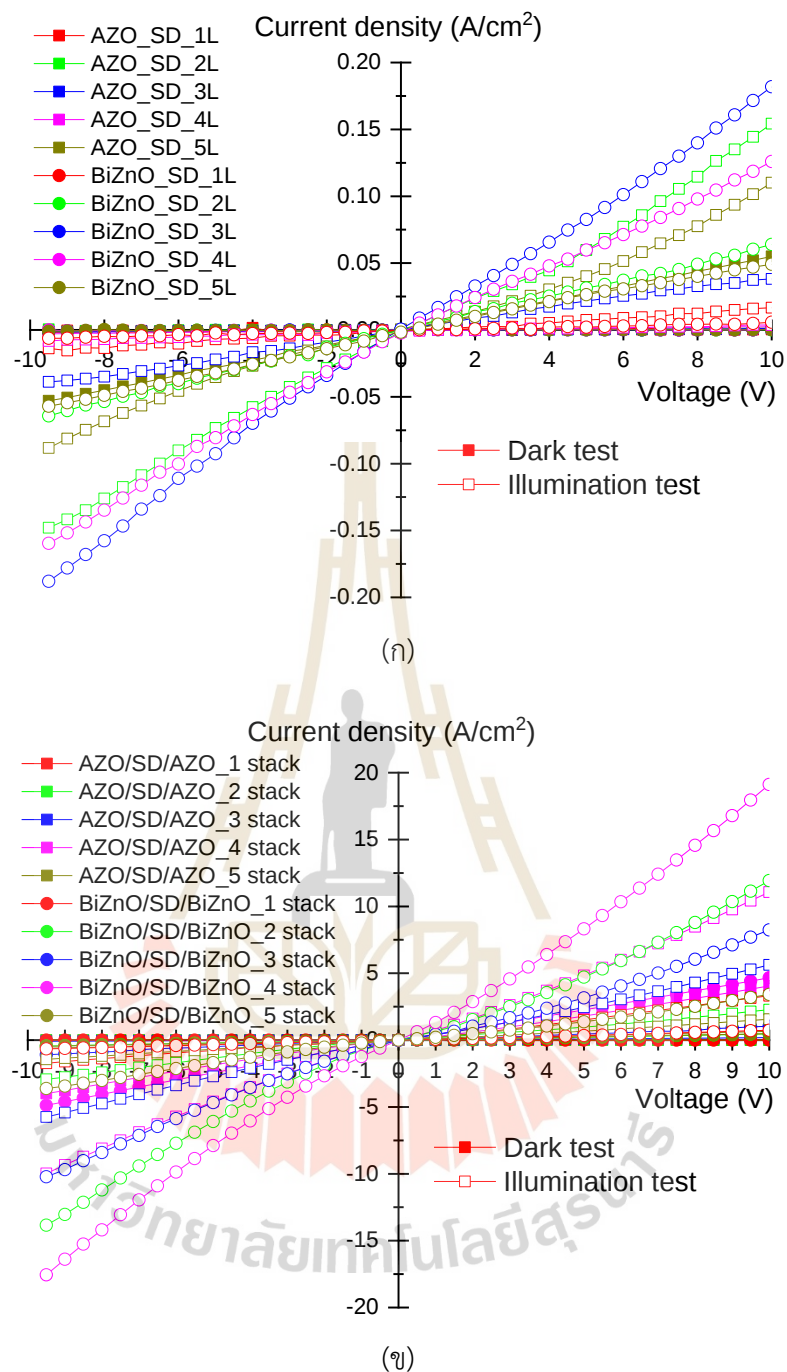
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาของฟิล์มบางรับแสง AZO



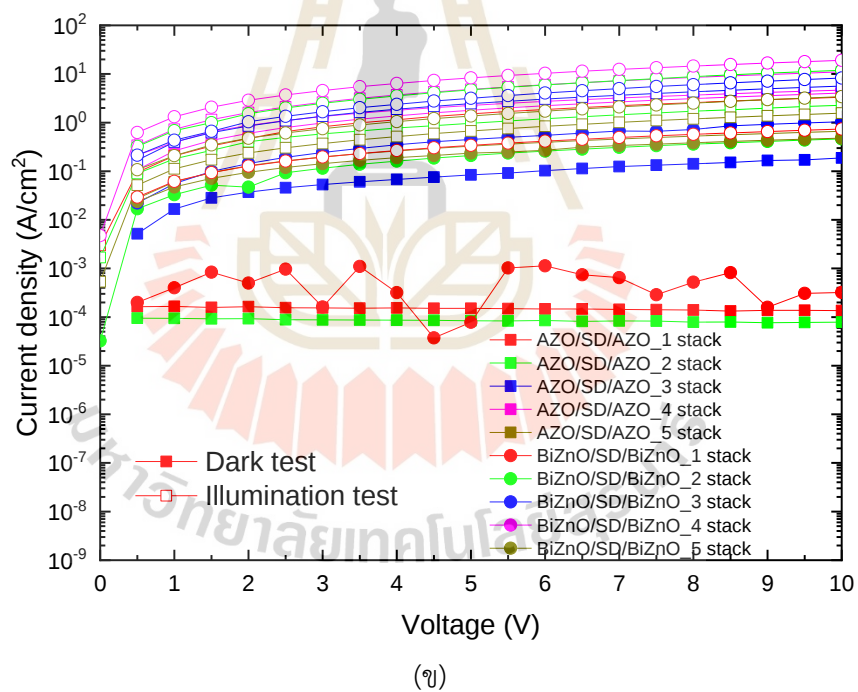
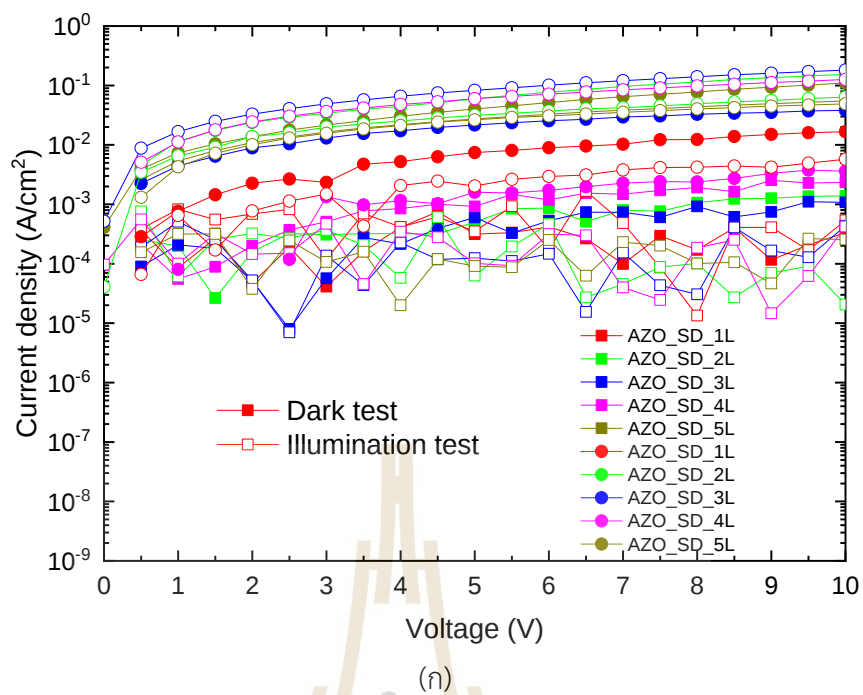
รูปที่ 4.41 ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบางรับแสง AZO ในโครงสร้างซ้อนทับจำนวน 1 - 5 ชั้น และฟิล์มบาง BiZnO จำนวน 1 ชั้น

4.7.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรับแสง SD

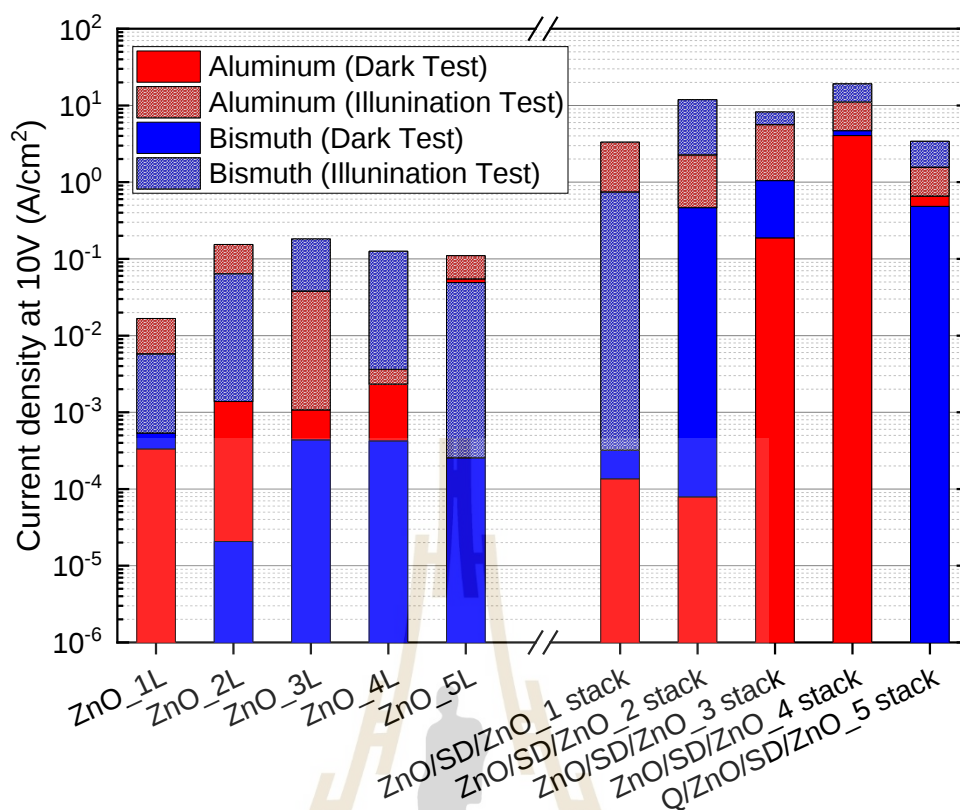
รูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นรูปแบบ Linear และ Semi-log ตามลำดับ โดยจากรูปแบบกราฟ Linear ของฟิล์มบางรับแสง SD ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นที่แสดงในรูปที่ 4.42 (ก) และรูปที่ 4.42 (ข) แม้ว่าจะมีผงซิลิคอนในเมตริกซ์ AZO หรือ BiZnO แต่ยังคงแสดงคุณลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง ที่บ่งถึงหน้าสัมผัสระหว่างขั้วโลหะและฟิล์มบางมีความสัมพันธ์ในรูปแบบ Ohmic contact และเมื่อพิจารณาแบบกราฟ Semi-log ของฟิล์มบางรับแสง SD ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นที่แสดงในรูปที่ 4.43 (ก) และรูปที่ 4.43 (ข) พบว่าฟิล์มบางรับแสง SD ยังคงเกิด Photo-generation ขึ้น ทำให้ภายใต้สภาวะสว่างมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าที่ 10 V สามารถแสดงในรูปของกราฟได้ในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างรูปแบบ Linear ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ชั้นทับ และ (ข) สลับชั้น

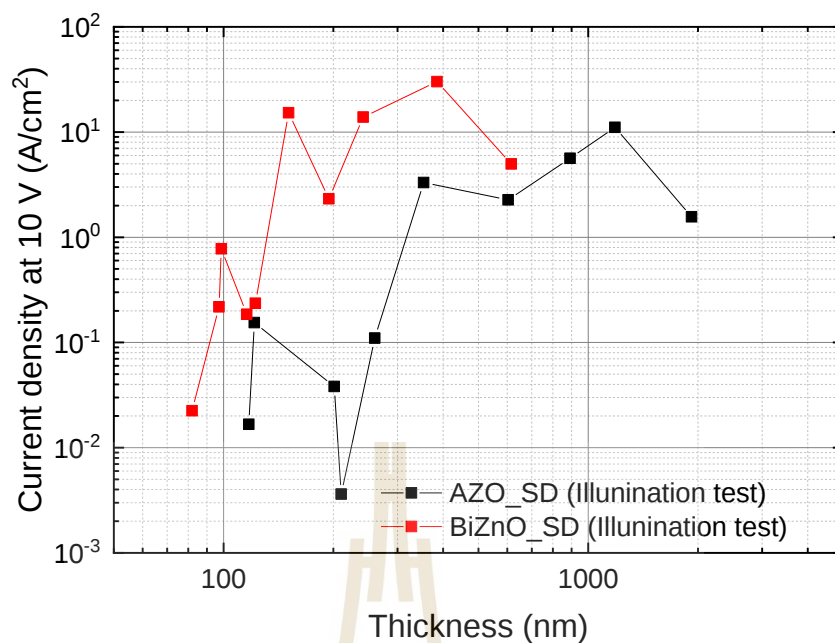


รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างรูปแบบ Semi-log ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น

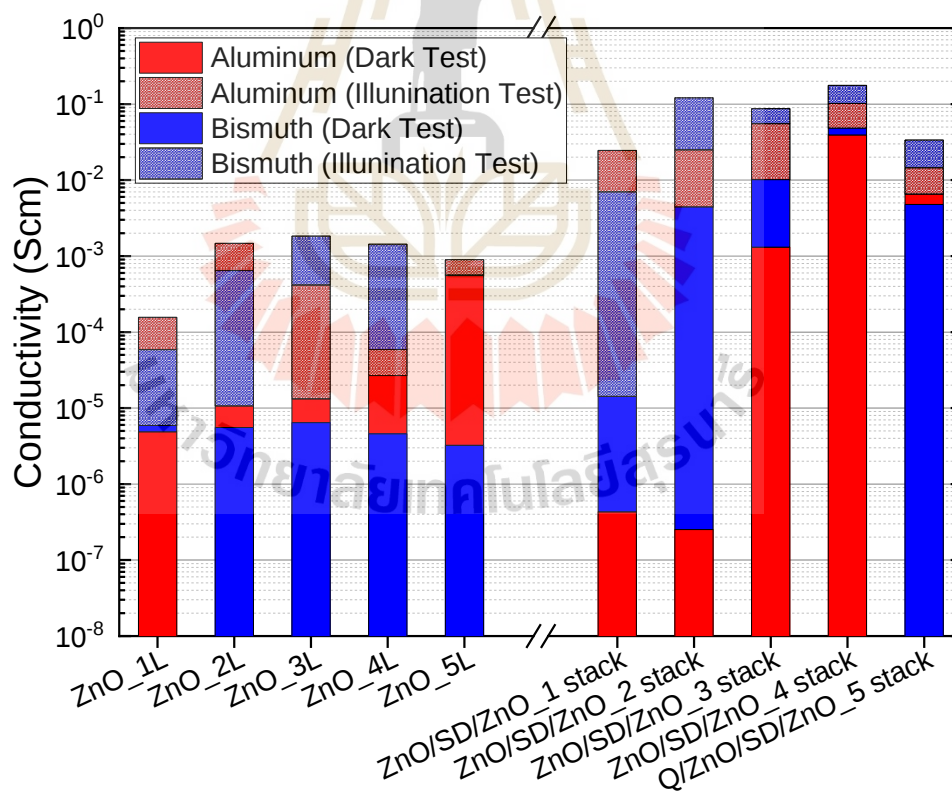


รูปที่ 4.44 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่างของฟิล์มบางรับแสง SD

จากรูปที่ 4.44 แสดงความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะสว่างและสภาวะมืดของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง ซ้อนทับและสลับชั้น พบว่าฟิล์มบาง SD ในทุกๆ เงื่อนไขเกิด Photo-generation แม้ว่าการมีฟังก์ชันคอนในเมตริกซ์ซึ่งก่อให้เกิด Trap state แต่ฟังก์ชันออกไซด์ยังคงทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่มากกว่า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและโครงสร้างสลับชั้นพบว่า ฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้นมีปริมาณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าโครงสร้างซ้อนทับอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเงื่อนไขเมตริกซ์ที่สามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดคือ BiZnO นอกจากนี้หากพิจารณาในมุมมองการเปรียบเทียบกับค่าความหนาของฟิล์มบางจะพบว่ามีคุณลักษณะแสดงในรูปที่ 4.45 โดยพบว่าฟิล์มบาง SD ในเมตริกซ์ AZO และ BiZnO ควรมีความหนาช่วง 100 – 300 nm และ 300 – 1000 nm ตามลำดับนอกจากนี้ค่า Conductivity ที่แสดงในรูปที่ 4.46 ในสภาวะสว่างมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นเป็นเช่นเดียวกันกับลักษณะค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาของฟิล์มบางรับแสง SD



รูปที่ 4.46 ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์มบางรับแสง SD

บทที่ 5

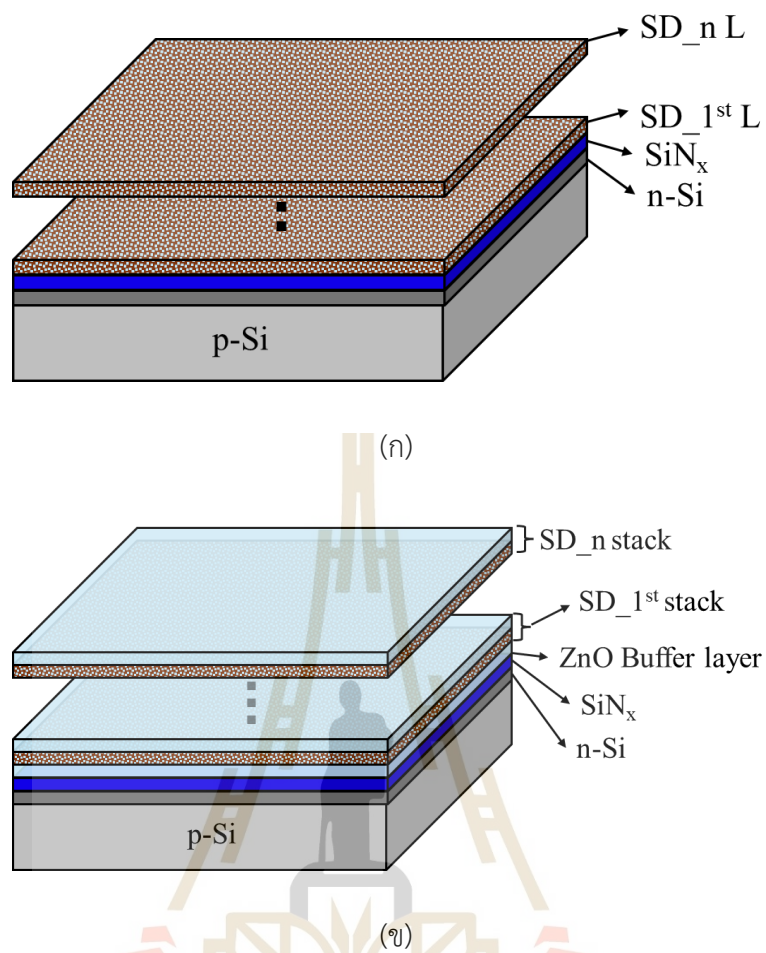
กระบวนการผลิตและผลการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรอยต่อเฮเทอโรโครงสร้างซิลิคอนคอตในเมตริกซ์ของ ซิงค์ออกไซด์ได้ปสารเจืออะลูมิเนียมกับบิสมีท

5.1 บทนำ

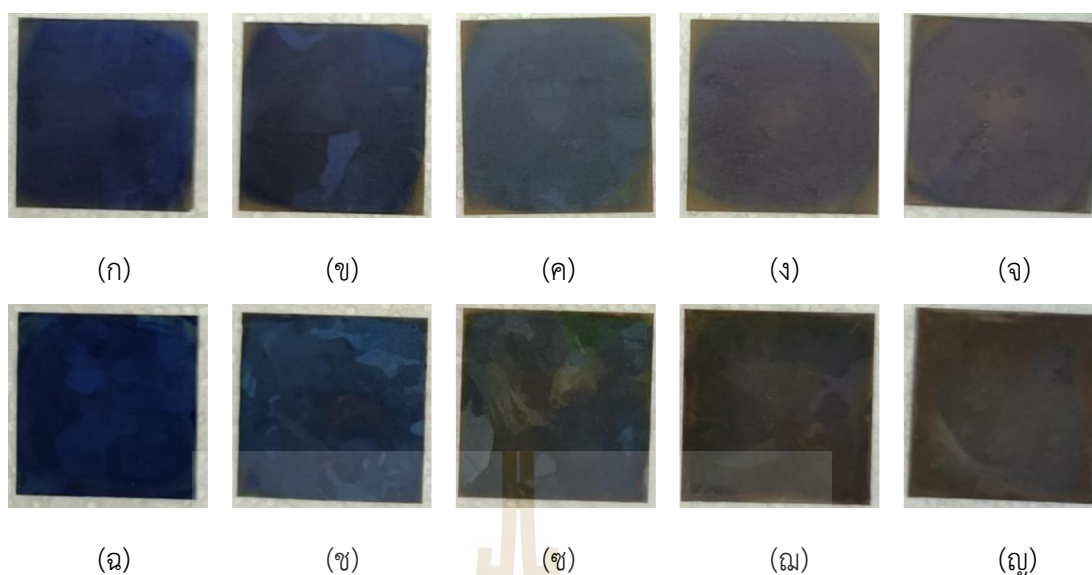
จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางรับแสง SD พบว่า มีการก่อรูปของผลึกซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ที่ส่งเสริมให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดี โดยเฉพาะฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างสลับชั้นที่สามารถนำไฟฟ้าที่ดีกว่าโครงสร้างซ้อนทับ แต่อย่างไรก็ตามผลทางแสงของฟิล์มบางโครงสร้างสลับชั้นแสดงค่าการทะลุผ่านที่น้อยกว่า และค่าการสะท้อนกลับของแสงที่สูงมากกว่าของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับ ทำให้ต้องพิจารณาการสร้างฟิล์มบาง SD ทั้งสองโครงสร้างบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางโครงสร้างต่างชนิด ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการสร้างและผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

5.2 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD

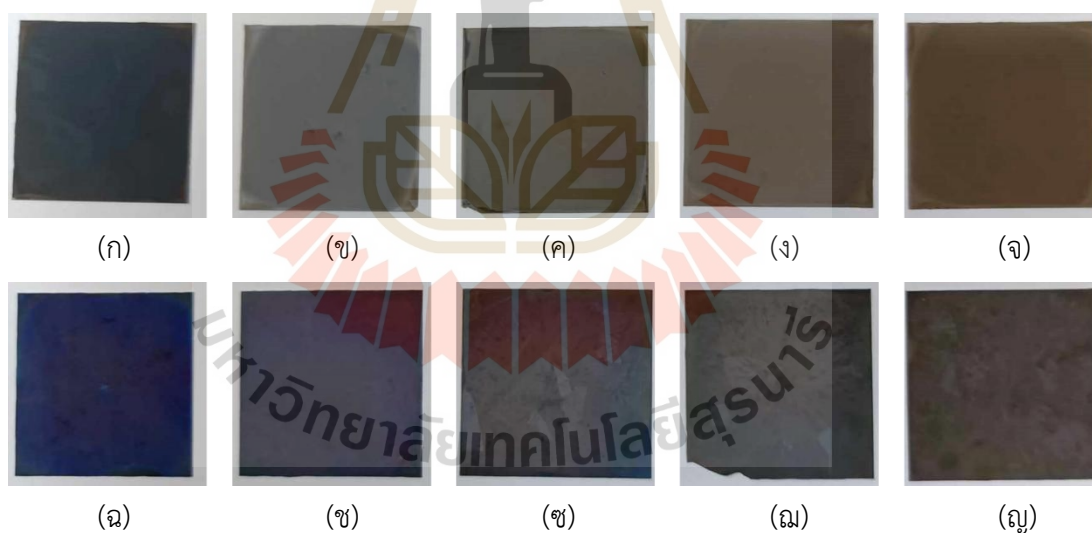
ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบาง SDi โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น เริ่มต้นนำแผ่นฐานซิลิคอนที่มีโครงสร้าง $p/n/SiN_x$ จากบริษัทผู้ผลิต ขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ มาทำความสะอาดด้วยกระบวนการล้าง RCA เพื่อกำจัดสารออกแกนิกและกำจัดไอออนของโลหะที่พื้นผิวออก จากนั้นนำแผ่นฐานที่ได้เข้าสู่กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง โดยมีจำนวนชั้นของฟิล์มบางรับแสง SD ตั้งแต่ 1 – 5 ชั้น ซึ่งกระบวนการได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.4.2 ของบทที่ 3 ซึ่งแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นสามารถแสดงในรูปที่ 5.1 ภาพถ่ายของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นแสดงในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 แผ่นซิลิคอน p/n/SiN_x ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น



รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายด้านบนแผ่นฟิล์มโครงสร้าง $p/n/SiN_x/AZO_SD$ จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และแผ่นฟิล์มโครงสร้าง $p/n/SiN_x/BiZnO_SD$ จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ฌ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น



รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายด้านบนแผ่นฟิล์มโครงสร้าง $p/n/SiN_x/AZO/SD/AZO$ จำนวน (ก) 1 stack (ข) 2 stack (ค) 3 stack (ง) 4 stack และ (จ) 5 stack และแผ่นฟิล์มโครงสร้าง $p/n/SiN_x/BiZnO/SD/BiZnO$ จำนวน (ฉ) 1 stack (ช) 2 stack (ซ) 3 stack (ฌ) 4 stack และ (ญ) 5 stack

ภายหลังจากการสร้างฟิล์มบางรับแสง SD บนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x$ ทำการวัดผลทางแสงด้วยเครื่อง UV VIS NIR spectrophotometer เพื่อวัดค่าการสะท้อนแสงกลับ (R%) บนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพิจารณาการวัด R% ที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 1500 nm ซึ่งผลการทดสอบสามารถพิจารณาได้ในรูปที่ 5.4

จากรูปที่ 5.4 (ก) และรูปที่ 5.4 (ข) แสดงผลการวัดค่า R% ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นบนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x$ ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเพิ่มฟิล์มบางป้องกันการสะท้อนแสงกลับ โดยจะสังเกตได้ว่าค่า R% ของแผ่น c-Si มีการสะท้อนแสงที่สูงมากกว่า 50% ในช่วงของแสง UV แต่เมื่อมีฟิล์มบาง SiN_x พบว่าค่า R% ลดต่ำลงมาถึง 35% และเมื่อเพิ่มชั้นฟิล์มบาง SD ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น สามารถลดค่า R% ลงมาที่ค่าต่ำกว่า 20% ทั้งนี้หากพิจารณาช่วงความยาวคลื่นช่วง VIS จะพบว่าค่า R% ของแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x$ มีค่า R% ที่น้อยกว่าการเพิ่มฟิล์มบาง SD โดยเฉพาะที่ค่าความยาวคลื่นบริเวณ 550 nm มีค่า R% ที่น้อยกว่า 1% อย่างไรก็ตามค่า R% ของฟิล์มบาง SD ยังมีค่าที่น้อยกว่าแผ่น c-Si และสำหรับแสง IR พบว่าค่า R% มีค่าที่เพิ่มสูงมากขึ้นเกินกว่า 30%

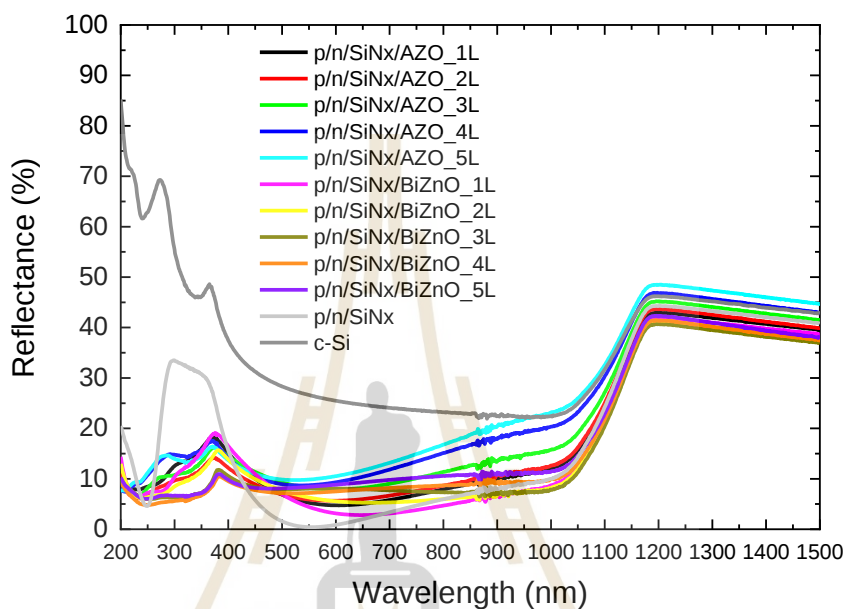
นอกจากการพิจารณาค่าการสะท้อนกลับของแสงของแผ่นซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง Si dots ยังสามารถพิจารณาค่า %Weight reflectance (%WR) ที่แสดงผลการคำนวณเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 5.1 โดยพบว่าค่า %WR ที่แสงย่าน UV แผ่นซิลิคอนที่มีฟิล์มบาง SD สามารถลดผลการสะท้อนให้กับแผ่นซิลิคอนได้เป็นอย่างมาก เมื่อเทียบกับแผ่น $p/n/SiN_x$ และแผ่น c-Si โดยฟิล์มบางโครงสร้างสลับชั้นจะลดผลจากการสะท้อนได้มากกว่าฟิล์มบางโครงสร้างซ้อนทับ

สำหรับแสงย่าน VIS ที่มีค่าสเปกตรัมความเข้มแสงจากพระอาทิตย์สูงที่สุด พบว่าค่า %WR ของแผ่นซิลิคอนที่มีฟิล์มบาง SD มีค่าที่สูงมากกว่าแผ่น $p/n/SiN_x$ ทุกกรณี อย่างไรก็ตามชั้นงานที่มีฟิล์มบาง SD จำนวน 1 ชั้น จะแสดงค่าการสะท้อนกลับที่น้อยที่สุด โดยเฉพาะโครงสร้างซ้อนทับ

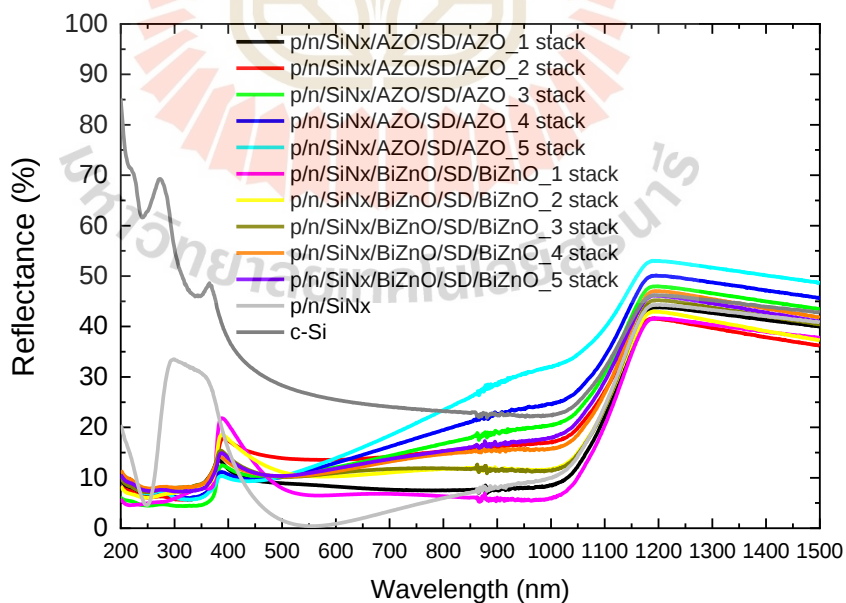
สำหรับแสงย่าน IR พบว่าค่า %WR ของกลุ่มชั้นงาน $BiZnO_SD_1L, 2L, 3L$ และ $4L$ ให้ค่า %R ต่ำกว่าแผ่น $p/n/SiN_x$ ในช่วง 5.080 – 5.537 % โดยเมื่อพิจารณาที่จำนวนชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่า %WR ที่มากขึ้น และนอกจากนี้ฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับมีค่า %WR ที่น้อยกว่าฟิล์มบางโครงสร้างสลับชั้น

เมื่อพิจารณาทุกๆ ช่วงความยาวคลื่นแสงพบว่า ค่า %WR ของแผ่นที่มีฟิล์มบาง SD มีค่าที่สูงมากกว่าแผ่น $p/n/SiN_x$ แต่น้อยกว่าแผ่น c-Si โดยเฉพาะกลุ่มชั้นงาน $BiZnO_1L, 2L$ และ $3L$ ที่แสดง %WR ใกล้เคียงกับแผ่น $p/n/SiN_x$ มากที่สุด ทั้งนี้จากภาพรวมโดยเมื่อพิจารณาที่จำนวนชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่า %WR เพิ่มขึ้น และฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับมีค่า %WR น้อยกว่าฟิล์มบางโครงสร้างสลับชั้น และสุดท้ายฟิล์มบาง SD ทั้งโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นพบว่า ค่า %WR ของเมตริกซ์ $BiZnO$ มีค่าที่น้อยกว่าเมตริกซ์ AZO อย่างไรก็ตาม ค่า %WR เฉลี่ยในทุกช่วง

ความยาวคลื่น ของทุกๆ เงื่อนไขมีค่าที่น้อยกว่า 10% แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของฟิล์มบางรับแสง SD ที่ยังสามารถเป็นหน้าต่างรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีได้ อย่างไรก็ตามฟิล์มบางที่มีค่าการสะท้อนแสงที่น้อยที่สุดคือฟิล์มบาง SD จำนวน 1 – 2 ชั้น ของแต่ละโครงสร้าง มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมากที่สุด เนื่องจากมีผลจากการสูญเสียของแสง เนื่องจากการสะท้อนมีค่าน้อยที่สุด



(ก)



(ข)

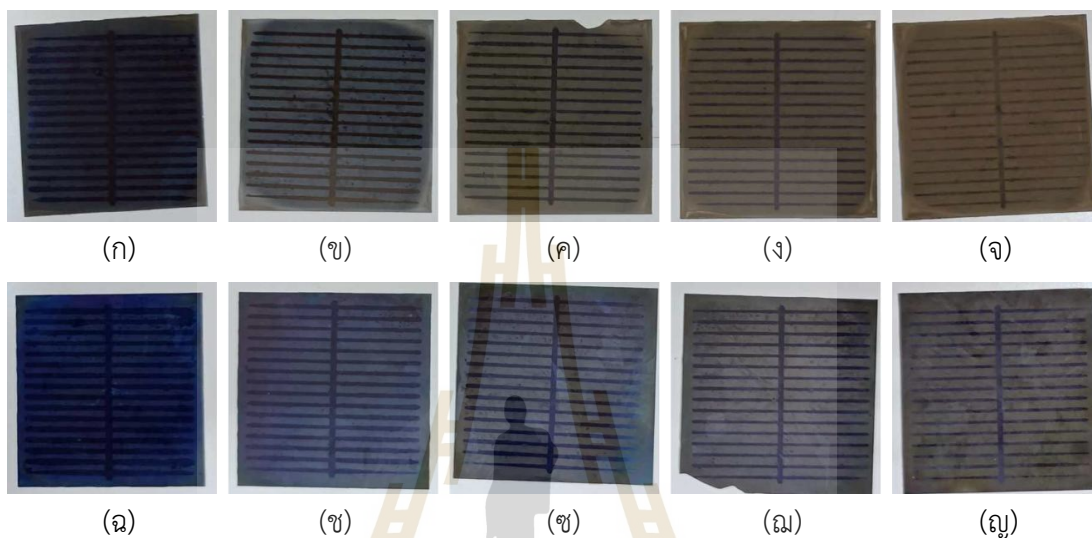
รูปที่ 5.4 ค่าการสะท้อนกลับของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง $n/p/SiN_x$ ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณค่า %WR ของฟิล์มบาง SD บนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x

เงื่อนไขฟิล์มบางบนแผ่นซิลิคอน โครงสร้าง p/n/SiN _x	%Weight Reflectance (%)			
	UV	VIS	IR	All wave range
AZO_SD_1L	2.346	5.659	5.885	5.281
AZO_SD_2L	1.783	5.773	6.089	5.343
AZO_SD_3L	2.016	7.645	6.838	6.366
AZO_SD_4L	2.309	8.525	7.892	7.249
AZO_SD_5L	2.145	9.302	8.532	7.812
BiZnO_SD_1L	2.320	4.816	5.100	4.593
BiZnO_SD_2L	1.775	5.717	5.080	4.783
BiZnO_SD_3L	1.188	6.509	5.092	4.951
BiZnO_SD_4L	1.070	6.264	5.537	5.095
BiZnO_SD_5L	1.158	7.186	5.965	5.626
AZO/SD/AZO_1 stack	1.388	6.899	5.467	5.305
AZO/SD/AZO_2 stack	1.046	11.401	7.044	7.508
AZO/SD/AZO_3 stack	0.789	9.778	8.150	7.554
AZO/SD/AZO_4 stack	1.049	10.279	9.096	8.257
AZO/SD/AZO_5 stack	0.982	11.031	10.630	9.306
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	1.261	6.997	4.879	4.998
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	1.296	9.323	6.172	6.426
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	1.414	9.017	6.332	6.434
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	1.399	9.415	7.271	7.060
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	1.269	9.738	7.550	7.291
p/n/SiN _x	4.172	3.001	5.616	4.575
c-Si	6.675	21.778	8.834	12.557

5.3 การสร้างขั้วโลหะบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD

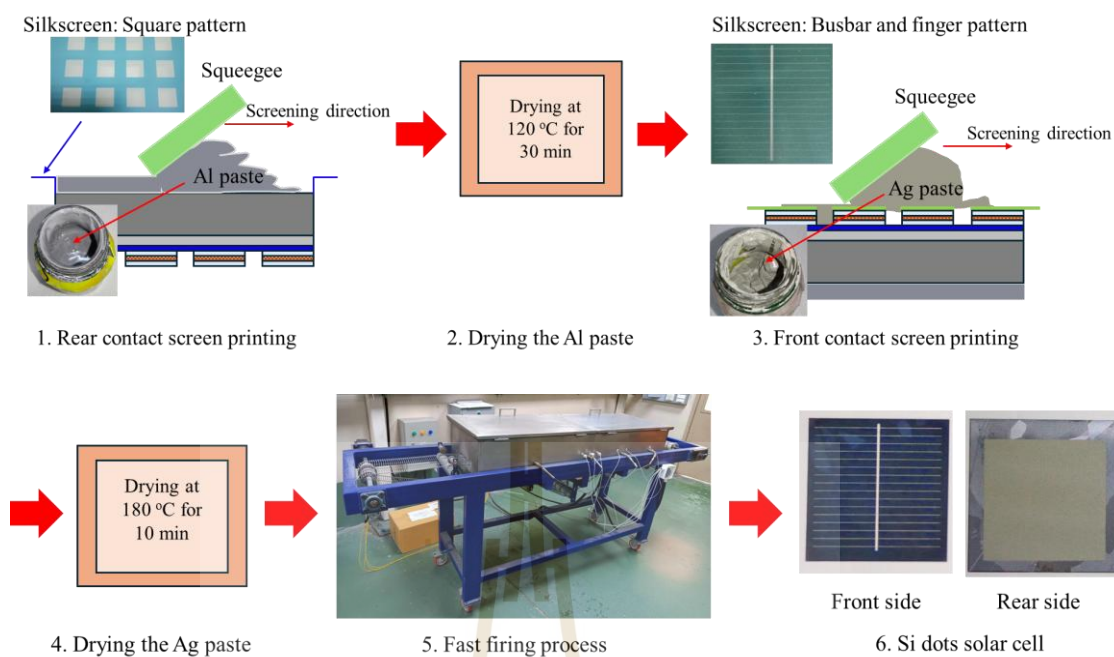
ภายหลังจากกระบวนการสร้างฟิล์มบางรับแสง SD บนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x$ ทำการเปิดช่องลวดลายขั้วโลหะด้านรับแสงที่มีลักษณะคล้ายกังปลาแสดงในรูปที่ 5.5 เพื่อให้กระบวนการ Fast firing ของขั้วโลหะที่ด้านรับแสงสามารถแพร่ผ่านไปยังชั้น $n-Si$ ได้อย่างเหมาะสม



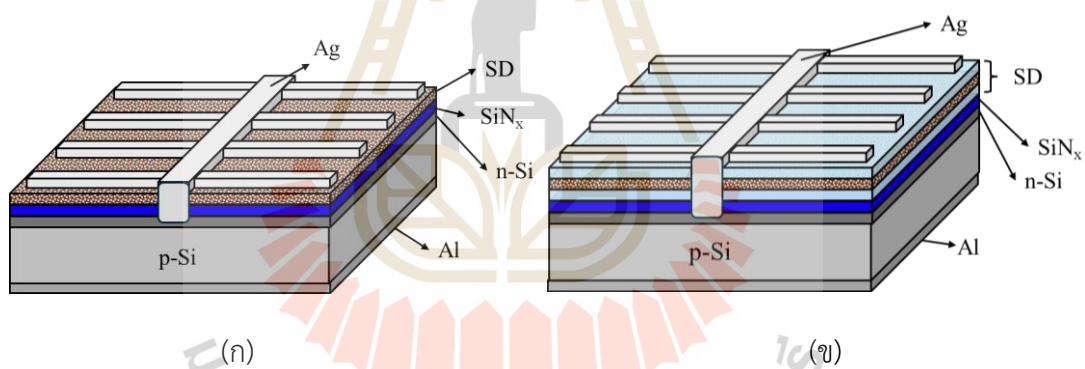
รูปที่ 5.5 ฟิล์มบางรับแสง SD ที่ถูกเปิดช่องบนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x/AZO_SD$ จำนวน (ก) 1 ชั้น (ข) 2 ชั้น (ค) 3 ชั้น (ง) 4 ชั้น และ (จ) 5 ชั้น และแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x/BiZnO_SD$ จำนวน (ฉ) 1 ชั้น (ช) 2 ชั้น (ซ) 3 ชั้น (ฌ) 4 ชั้น และ (ญ) 5 ชั้น

ภายหลังจากกระบวนการเปิดลวดลายด้านรับแสงของแผ่นซิลิคอนที่มีฟิล์มบาง SD ทำการเข้าสู่กระบวนการสร้างขั้วโลหะ เริ่มต้นทำการสร้างขั้วโลหะที่ด้านหลังก่อนด้วยกาวโลหะอะลูมิเนียม (Aluminum paste) โดยใช้วิธีการพิมพ์ลาย (Screen printing) ซึ่งมีอุปกรณ์สำคัญคือไหมสกรีน (Silkscreen) ที่มีลวดลายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด $2.8 \times 2.8 \text{ cm}^2$ และแผ่นยางปาด (Squeegee) ภายหลังจากการพิมพ์ลายที่ด้านหลังทำการอบกาวอะลูมิเนียมให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการพิมพ์ลายที่ด้านรับแสงด้วยกาวเงิน (Silver paste) โดยใช้ไหมสกรีนที่มีลวดลายคล้ายกังปลาด้วยขนาด Busbar และ Finger เท่ากับ $500 \mu\text{m}$ และ $100 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ภายหลังจากการพิมพ์ลายที่ด้านรับแสง ทำการอบกาวเงินให้แห้งที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 10 นาที

จากนั้นทำการแพร่ขั้วโลหะเงินและโลหะอะลูมิเนียมเข้าสู่แผ่นฐานซิลิคอนด้วยกระบวนการ Fast firing ในกระบวนการสร้างขั้วโลหะบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD สามารถพิจารณาเป็นแผนภาพได้แสดงในรูปที่ 5.6 และสามารถแสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในรูปที่ 5.7

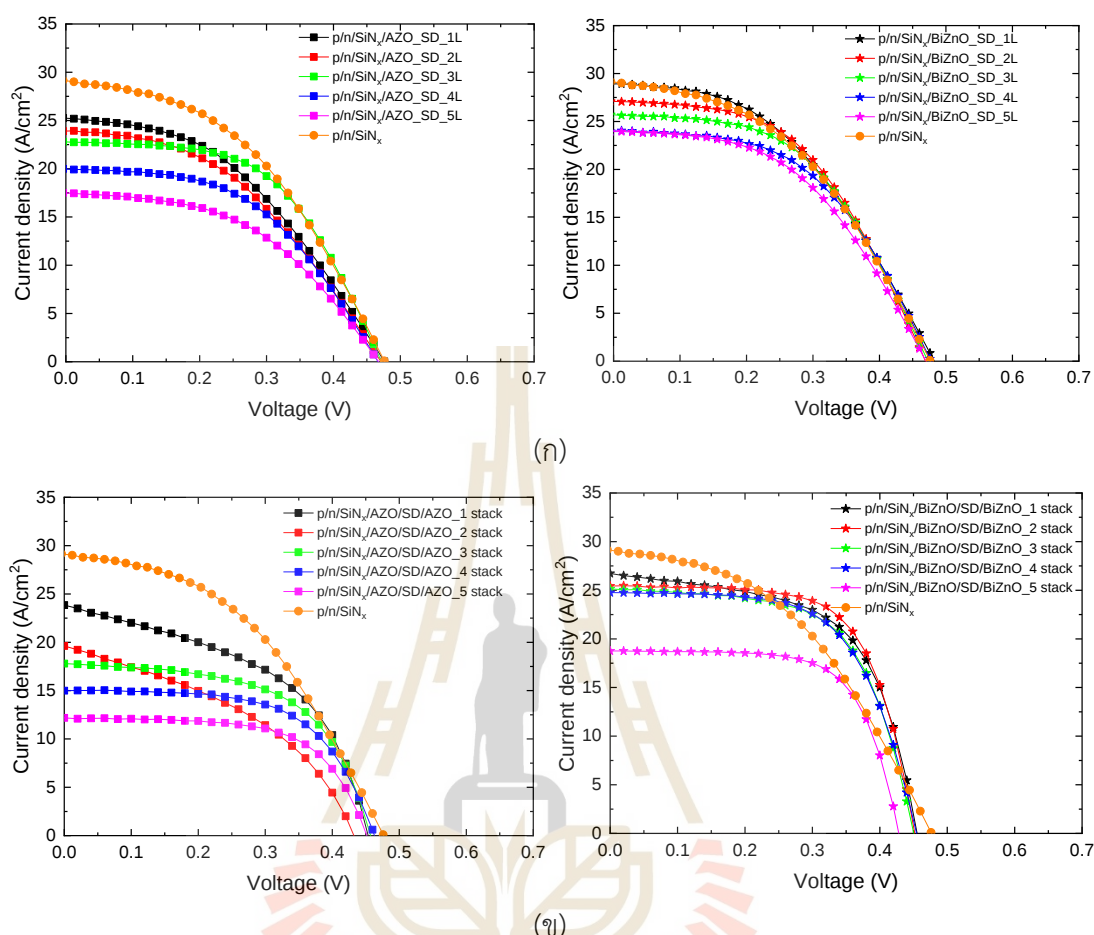


รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD



รูปที่ 5.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x ที่มีฟิล์มบาง SD โครงสร้าง (ก) ชั้นทับและ(ข) สลับชั้น

5.4 ผลการวัดทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีฟิล์มบางรับแสง SD



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้าง (ก) ซ้อนทับ และ (ข) สลับชั้น

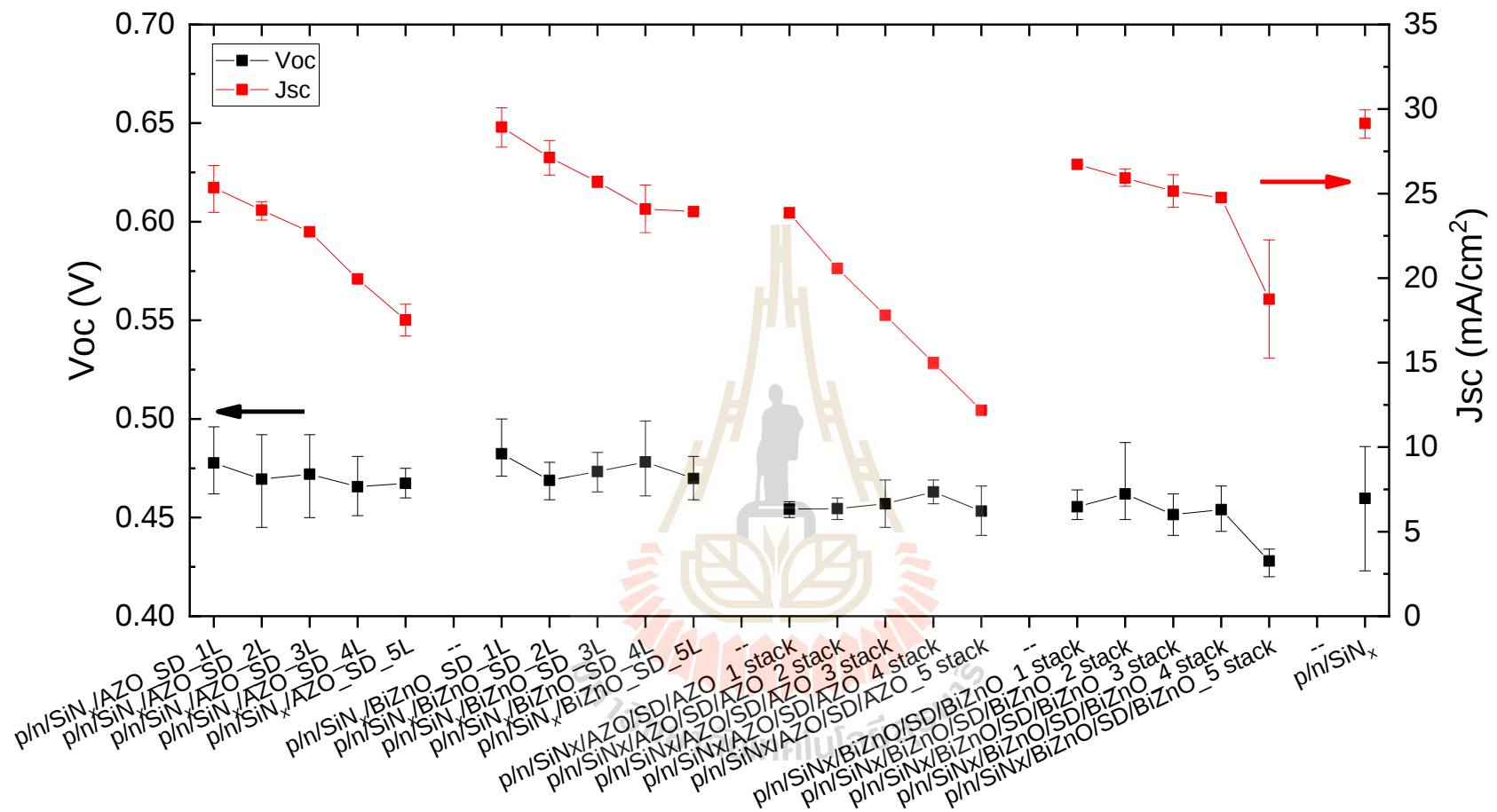
ผลการทดสอบในรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า จากรูปที่ 5.8 (ก) และ รูปที่ 5.8 (ข) แสดงผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้นตามลำดับ ซึ่งการประเมินคุณภาพเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current density: J_{sc}) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point: V_{mp}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current density at maximum power point: J_{mp}) ค่า Fill factor (FF) ค่าความต้านทานแฝง และค่าประสิทธิภาพ โดยสามารถแสดงข้อมูลสรุปในตารางที่ 5.2

เมื่อนำค่า V_{oc} และค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD มาพล็อตในรูปของกราฟสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.9 พบว่าค่า V_{oc} ของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับมีค่าที่มากกว่าโครงสร้างสลับชั้นเล็กน้อยโดยมีค่าเกาะกลุ่มที่ 0.45 V สำหรับค่า J_{sc} พบว่าฟิล์มบาง SD ทั้ง 2 โครงสร้างมีค่าลดลงตามจำนวนชั้นรับแสง SD ที่เพิ่มขึ้น ค่า J_{sc} ของฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับมีค่าที่มากกว่าโครงสร้างสลับชั้น และฟิล์มบาง SD เมตริกซ์ BiZnO สามารถให้ค่า J_{sc} ได้มากกว่าฟิล์มบาง SD เมตริกซ์ AZO ทั้งนี้มีความเป็นไปได้จากความหนาแน่นของวงซิลิคอนที่มากขึ้นส่งผลให้เกิด Trap state ที่เพิ่มขึ้น จนเกิดการ Recombination ของพาหะอิสระที่มากขึ้น ทำให้ค่า J_{sc} มีค่าลดลง ประกอบกับค่า T% ที่ลดลงจากผลการทดลองด้วยเครื่อง UV VIS NIR ส่งผลให้ปริมาณแสงลงมายังรอยต่อพีเอ็นลดลงไปอีกด้วย

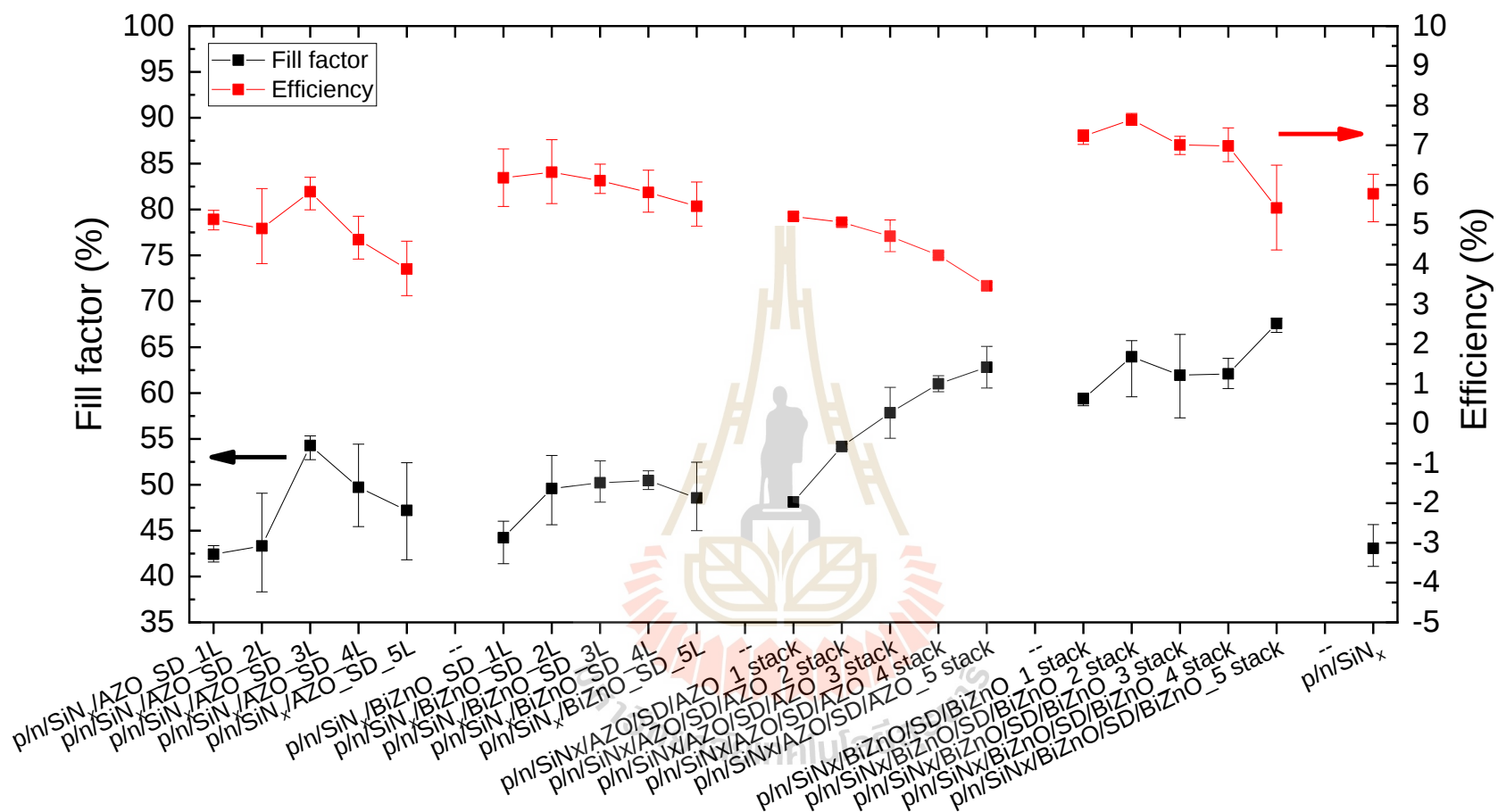
ซึ่งเมื่อทำการนำค่า FF และ η มาพล็อตในรูปของกราฟสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.10 พบว่าค่า FF มีการถูกปรับปรุงให้มีค่าที่สูงมากขึ้นตามฟิล์มบาง SD ที่มีจำนวนชั้นเพิ่มมากขึ้น โดยโครงสร้างสลับสามารถปรับปรุงคุณภาพได้สูงมากกว่าโครงสร้างซ้อนทับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่า η พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD ในเมตริกซ์ BiZnO สามารถให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงมากกว่าฟิล์มบาง SD เมตริกซ์ AZO มีความเป็นไปได้จากอะตอมของอะลูมิเนียมที่เจือลงไปใน ZnO มีความไม่เหมาะสมกับค่า Work function ของซิลิคอนด้าน n-type หรือด้านรับแสง ทำให้เกิดกำแพงศักย์ระหว่างซิลิคอนและซิลิคอนด้าน n-type ส่งผลให้เกิดการกีดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอน (Kasap, 2006) และยังส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่นชนิด R_s มีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเทียบกับค่าความหนาของฟิล์มบางรับแสง SD ที่แสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x ควรมีค่าความของฟิล์มบางรับแสง SD อยู่ที่ประมาณ 100 – 200 nm เพื่อที่จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 5.2 ผลทางไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN_x ที่มีฟิล์มบาง SD

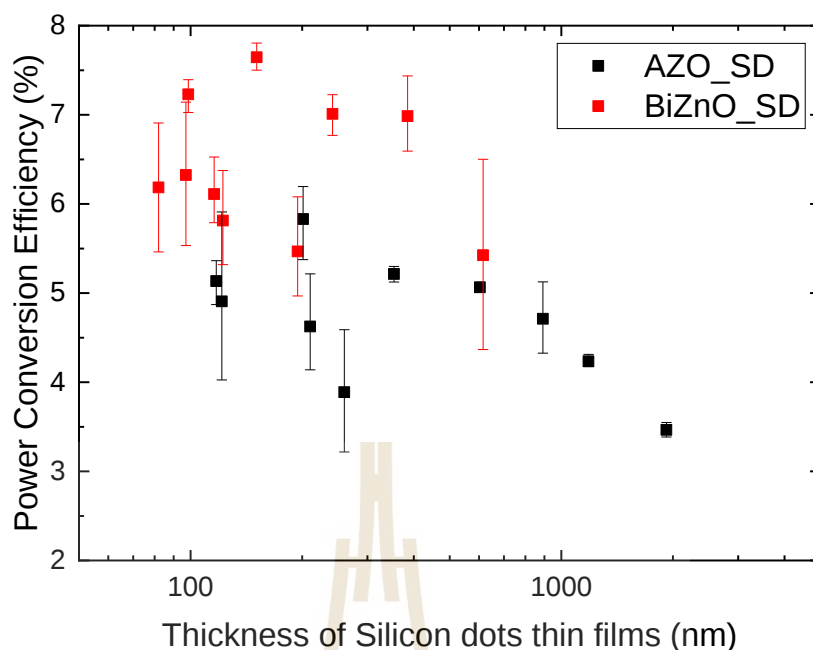
เงื่อนไขฟิล์มบางบนแผ่นซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN _x	V _{oc} (V)	J _{sc} (A/cm ²)	V _{mp} (V)	J _{mp} (A/cm ²)	FF (%)	η (%)	Δη (%)	R _{sh} (Ω)	R _s (Ω)
AZO_SD_1L	0.478	25.36	0.279	18.46	42.43	5.13	-0.65	73.43	14.00
AZO_SD_2L	0.470	24.01	0.273	17.89	43.32	4.91	-0.87	94.88	14.20
AZO_SD_3L	0.472	22.74	0.311	18.76	54.29	5.83	+0.05	260.19	21.65
AZO_SD_4L	0.466	19.95	0.292	15.81	49.71	4.63	-1.15	215.19	19.33
AZO_SD_5L	0.467	17.52	0.289	13.36	47.20	3.89	-1.89	155.20	22.69
BiZnO_SD_1L	0.482	28.94	0.284	21.76	44.22	6.19	+0.40	81.71	12.85
BiZnO_SD_2L	0.469	27.13	0.289	21.81	49.58	6.32	+0.54	154.02	13.99
BiZnO_SD_3L	0.473	25.70	0.295	20.74	50.22	6.11	+0.33	161.29	15.33
BiZnO_SD_4L	0.478	24.08	0.303	19.20	50.46	5.81	+0.03	161.84	18.05
BiZnO_SD_5L	0.470	23.94	0.289	18.87	48.56	5.47	-0.31	145.55	15.99
AZO/SD/AZO_1 stack	0.454	23.85	0.325	26.08	48.12	5.21	-0.57	46.23	8.76
AZO/SD/AZO_2 stack	0.455	20.58	0.330	21.46	54.16	5.07	-0.71	78.73	9.11
AZO/SD/AZO_3 stack	0.457	17.80	0.335	18.10	57.84	4.71	-1.07	132.51	10.45
AZO/SD/AZO_4 stack	0.463	14.99	0.335	15.20	61.01	4.23	-1.55	242.39	12.05
AZO/SD/AZO_5 stack	0.453	12.18	0.340	12.23	62.80	3.47	-2.31	333.62	13.12
BiZnO/SD/BiZnO_1 stack	0.456	26.73	0.340	27.63	59.37	7.23	+1.45	87.16	6.54
BiZnO/SD/BiZnO_2 stack	0.462	25.91	0.340	26.09	63.94	7.64	+1.86	242.97	5.63
BiZnO/SD/BiZnO_3 stack	0.452	25.14	0.335	25.56	61.94	7.01	+1.23	169.94	5.94
BiZnO/SD/BiZnO_4 stack	0.454	24.76	0.330	24.89	62.09	6.99	+1.21	188.36	6.29
BiZnO/SD/BiZnO_5 stack	0.428	18.75	0.330	18.81	67.58	5.42	-0.36	347.32	5.18
p/n/SiN _x	0.460	29.15	0.286	25.26	43.07	5.78	0.00	49.47	11.17



รูปที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD



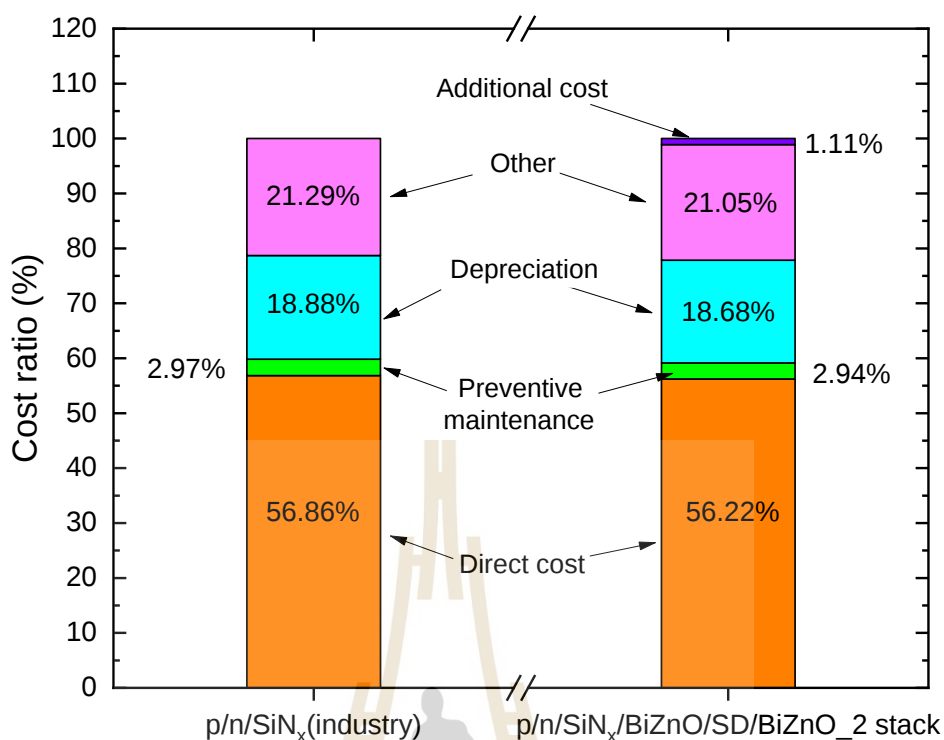
รูปที่ 5.10 ค่า Fill factor และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD



รูปที่ 5.11 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง $p/n/SiN_x$ ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD ที่ความหนาต่างๆ

5.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การประเมินต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักต่อการลงทุนในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งต้องพิจารณาค่าวัตถุดิบ ค่าเครื่องจักร ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร ค่าเสื่อมสภาพ ค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าจ้างพนักงาน ค่าสาธารณูปโภค และค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้อ้างอิงข้อมูลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้างรอยต่อ $p/n/SiN_x$ ปี พ.ศ. 2561 มาพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ $p/n/SiN_x$ ที่มีฟิล์มบางรับแสง BiZnO/SDBiZnO_2 stack เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุดในงานวิจัย โดยสัดส่วนต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบ ข้างต้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.12 โดยพบว่าค่าวัตถุดิบจากแผ่นซิลิคอน ค่าสารเคมีและค่าแก๊สมากที่สุดคือ 56%



รูปที่ 5.12 สัดส่วนต้นทุนของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx เทียบกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ p/n/SiNx/BiZnO/SD/BiZnO_2 stack

เมื่อทำการพิจารณาการคำนวณต้นทุนการผลิตในรูปของหน่วยบาทต่อวัตต์ สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 5.1 และการคำนวณในภาคผนวก ง. ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx กับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ p/n/SiNx/BiZnO/SD/BiZnO_2 stack สามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.3

$$\text{ราคาต้นทุน [บาท/วัตต์]} = \frac{\text{ราคาต้นทุนที่พิจารณาทั้งหมด [บาท]}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด [วัตต์]}} \quad (5.1)$$

ตารางที่ 5.3 ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN_x เปรียบเทียบกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ p/n/SiN_x/BiZnO/SD/BiZnO_2 stack

รายการต้นทุน		ราคาต้นทุน (บาท/วัตต์)	
		p/n/SiN _x (18.4%)	p/n/SiN _x /BiZnO/SD/BiZnO_2 stack (18.4+1.86=20.26%)
Direct cost	แผ่นซิลิคอน	3.31	3.01
	สารเคมี		
	กาวโลหะ		
	ไหมสกรีนและยางปิด		
	แก๊ส		
Additional chemical substances		-	0.41
Additional cost	แผ่น Flash foam	-	0.0221
	เครื่อง Spin coater		
	ชุดเครื่องบัดผงซิลิคอน		
	เครื่องประทับลาย		
Preventive metanance		0.17	0.16
Depreciation		1.10	1.00
Other	ค่าสาธารณูปโภค	1.24	1.13
	ค่าจ้างพนักงาน		
	ค่าวัสดุสิ้นเปลือง		
รวมทั้งหมด		5.82	5.7321

จากตารางที่ 5.3 ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN_x/BiZnO/SD/BiZnO_2 stack มีต้นทุนที่ถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่ที่ 0.0879 บาทต่อวัตต์ แสดงให้เห็นว่า ถ้านำนวัตกรรมชั้นฟิล์มบางรับแสง SD เข้ามาเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x จะมีความคุ้มค่าให้แก่ผู้ประกอบการและคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เล็กน้อย อย่างไรก็ตามการคำนวณยังคงต้องมีการพิจารณาส่วนอื่นเพิ่มเติม เช่นระยะเวลาในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการอบแต่ละชั้นใช้เวลานาน ซึ่งเป็นจุดด้อยของการสร้างเชิงอุตสาหกรรม

บทที่ 6

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยอะลูมิเนียมและบิสมัทด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ คือการสังเคราะห์สารละลายเมตริกซ์ AZO และ BiZnO ด้วยวิธีโซลเจล จากนั้นเมื่อนำสารละลายผสมเข้ากับผงซิลิคอนที่ผลิตจากแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพ ได้เป็นหมึกซิลิคอนและนำมาสร้างฟิล์มบางรับแสง SD ด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง จากนั้นเข้าสู่กระบวนการอบเพื่อให้ซิงค์ออกไซด์ก่อรูปผลึกขึ้น ซึ่งผลการวัดคุณสมบัติต่างๆ ของผงซิลิคอน ฟิล์มบางรับแสง AZO BiZnO และ SD รวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถผลิตผงซิลิคอนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.513 ไมครอน ด้วยกระบวนการบดด้วยลูกบอลอะลูมินา โดยใช้การบดรูปแบบ Planetary
2. ฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านกระบวนการอบด้วยอุณหภูมิสูงด้วย TA และ RTA สามารถปรับปรุงพื้นผิวให้เรียบ ไม่เกิดลักษณะรูปคล้ายกลีบดอกไม้บนพื้นผิวของฟิล์มบาง แต่ผลทางไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงค่านำไฟฟ้าของฟิล์มบางรับแสง AZO ที่ผ่านกระบวนการอบแบบ RTA มีค่าที่สูงมากกว่า เนื่องจากผลึกของซิงค์ออกไซด์มีขนาดที่ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ TA นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์มบางรับแสง AZO จาก 1 – 5 ชั้น แสดงปริมาณการผลิตพาหะที่มากขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ซึ่งพบว่าฟิล์มบางรับแสง AZO จำนวน 2 ชั้นแสดงค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด
3. ฟิล์มบางรับแสง AZO และ BiZnO มีค่าการสะท้อนแสงกลับที่ต่ำกว่า 20% ทุกๆ ช่วงความยาวคลื่น และมีค่าการทะลุผ่านของแสงที่สูงมากกว่า 80% ในช่วงแสงย่าน VIS และ IR ซึ่งเมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงพบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงช่วงแสง UV เพียงอย่างเดียว และมีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ช่วง 1.60 -1.93
4. ฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น แม้จะมีจำนวนผงซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีความสามารถในการผลิตพาหะอิเล็กตรอนจากโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ ซึ่งฟิล์มบาง SD โครงสร้างสลับชั้นสามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะที่สูงมากกว่า

โครงสร้างซ้อนทับ โดยเงื่อนไขชิ้นงาน ZnO/SD/ZnO_4 stack ให้ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะสูงที่สุด โดยมีเมตริกซ์ BiZnO ให้ค่าที่สูงมากกว่า AZO

5. การสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบางรับแสง SD ในช่วงแสง UV VIS และ IR ฟิล์มบาง SD โครงสร้างซ้อนทับมีค่าที่ มากกว่า น้อยกว่าและน้อยกว่าโครงสร้างสลับชั้น ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางรับแสง SD โครงสร้างซ้อนทับมีค่าที่สูงมากกว่าโครงสร้างสลับชั้นในทุกๆ ย่านความยาวคลื่นแสง และค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง SD สามารถขยายขอบการดูดกลืนพลังงานแสงมายังบริเวณแสง VIS และ IR โดยจำนวนชั้นของฟิล์มบางเป็นตัวกำหนดการขยายขอบการดูดกลืนแสง และฟิล์มบางรับแสงมีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วงระหว่าง 1.8 – 2.3 ซึ่งมิต้านน้อยกว่าซิลิคอนที่มีค่าเท่ากับ 3.94

6. เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD ทั้งสองโครงสร้าง มีข้อเสียคือการลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีจำนวนชั้นรับแสง SD ที่มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามจะปรับปรุงค่า Fill factor ให้มีค่าที่สูงมากขึ้น ทั้งนี้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง SD ในเมตริกซ์ BiZnO มีประสิทธิภาพที่สูงมากกว่า AZO และ โดยเฉพาะเงื่อนไข p/n/SiN_x/BiZnO/SD/BiZnO_2 stack สามารถให้ค่าประสิทธิภาพที่มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN_x ถึง 1.86% และเมื่อนำมาคำนวณในต้นทุนเชิงอุตสาหกรรมพบว่ามีความคุ้มค่าในการที่จะนำฟิล์มบางรับแสง SD มาเป็นหน้าต่างสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในกระบวนการเตรียมการทดลองจำเป็นต้องมีความสะอาดเป็นอย่างมาก เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนกับชิ้นงาน

6.2.2 ในกระบวนการเตรียมสารต้องมีความรอบคอบ ไม่ดวงสารผิด ต้องมีความใจเย็นในการหยดสารขณะผสมสารละลาย เพราะในบางครั้งหากหยดสารเร็วเกินไปอาจเกิดตะกอนขึ้นในสารละลาย

6.2.3 การคัดแยกขนาดของผงซิลิคอนให้มีขนาดเท่ากัน มีความสำคัญต่อการพัฒนาหมึกซิลิคอน เพื่อให้เกิดคุณภาพของฟิล์มบางรับแสง SD ที่ดีขึ้น

6.2.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง p/n/SiN_x ที่มีฟิล์มบางรับแสง SD จำเป็นต้องมีความระมัดระวังห้ามกระทบกรุนแรง เนื่องจากแผ่นฐานมีความเปราะบางเป็นอย่างมาก

รายการอ้างอิง

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2566). รายงานประจำปี 2565.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2567). รายงานประจำปี 2566.
- ธีระพงษ์ พวงมะลิ (2557). *นาโนฟิสิกส์ NANOPHYSICS*. กรุงเทพฯ. Mc Graw Hill Education.
- สำนักนโยบายแผนพลังงาน (2563). แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1.
- ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ (2562). การศึกษาการผลิตฟิล์มบางซิลิคอนต่อจากการนำแผ่นซิลิคอนเสียหายมาผลิตใหม่เพื่อประยุกต์เป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- Ahammed, N., Hassan, M.D.S., & Hassan, M. (2018). Effects of aluminum (Al) incorporation on structural, optical and thermal properties of ZnO nanoparticles. *Materials Science-Poland*. 36(3), 419-426.
- Alsaba, L.M., Ashoush, M., Elsayed, S.N., Eid, A., & Abdelghany, A. (2019). Characterization of zinc oxide nanoparticles prepared by sonochemical method with different ultrasonic exposure power. *Al-Azhar Bulletin of Science*. 30(2-B), 1-6.
- Barbagiovanni, E.G., Lockwood, D.J., Simpson, P.J., and Goncharova, L.V. (2014). Quantum confinement in Si and Ge nanostructures: Theory and experiment. *Applied Physics Reviews*. 1(1), 011302.
- Balaprakash, V., Gowrisankar, P., Sudha, S., & Rajkumar, R. (2018). Aluminum doped ZnO transparent conducting thin films prepared by sol-gel dip coating technique for solar cells and optoelectronic applications. *Materials Technology*. 33(6), 414-420.
- Boccard, M., Yang, X., Weber, K., & Holman, Z.C. (2016). Passivation and carrier selectivity of TiO₂ contacts combined with different passivation layers and electrodes for silicon solar cells. *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2403-2407.

- Castaldo, A., Antonaia, A., & Addonizio, M.L. (2014). Synthesis of silicon quantum dots in zinc silicate matrix by low-temperature process: Optical, structural and electrical characterization. *Thin Solid Films*. 562, 172-180.
- Chen, R., Hu, Y., Li, X., He, J., & Zhang, S. (2023). Silicon quantum dots prepared by electrochemical etching and their application in solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 34(13), 1105.
- Conibeer, G., Green, M., Cho, E.C., König, D., & et al. (2008). Silicon quantum dot nanostructures for tandem photovoltaic cells. *Thin Solid Films*. 516(20), 6748-6756.
- Damiani, L.R. & Mansano, R.D. (2012). Zinc oxide thin films deposited by magnetron sputtering with various oxygen/argon concentrations. *Journal of Physics: Conference Series*. 370(1), 012019.
- Donal, A.N. (1997). *Semiconductor Physics & Devices Basic Principles*. Times Mirror Higher Education Group.
- Dobrzański, L.A., & Szindler, M. (2013). Al₂O₃ antireflection coatings for silicon solar cells. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing engineering*. 59, 13-19.
- Dziewior, J., & Schmid, W. (1977). Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon. *Applied Physics Letters*. 31(5), 346-348.
- Ellerbrock, R., Stein, M., & Schaller, J. (2022). Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR. *Scientific Reports*. 12(1), 11708.
- Fernández, S., Torres, I., & Gandía, J.J. (2022). Sputtered ultrathin TiO₂ as electron transport layer in silicon heterojunction solar cell technology. *Nanomaterials (Basel)*. 12(14), 1-12.
- Fangsuwannarak, T., Krongarrom, P., Kaewphoka, J., & Rattanachan, S.T. (2013). Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells. 2013 10th International conference on electrical engineering/electronics, Computer, Telecommunications and Information technology. 1-5.
- Fangsuwannarak, T., & Khunchana, K. (2013). Optical properties of nano-crystalline silicon films prepared by using sol-gel spin coating process. *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*. 106 – 110.

- Fangsuwannarak, T., Laohawiroj, S., Rattanawichai, P., Mekmork, K., Limsiri, W., & et al. (2021). Silicon dots films deposited by spin-coating as a generated carrier addition layer of third generation photovoltaics. *Progress in Natural Science: Materials International*. 31(2). 192-200.
- 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. (2008). Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 92(11), 1305-1310.
- Goncharova, L.V., Nguyen, P.H., Karner, V.L., D'Ortenzio, R., Chaudhary, S., & et al. (2015). Si quantum dots in silicon nitride: Quantum confinement and defects. *Journal of Applied Physics*. 118(22). 224302.
- Güler, E., Uğur, G., Uğur, Ş, & Güler, M. (2020). A theoretical study for the band gap energies of the most common silica polymorphs. *Chinese Journal of Physics*. 65, 472-480.
- Hong, S.H., Kim, Y.S., Lee, W., Kim, Y.H., Song, J.Y. & et al. (2011). Active doping of B in silicon nanostructures and development of a Si quantum dot solar cell. *Nanotechnology*. 22(42). 425203.
- Hubbard, C.R., Swanson, H.E., and Mauer, F.A. (1975). A silicon powder diffraction standard reference material. *Journal of Applied Crystallography*. 8(1), 45-48.
- Hussain, B., Ebong, A., & Ferguson, I. (2015). Zinc oxide and silicon based heterojunction solar cell model. *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. 1-4.
- Jahanshah, F., Sopian, K., Zaidi, S.H., Othman, M.Y., Amin, N. & et al. (2009). Modeling the Effect of P-N Junction Depth on the Output of Planer and Rectangular Textured Solar Cells. *American Journal of Applied Sciences*. 6(4), 667-671.
- Jain, S., Paliwal, A., Gupta, V., Tomar, M. (2020). Plasmon-assisted crystalline silicon solar cell with TiO_2 as anti-reflective coating. *Plasmonics*. 15(4), 1091-1101.

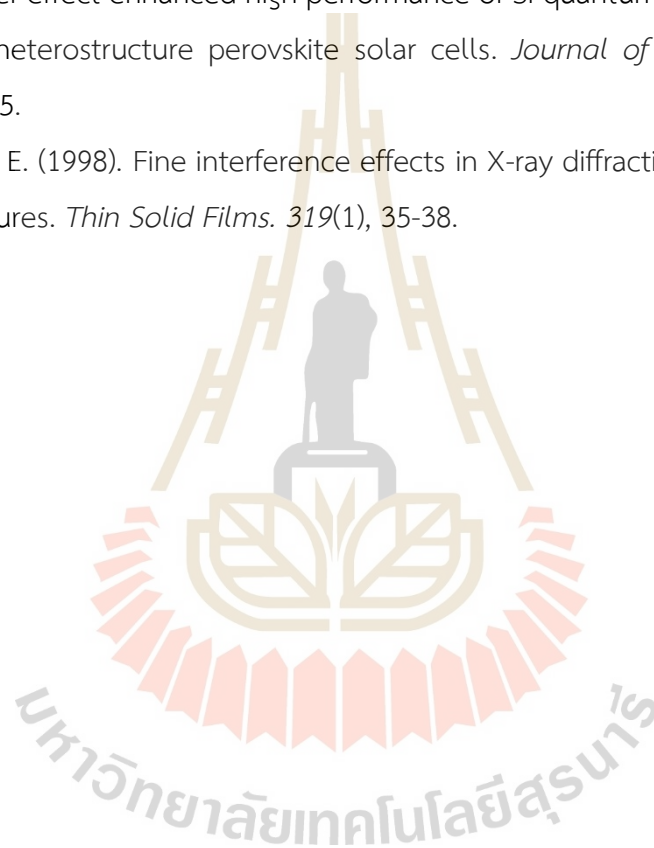
- Janz, S., Schnabel, M., Löper, P., Summonte, C., Canino, M., & et al. (2013). Processing and characterisation of tandem solar cells from crystalline silicon materials. *28th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*.
- Karmouch, R., Savard, G., Barba, D., Koshel, D., Martin, F., & et al. (2013). Investigation of electrical and optical measurements of silicon nanocrystals embedded in SiO₂ matrix. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 24(6), 1837-1841.
- Kim, J., Kim, M., Kim, H., & Yang, J. (2022). TiO₂ thin film deposition by RF reactive sputtering for n-i-p planar structured perovskite solar cells. *Applied science and convergence technology*. 31, 116-119.
- Kittel, C. (2005). Introduction to Solid State Physics. United States of America. John Wiley & Sons, Inc.
- Kasap, S.O. (2006). *Principles of Electronic Materials and Devices*. New York. Mc Graw-Hill
- Kaur, D., Bharti, A., Sharma, T., & Madhu, C. (2021). Dielectric Properties of ZnO-Based Nanocomposites and Their Potential Applications. *International Journal of Optics*. 2021, 9950202.
- Koralli, P., Fiat Varol, S., Mousdis, G., Mouzakis, D.E., Merdan, Z. & et al. (2022). Comparative studies of undoped/Al-doped/In-doped ZnO transparent conducting oxide thin films in optoelectronic applications. *Chemosensors*. 10, 162
- Kuo, K.Y., Liu, C.C., Huang, P.R., Hsu, S.W., Chuang, W.L., & et al. (2013). Improvement of optical transmittance and electrical properties for the Si quantum dot-embedded ZnO thin film. *Nanoscale Research Letters*. 8, 439.
- Labidi, S.N., & Mechat, B. (2023). Quartz Mineral as new Sorbent for Hg(II) Removal from Aqueous Solution: Adsorption Kinetics and Isotherm. *Pollution*. 9(2), 445-458.
- Laohawiroj, S., Mangkornkaew, A., Maneedaeng, A., & Fangsuwannarak, T. (2018). Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*. 13(2), 32-40.

- Laohawiroj, S., Fangsuwannarak, T., Rattanawichai, P., Limsiri, W., Naidoo N.J. & et al. (2022). Silicon composite films as an anti-reflection coating layer for third generation photovoltaic. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 29(3), 1-8.
- Lee, S.H., Kwak, G.Y., Hong, S., Kim, C., Kim, S., Kim, A., & et al. (2016). Ultraviolet responses of a heterojunction Si quantum dot solar cell. *Nanotechnology*. 28(3), 035402.
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods. *Solar Energy*. 84(9), 1745-1759.
- Lien, S.Y., Wu, D.S., Yeh, W.C., & Liu, J.C. (2006). Tri-layer antireflection coatings ($\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{TiO}_2$) for silicon solar cells using a sol-gel technique. *Solar energy materials and solar cells*. 90(16), 2710-2719.
- Limsiri, W., Fungsuwannarak, T., Mekmork, K., Laohawiroj, S., Naidoo, N.J., & et al. (2022). Effects of double layer anti-reflection coating on optical properties and electrical factors of black solar cells. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 29(3), 1-7.
- NREL transforming energy. Reference Air Mass 1.5 Spectra. Retrieved from <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.
- Mangkornkaew, A., & Fangsuwannarak, T. (2017). Characterization of patterns of localized doping using stamping technique for selective n-emitter solar cell structure. *IOP conference series: materials science and engineering*. 241(1), 012042.
- Mio, H., Kano, J., Saito, F., & Kaneko, K. (2002). Effects of rotational direction and rotation-to-revolution speed ratio in planetary ball milling. *Materials Science and Engineering: A*. 332(1), 75-80.
- Morkoç H. & Özgür, Ü. (2009). Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Movlaroo, T. (2018). Study of quantum confinement effects in ZnO nanostructures. *Materials Research Express*. 5(3) 035032.
- Muchuveni, E., Sathiaraj, T.S., & Nyakoty, H. (2017). Synthesis and characterization of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Heliyon*. 3(4), e00285.

- Omran, M., Fabritius, T., Heikkinen, E.P., & Chen, G. (2017). Dielectric properties and carbothermic reduction of zinc oxide and zinc ferrite by microwave heating. *Royal society open science*. 4(9), 170710.
- Pantohan, E.G., Candidato, R.T. & Vequizo, R.M. (2015). Surface characteristics and structural properties of sol-gel prepared ZnO-SiO₂ nanocomposite powders. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 79(1), 012024.
- Rattanachan, S.T., Krongarrom, P., & Fangsuwannarak, T. (2013). Influence of annealing temperature on characteristics of bismuth doped zinc oxide films. *American journal of applied sciences*. 10(11), 1427-1438.
- Rattanawichai, P., Fangsuwannarak, T., Phatthanakun, R., & Rattanachan, S.T. (2018). High photocurrent gain of spherical nano-crystalline ZnO:Bi film for advanced solar cells application. *Chiang Mai J. Sci.* 45(5): 1995-2004.
- Repp, S., & Erdem, E. (2016). Controlling the exciton energy of zinc oxide (ZnO) quantum dots by changing the confinement conditions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 152, 637-344.
- Richards, B.S., Cotter, J.E., Honsberg, C.B., & Wenham, S.R. (2000). Novel uses of TiO₂ in crystalline silicon solar cells. *Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000*, 375-378.
- Routh, A.F., & Zimmerman, W.B. (2004). Distribution of particles during solvent evaporation from films. *Chemical Engineering Science*. 59(14), 2961-2968.
- Pankove, J.I. (1997). *Optical Processes in Semiconductors*. New York. Dover publications.
- Panžić, I., Capan, I., Brodar, T., Bafti, A., & Mandić, V. (2021). Structural and electrical characterization of pure and Al-Doped ZnO nanorods. *Materials*. 14(23), 7454.
- Saad, I.B., Hannachi, N., Roisnel, T., & Hlel, F. (2019). Optical, UV-Vis spectroscopy studies, electrical and dielectric properties of transition metal-based of the novel organic-inorganic hybrid (C₆H₁₀N₂)(Hg₂Cl₅)₂•3H₂O. *Journal of Advanced Dielectrics*. 9(5), 1950040.
- Şenay, V. (2019). Some physical properties of nanostructured Al doped ZnO thin films synthesized by RF magnetron sputtering at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 30(10), 9910-9915.

- Sertel, T., Ozen, Y., Baran, V., & Ozcelik, S. (2019). Effect of single-layer Ta₂O₅ and double-layer SiO₂/Ta₂O₅ anti-reflective coatings on GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell performance. *Journal of alloys and compounds*. 806, 439-450.
- Shockley, W., & Queisser, H.J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 32(3), 510-519.
- Ren, S., Shou, C., Jin, S., Chen, G., Han, S., & et al. (2021). Silicon quantum dot luminescent solar concentrators and downshifters with antireflection coatings for enhancing perovskite solar cell performance. *ACS Photonics*. 8(8), 2392-2399.
- Solar power Europe (2024). Global Market Outlook for Solar Power 2024-2028. Brussels, Belgium. Rond-Point Robert Schuman.
- Sun, X., Xu, X., Song, G., Tu, J., Li, L., & et al. (2020). Preparation of MgF₂/SiO₂ coating with broadband antireflective coating by using sol-gel combined with electron beam evaporation. *Optical Materials*. 101, 109739.
- Tyona, M.D. (2013). A theoretical study on spin coating technique. *Advances in materials research*. 2, 195-208.
- Xu, Z., Hou, Q., Guo, F., Li, Y., & Li, C. (2019). Effects of strains on the electronic structure and optical properties of Ce-doped ZnO with interstitial H. *Computational Materials Science*. 169, 109120.
- Yahia, S.B., Znaïdi, L., Kanaev, A., & Petitet, J.P. (2008). Raman study of oriented ZnO thin films deposited by sol-gel method. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 71(4), 1234-1238.
- Zelenina, A., Sarikov, A., Gutsch, S., Zakharov, N., Werner, P., & et al. (2015). Formation of size-controlled and luminescent Si nanocrystals from SiO_xN_y/Si₃N₄ hetero-superlattices. *Journal of Applied Physics*. 117(17), 175303.
- Zhao, F., Yi, Y., Lin, J., Yi, Z., Qin, F., & et al. (2021). The better photoelectric performance of thin-film TiO₂/c-Si heterojunction solar cells based on surface plasmon resonance. *Results in Physics*. 28, 104628.

- Zhao, j., Wang, A., Green, M.A., & Ferrazza, F. (1998). 19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells. *Applied Physics Letters*. 73(14), 1991-1993.
- Zhong, S., Shen, W., Liu, F., & Li, X. (2013). Mass production of high efficiency selective emitter crystalline silicon solar cells employing phosphorus ink technology. *Solar energy materials and solar cells*. 117, 483-488.
- Zhou, S., Tang, R., Li, H., Fu, L., Li, B., & et al. (2019). Fluorescence resonance energy transfer effect enhanced high performance of Si quantum Dots/CsPbBr₃ inverse opal heterostructure perovskite solar cells. *Journal of Power Sources*. 493, 227065.
- Zolotoyabko, E. (1998). Fine interference effects in X-ray diffraction from multilayered structures. *Thin Solid Films*. 319(1), 35-38.



ภาคผนวก ก

การทำความสะอาดแผ่นฐานซีลคอนด้วยหลักการ
Radio corporative of America

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทำความสะอาดด้วยหลักการ Radio corporate of America

การทำความสะอาดแผ่นด้วยหลักการ Radio corporate of America (RCA) เป็นพื้นฐานสำคัญอันดับแรกในการปฏิบัติ สามารถใช้ทำความสะอาดเครื่องแก้ว แผ่นฐานกระจกควอตซ์หรือแผ่นฐานซิลิคอน ซึ่งมีการทำความสะอาดด้วย RCA สามารถจำแนกขั้นตอนออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการ RCA 1 และกระบวนการ RCA 2

กระบวนการ RCA 1 เป็นกระบวนการทำความสะอาดที่มีหน้าที่ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์บนพื้นผิวของเครื่องแก้ว แผ่นฐานกระจกควอตซ์หรือแผ่นฐานซิลิคอน สารละลาย RCA 1 ประกอบด้วย น้ำ H_2O_2 และ NH_4OH ในสัดส่วนเท่ากับ 5 : 1 : 1 ขั้นตอนการปฏิบัติคือ นำเครื่องแก้วหรือแผ่นฐานมาแช่สารผสม RCA 1 ที่อุณหภูมิ 70°C นาน 10 นาที หลังจากนั้นล้างออกด้วยน้ำ DI

กระบวนการ RCA 2 เป็นกระบวนการทำความสะอาดแผ่นฐานที่ต่อเนื่องจากกระบวนการ RCA 1 มีหน้าที่ในการกำจัดกำจัดไอออนของโลหะที่อยู่บนพื้นผิวของเครื่องแก้วหรือแผ่นฐานออก สารละลาย RCA 2 ประกอบด้วย น้ำ H_2O_2 และ HCl มีสัดส่วนเท่ากับ 5 : 1 : 1 ขั้นตอนการปฏิบัติคือ นำเครื่องแก้วหรือแผ่นฐานมาแช่สารผสม RCA 2 ที่อุณหภูมิ 70°C นาน 10 นาที หลังจากนั้นล้างออกด้วยน้ำ DI และทำเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

ภาคผนวก ข

การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายไซล-เจล
ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมีท์

การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมีท์ได้อ้างอิงจากงานวิทยานิพนธ์ ของนายศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ เรื่อง การศึกษาการผลิตฟิล์มบางซิลิคอนดอทจากการนำแผ่นซิลิคอนเสียหายมาผลิตใหม่เพื่อประยุกต์เป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน ซึ่งมีมวลโมเลกุลและความหนาแน่นในตารางที่ ข.1 และมีกระบวนการเตรียมสารละลายดังต่อไปนี้

ตารางที่ ข.1 มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสารตั้งต้นสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือบิสมีท์

สารตั้งต้น	สูตรเคมี	มวล โมเลกุล (g/mol)	ความ บริสุทธิ์ (%)	ความ หนาแน่น (g/ml)
ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต Zinc acetate dihydrate (ZnAc)	$\text{Zn}-(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219.49	99.5	1.735
เอทิลีนไกลคอล Ethylene glycol (EG)	$\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$	62.07	99.5	1.113
โมโนเอทานอลเอมีน Mono-ethanolamine (MEA)	$\text{NH}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$	61.08	99	1.020
บิสมีท์ไนเตรตเพนตะไฮเดรต Bismuth nitrate penta hydrate (Bi)	$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	485.07	98	2.900
เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบไมด์ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	364.45	96	-

ข.1 การคำนวณการเตรียมสารละลาย MEA ใน EG

การเตรียมสารละลาย MEA ใน EG ใช้สัดส่วนของ MEA : EG เท่ากับ 0.7M : 1M

วิธีเตรียม

- พิจารณาความบริสุทธิ์ ของ MEA มีค่าเท่ากับ 99%

จากสารตั้งต้น MEA	100 g	มีเนื้อสารคิดเป็น	99 g
ดังนั้น จากความหนาแน่น MEA	1.02 g/ml	มีเนื้อสารคิดเป็น	1.0098 g/ml
จากสารละลาย MEA	1 ml	มีน้ำหนักสาร	1.0098 g
คิดเป็นปริมาตรของ MEA 1000 ml		จะมีน้ำหนักสาร	$1.0098 \times 1000 = 1009.8 \text{ g}$

- พิจารณามวลโมเลกุลของ MEA

จากน้ำหนักสารตั้งต้น MEA	61.08 g	คิดเป็น	1 mol
ถ้า MEA มีน้ำหนัก	1009.8 g	จะคิดเป็น	$1009.8 / 61.08 = 16.532 \text{ mol}$
ดังนั้นจึงได้ความเข้มข้นของ MEA ในขวดเท่ากับ	16.532 mol/1000ml หรือ 16.532 M		

- ต้องการเตรียม MEA 0.7M ละลายใน EG 100 ml

จากสมการ (ข.1)

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

(ข.1)

โดยที่ C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ความเข้มข้นจากขวด)

C_2 คือ ความเข้มข้นสุดท้าย (ความเข้มข้นที่ต้องการ)

V_1 คือ ปริมาตรเริ่มต้น (ปริมาตร MEA จากขวดต้องใช้)

V_2 คือ ปริมาตรสุดท้าย (ปริมาตรสารที่ต้องการ)

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$16.532 \times V_1 = 0.7 \times 100$$

$$V_1 = 4.234 \text{ ml}$$

ดังนั้นต้องเตรียม MEA 4.234 ml แล้วเติม EG เพื่อให้ได้ปริมาตร 100 ml

ข.2 การเตรียมสาร ZnAc

การเตรียมสารละลาย ZnAc ใน MEA + EG โดยมีสัดส่วนของ ZnAc : MEA เท่ากับ 1 M : 1 M และมีสัดส่วนของ ZnAc : EG เท่ากับ 0.7 M : 1 M

วิธีเตรียม

- พิจารณามวลโมเลกุลของ ZnAc

จากสารตั้งต้น ZnAc	1 mol	มีน้ำหนัก	219.49 g
ถ้าใช้สารตั้งต้น ZnAc	0.7 mol	คิดเป็นน้ำหนัก	153.64 g

- ทำการเตรียม ZnAc ในสารละลาย MEA + EG ปริมาตร 25 ml

จากในสารละลาย MEA + EG	1000 ml ใช้ปริมาณสาร ZnAc	153.64 g
------------------------	---------------------------	----------

ถ้าทำการเตรียม MEA + EG 25 ml จะใช้ปริมาณสาร ZnAc $\frac{153.64 \times 25}{1000} = 3.841$ g

- พิจารณาความบริสุทธิ์ ของ ZnAc มีค่าเท่ากับ 99.5%

สารตั้งต้น ZnAc บริสุทธิ์ 99.5 g คือน้ำหนักสาร ZnAc 100 g

ถ้าใช้สาร ZnAc 3.841 g จะคิดเป็นน้ำหนัก $\frac{100 \times 3.841}{99.5} = 3.86$ g

ดังนั้นต้องมีสาร ZnAc น้ำหนัก 3.86 g ละลายอยู่ในสารละลาย MEA + EG ปริมาตร 25 ml

ข.3 การเตรียมสาร Bismuth nitrate penta hydrate (Bi) ละลายใน EG ให้มีความเข้มข้นของ Bi เท่ากับ 0.125 M ในปริมาตร 10 ml และการคำนวณปริมาณสารละลาย Bi + EG ที่ละลายอยู่ในสารละลายโซลเจล ให้มีจำนวน atom% ของบิสมัทเท่ากับ 0.2 at%

- พิจารณามวลโมเลกุลของ Bi

สารตั้งต้น Bi จำนวน	1 mol	มีน้ำหนัก	485.07 g
ถ้าสารตั้งต้น Bi จำนวน	0.125 mol	คิดเป็นน้ำหนัก	$485.07 \times 0.125 = 60.634$ g

- พิจารณาความบริสุทธิ์ของ Bi มีค่าเท่ากับ 98%

สารตั้งต้น Bi บริสุทธิ์ 98 g คือน้ำหนักสาร Bi 100 g

ถ้าใช้สาร Bi 60.634 g จะคิดเป็นน้ำหนัก $\frac{100 \times 60.634}{98} = 61.871$ g

- ทำการเตรียม Bi ในสารละลาย EG ปริมาตร 10 ml

จากในสารละลาย EG 1000 ml ใช้ปริมาณสาร Bi 61.871 g

ถ้าทำการเตรียม EG 10 ml จะใช้ปริมาณสาร ZnAc $\frac{61.871 \times 10}{1000} = 0.619$ g

- การคำนวณ atom% ของบิสมัทให้มีค่าเท่ากับ 0.2 at% ในสารละลายโซลเจล

จากสมการ

$$\frac{[\text{Bi}]}{[\text{Bi}] + [\text{ZnAc}]} \times 100 = \text{at\%} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่

[Bi] คือ ความเข้มข้นของ Bismuth nitrate penta hydrate

[ZnAc] คือ ความเข้มข้นของ Zinc acetate dehydrate มีค่าเท่ากับ 0.7 M

แทนค่าลงในสมการที่ ข.2

$$\frac{[\text{Bi}]}{[\text{Bi}] + 0.7\text{M}} \times 100 = 0.2\text{at\%}$$

$$[\text{Bi}] = \frac{(0.2\text{at\%}) \times ([\text{Bi}] + 0.7\text{M})}{100}$$

$$[\text{Bi}] = 0.002[\text{Bi}] + 0.0014$$

จะได้

$$[\text{Bi}] = 0.001403 \text{ M}$$

ดังนั้นสารละลายโซลเจลต้องมีความเข้มข้นของ Bi เท่ากับ 0.001403 M จึงมีจำนวน atom% ของบิสมัทเท่ากับ เท่ากับ 0.2 at%

- การคำนวณปริมาณสาร Bi + EG ละลายในสารละลายโซลเจลปริมาตร 25 ml

จะได้

$$V_1 = \frac{0.00143 \times 25}{0.125} = 0.02806 \text{ ml}$$

ดังนั้นต้องมีสารละลาย Bi + EG ที่มีความเข้มข้น 0.125 M ปริมาตร 0.02806 ml ละลาย
อยู่ในสารละลายโซลเจลปริมาตร 25 ml เพื่อให้ได้จำนวน atom% ของบิสมีท์เท่ากับ 0.2at%

**ข.4 การเตรียมสาร Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ละลายใน EG ให้มีความ
เข้มข้นของ CTAB เท่ากับ 0.1 M ในปริมาตร 10 ml และการคำนวณปริมาณสารละลาย CTAB
+ EG ที่ละลายอยู่ในสารละลายโซลเจล ให้มีจำนวน wt% ของ CTAB เท่ากับ 0.3 wt%**

- พิจารณามวลโมเลกุลของ CTAB

สารตั้งต้น CTAB จำนวน 1 mol มีน้ำหนัก 364.45 g

ถ้าสารตั้งต้น CTAB จำนวน 0.1 mol จะมีน้ำหนัก $364.45 \times 0.1 = 36.445$ g

- พิจารณาความเข้มข้นของ CTAB 0.1 M ละลายใน EG

ในสารตั้งต้น CTAB ปริมาตร 1000 ml CTAB มีน้ำหนัก 36.445 g

ถ้าสารตั้งต้น CTAB ปริมาตร 10 ml CTAB จะมีน้ำหนัก $\frac{36.445 \times 10}{1000} = 0.36445$ g

- พิจารณาความบริสุทธิ์ของ CTAB มีค่าเท่ากับ 96%

สารตั้งต้น CTAB บริสุทธิ์ 96 g คือน้ำหนักสาร CTAB 100 g

ถ้าใช้สาร CTAB 0.36445 g จะคิดเป็นน้ำหนัก $\frac{100 \times 0.36445}{96} = 0.3796$ g

ดังนั้นต้องเตรียมสาร CTAB จำนวน 0.3796g ละลายอยู่ใน EG 10 ml

- พิจารณามวลโมเลกุลของ CTAB ละลายในสารละลายโซลเจล

สารตั้งต้น CTAB น้ำหนัก 364.45 g คิดเป็น 1 mol

ถ้าสารตั้งต้น CTAB น้ำหนัก 0.3 g จะคิดเป็น $\frac{0.3}{364.45} = 0.000823$ mol

- พิจารณาความเข้มข้นของ CTAB 0.3 wt% (0.3g/100ml) ละลายในสารละลายโซลเจล สารตั้งต้น CTAB ปริมาตร 100 ml มี CTAB จำนวน 0.000823 mol

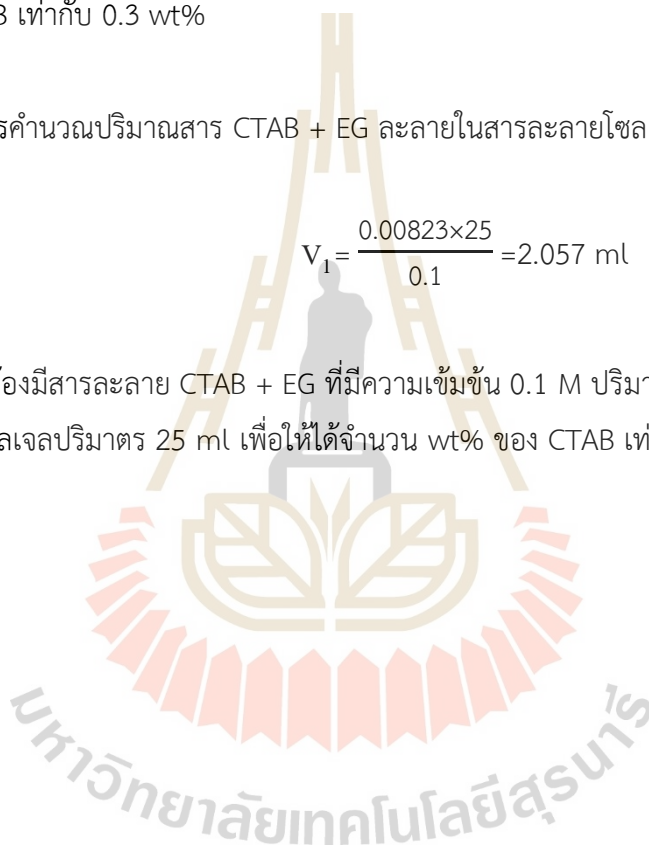
ถ้าสารตั้งต้น CTAB ปริมาตร 1000 ml จะมี CTAB จำนวน $\frac{0.000823 \times 1000}{100} = 0.00823 \text{ mol}$

ดังนั้นสารละลายโซลเจลต้องมีความเข้มข้นของ CTAB เท่ากับ 0.00823 M จึงมีจำนวน wt% ของ CTAB เท่ากับ 0.3 wt%

- การคำนวณปริมาณสาร CTAB + EG ละลายในสารละลายโซลเจลปริมาตร 25 ml

จะได้ $V_1 = \frac{0.00823 \times 25}{0.1} = 2.057 \text{ ml}$

ดังนั้นต้องมีสารละลาย CTAB + EG ที่มีความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 2.057 ml ละลายอยู่ในสารละลายโซลเจลปริมาตร 25 ml เพื่อให้ได้จำนวน wt% ของ CTAB เท่ากับ 0.3 wt%



ภาคผนวก ค

การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจล
ซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณสัดส่วนสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์ เจืออะลูมิเนียม

ตารางที่ ค.1 มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสารตั้งต้นสารละลายเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียม

สารตั้งต้น	สูตรเคมี	มวล โมเลกุล (g/mol)	ความ บริสุทธิ์ (%)	ความ หนาแน่น (g/ml)
ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต Zinc acetate dihydrate (ZnAc)	$\text{Zn}-(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219.49	99.5	1.735
ไอโซโพรพานอล Isopropanol (IPA)	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	60.10	99.0	0.786
โมโนเอทานอลเอมีน Mono-ethanolamine (MEA)	$\text{NH}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$	61.08	99.0	1.020
เอทานอล Ethanol (EtOH)	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	46.07	99.0	0.789
อะลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต Aluminum chloride hexahydrate (Al)	$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	241.43	95.0	2.398

ค.1 การคำนวณหาปริมาณสาร ZnAc ในสารละลาย 25 ml

เงื่อนไขในการเตรียมสาร ZnAc ถูกกำหนดให้มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.2 M ในสารละลาย 25 ml

วิธีเตรียม

- พิจารณาน้ำหนักของ ZnAc จากมวลโมเลกุล

จากสารตั้งต้น ZnAc	1 mol	มีมวลโมเลกุล	219.49 g
ต้องการ	0.2 mol	จะได้ น้ำหนักสาร	43.898 g

- พิจารณาปริมาณ ZnAc ที่ใช้เมื่อเตรียมสารปริมาตร 25 ml

ในปริมาตรสารละลาย ZnAc	1000 ml	ต้องใช้สาร	43.898 g
ถ้าพิจารณาปริมาตร	25 ml	จะคิดเป็น	1.09745 g
- พิจารณาความบริสุทธิ์ ของ ZnAc มีค่าเท่ากับ 99.5 %

$$\text{จะได้ปริมาณของ ZnAc เท่ากับ } 1.09745 \times \frac{100}{99.5} = 1.1029 \text{ g}$$

ค.2 การคำนวณหาค่า MEA

การเตรียม MEA ในสารละลาย 25 ml กำหนดโดยมีสัดส่วนความเข้มข้นของของ MEA : ZnAc เท่ากับ 0.75M : 1M

วิธีเตรียม

- พิจารณาความบริสุทธิ์ ของ MEA มีค่าเท่ากับ 99%

จากสารตั้งต้น MEA	100 g	มีเนื้อสารคิดเป็น	99 g
ดังนั้น จากความหนาแน่น MEA	1.02 g/ml	มีเนื้อสารคิดเป็น	1.0098 g/ml
จากสารละลาย MEA	1 ml	มีน้ำหนักสาร	1.0098 g
 - คิดเป็นปริมาตรของ MEA 1000 ml จะมีน้ำหนักสาร $1.0098 \times 1000 = 1009.8 \text{ g}$
 - พิจารณามวลโมเลกุลของ MEA

จากน้ำหนักสารตั้งต้น MEA	61.08 g	คิดเป็น	1 mol
--------------------------	---------	---------	-------
 - ถ้า MEA มีน้ำหนัก 1009.8 g จะคิดเป็น $1009.8/61.08 = 16.532 \text{ mol}$
 ดังนั้นจึงได้ความเข้มข้นของ MEA ในขวดเท่ากับ 16.532 mol/1000ml หรือ 16.532 M
 - พิจารณาสัดส่วนของ MEA : ZnAc เท่ากับ 0.75M : 1M

จากสัดส่วน ZnAc	1 M	จะต้องมี MEA	0.75 M
-----------------	-----	--------------	--------
 - ถ้าใช้ ZnAc 0.2 M จะต้องใช้ MEA 0.15 M
 - ต้องการเตรียม MEA 0.75 M ในสารละลายทั้งหมด 25 ml
- แทนค่าลงในสมการ (ข.1) จะได้

$$V_1 = \frac{0.75 \times 25}{16.532} = 0.2268 \text{ ml}$$

ดังนั้นต้องเตรียม MEA ในปริมาตร 0.2268 ml

ค.3 การเตรียมสาร Aluminum chloride hexahydrate ละลายในเอทานอลให้มีความเข้มข้นของ Al เท่ากับ 0.125 M ในปริมาตร 10 ml และการคำนวณปริมาณสารละลาย Al + EtOH ที่ละลายอยู่ในสารละลายโซลเจล ให้มีจำนวน atom% ของ Al เท่ากับ 1 at%

- พิจารณามวลโมเลกุลของ Al

จากสารละลาย Al	1000 ml	เท่ากับ	0.125 mol
ถ้าเตรียมปริมาตร	10 ml	จะมีค่าเท่ากับ	0.00125 mol
สารตั้งต้น Al จำนวน	1 mol	มีน้ำหนัก	241.43 g
ถ้าสารตั้งต้น Al จำนวน	0.00125 mol	คิดเป็นน้ำหนัก	$241.43 \times 0.00125 = 0.30178 \text{ g}$

- พิจารณาความบริสุทธิ์ของ Al มีค่าเท่ากับ 95 %

$$\text{จะคิดเป็นน้ำหนัก} \frac{100 \times 0.30178}{95} = 0.318 \text{ g}$$

ดังนั้นในสารละลาย Al + EtOH ปริมาตร 10 ml ต้องมีส่วนผสมของ Aluminum chloride hexahydrate 0.318 g จึงจะมีความเข้มข้นของ Al เท่ากับ 0.125 M

- การคำนวณ atom% ของอะลูมิเนียมให้มีค่าเท่ากับ 1 at% ในสารละลายโซลเจล
จากสมการ ค.1

$$\frac{[Al]}{[Al] + [ZnAc]} \times 100 = x \text{ at\%} \quad (\text{ค.1})$$

จัดรูปสมการจะได้สมการที่ ค.2

$$[Al] = \frac{\left[\frac{x \text{ at\%} \times [ZnAc]}{100} \right]}{\left[1 - \frac{x \text{ at\%}}{100} \right]} \quad (\text{ค.2})$$

โดยที่ [Al] คือ ความเข้มข้นของ Aluminum chloride hexahydrate
[ZnAc] คือ ความเข้มข้นของ Zinc acetate dehydrate มีค่าเท่ากับ 0.7 M

แทนค่าลงในสมการที่ ค.2 จะได้

$$[Al] = \frac{\left[\frac{1 \times 0.2}{100} \right]}{\left[1 - \frac{1}{100} \right]} = 0.00202 \text{ M}$$

ดังนั้นสารละลายโซลเจลต้องมีความเข้มข้นของ Al เท่ากับ 0.00202 M จึงมีจำนวน atom% ของอะลูมิเนียมเท่ากับ เท่ากับ 1 at%

การคำนวณปริมาณสาร Aluminum chloride hexahydrate ละลายในสารละลายโซลเจลปริมาตร 25 ml ด้วยสมการที่ ข.1

จะได้

$$V_1 = \frac{0.00202 \times 25}{0.125} = 0.404 \text{ ml}$$

ดังนั้นต้องมีสารละลาย Al ที่มีความเข้มข้น 0.125 M ปริมาตร 0.404 ml ละลายอยู่ในสารละลายโซลเจลปริมาตร 25 ml เพื่อให้ได้จำนวน atom% ของอะลูมิเนียมเท่ากับ 1 at%



ภาคผนวก ง

การคำนวณด้านเศรษฐศาสตร์ ที่แสดงในตารางที่ 5.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 5.4 แสดงราคาต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN_x เปรียบเทียบกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ p/n/SiN_x/BiZnO/SD/BiZnO₂ stack เริ่มต้นพิจารณารายการต้นทุนเฉพาะส่วนที่เป็น Additional cost เท่านั้น (เนื่องจากการคำนวณส่วนอื่นๆ เช่น Direct cost ที่ประกอบด้วย แผ่นซิลิคอน สารเคมี กาวโลหะ ไหมสกรีนและยางปิด และแก๊ส เพื่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiN_x ไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลได้)

การคำนวณเริ่มต้นพิจารณาสารเคมีในการผลิตฟิล์มบาง SD/BiZnO₂ stack ใช้สารเคมีประกอบด้วย Zinc acetate Ethanolamine Ethylene glycol Bismuth(III) nitrate pentahydrate และ Cetyltrimethyl Ammonium Bromide รวมถึงสารที่ใช้ในการเปิดหลอดลายคือ Nitric acid โดยปริมาตรสารที่ใช้สามารถแสดงในตารางที่ ง1

ตารางที่ ง.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการพิจารณาด้านต้นทุน

สารเคมีที่ใช้	พิจารณาการเตรียมสารละลาย BiZnO ปริมาตร 25 ml		พิจารณาแผ่นซิลิคอน 1 ชิ้น ขนาด 3×3 cm ² โดย หมุนเหวี่ยง 5 ครั้ง ปริมาตรสาร Si ink ที่ต้องใช้ 1 ml		พิจารณาแผ่นซิลิคอน 1 ชิ้นขนาด 15.67×15.67 cm ² โดย หมุนเหวี่ยง 5 ครั้ง ปริมาตรสาร Si ink ที่ต้องใช้ 27.283 ml		พิจารณาแผ่นซิลิคอน 10,000,000 ชิ้น ขนาด 15.67×15.67 cm ² ปริมาตรสาร Si ink ที่ต้องใช้ 27,283,000 ml	
	ปริมาณ	หน่วย	ปริมาณ	หน่วย	ปริมาณ	หน่วย	ปริมาณ	หน่วย
สารตั้งต้น								
ZnAc	3.860	g	0.154	g	4.213	g	42,125,277.96	g
MEA	0.847	ml	0.034	ml	0.924	ml	9,241,369.27	ml
Eg	19.153	ml	0.766	ml	20.902	ml	209,024,319.62	ml
สารปัสเมัท								
Bi	0.017	g	0.00069	g	0.0189	g	189,057.37	g
Eg	0.274	ml	0.011	ml	0.299	ml	2,990,527.45	ml
สาร CTAB								
CTAB	0.078	g	0.0031	g	0.085	g	853,392.65	g
Eg	2.060	ml	0.082	ml	2.248	ml	22,481,365.96	ml
รวม	≈25.00	ml	≈1	ml	≈27.283	ml	≈27,283,000	ml
สารที่ใช้ประทับลาย nitric acid เข้มข้น 20%								
Nitric acid	-	-	0.0615	ml	1.679	ml	16,789,668.38	ml

จากนั้นพิจารณาจัดหาซื้อสารเคมีให้เพียงพอต่อความต้องการ เมื่อผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10,000,000 แผ่น สามารถพิจารณาสินค้าในตารางที่ ง.2. และต้นทุนได้จากตารางที่ ง.3 และราคาสินค้าแสดงในตารางที่ ง.3

ตารางที่ ง.2 ราคาสินค้าที่พิจารณา

สารที่ใช้	ราคาที่ขายในหน้าเว็บไซต์		อ้างอิง
	ราคา	หน่วย	
ZnAc	36.22	บาท/กิโลกรัม	https://thai.alibaba.com/product-detail/Factory-Supply-High-quality-CAS-557-1601204093499.html?spm=a2700.7724857.0.0.75f32d82cLlBI1
MEA	36,919.81	บาท/1,000 กิโลกรัม (ไม่แบ่งขาย)	https://www.alibaba.com/product-detail/99-5-CAS-141-43-5_1600915773650.html?spm=a2700.details.you_may_like.2.1c02580aQQHZ1w
Eg	19,008.00	บาท/230 กิโลกรัม (ไม่แบ่งขาย)	https://eapearlchem.en.made-in-china.com/product/UdHJBuzxHiWK/China-Mono-Ethylene-Glycol-Meg-99-9-Min-Chemical-Solvent-for-Auto-Antifreeze.html
Bi	228.096	บาท/0.5 กิโลกรัม	https://xilongchemical.en.made-in-china.com/product/WFgamAHlOhcp/China-Industrial-Tech-Grade-Chemical-Raw-Material-Bi-NO3-3-5H2O-Bismuth-III-Bismuth-Nitrate.html
CTAB	325.67	บาท/กิโลกรัม	https://www.indiamart.com/proddetail/cetyl-trimethyl-ammonium-bromide-cas-no-57-09-0-2853840099262.html
Nitric acid	26.08	บาท/ลิตร	https://www.indiamart.com/proddetail/tr-grade-nitric-acid-1705011833.html

ตารางที่ ง.3 ราคาที่ใช้ในการพิจารณาดำเนินทุน

สารที่ใช้	ปริมาณขั้นต่ำที่ต้องใช้	หน่วย	น้ำหนักโดยประมาณที่ใช้ (g)	ราคาที่ต้องซื้อ (บาท)	Cost per unit (Baht/g)
ZnAc	42,125,277.96	g	42,126,000.00	1,525,803.72	0.03622
MEA	9,241,369.27	ml	10,000,000.00	369,198.10	0.03692
Eg	234,496,213.02	ml	210,910,000.00	17,430,336.00	0.08264
Bi	189,057.37	g	190,000.00	81,920.85	0.43116
CTAB	853,392.65	g	854,000.00	278,122.18	0.32567
Nitric acid	16,789,668.38	ml	11,120,000.00	442,000.00	0.03975

หมายเหตุ 1: สารที่เป็นของเหลวที่มีหน่วยในรูปของปริมาตรถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของหน่วยน้ำหนักโดยแปลงค่าจากสมการความหนาแน่นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

จากตารางที่ ง.1 และ ง.3 จะสามารถคำนวณได้ว่า 1 แผ่นซิลิคอนต้องใช้สารละลายคิดเป็นต้นทุนได้จากสมการที่ ง.1 และสามารถสรุปได้ในตารางที่ ง.4

$$\text{ต้นทุนสารเคมี} = \text{น้ำหนักสารเคมีที่พิจารณา} \times (\text{Cost per unit}) \quad \text{ง.1}$$

ตารางที่ ง.4 ราคาต้นทุนการใช้สารเคมี

สารที่ใช้	พิจารณาแผ่นซิลิคอน 1 ชั้นขนาด 3×3 cm ² (บาท)	พิจารณาแผ่นซิลิคอน 1 ชั้น ขนาด 15.67×15.67 cm ² (บาท)	พิจารณาแผ่นซิลิคอน 10,000,000 ชั้นขนาด 15.67×15.67 cm ² (บาท)
ZnAc	0.0055924	0.15258	1,525,777.57
MEA	0.0012321	0.03361	336,147.39
Eg	0.0638196	1.74120	17,412,023.97
Bi	0.0002988	0.00815	81,514.43
CTAB	0.0010187	0.02779	277,924.38
Nitric acid	0.0016199	0.06674	667,359.12
total	0.0735813	2.0300747	20,300,746.86

ลำดับถัดมาคือการพิจารณาราคาต่อกำลังไฟฟ้า (Baht/watt) โดยสามารถพิจารณาได้จากประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ จากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 18.4% เมื่อมีฟิล์มบาง SD/BiZnO₂ stack สามารถเพิ่มประสิทธิภาพจากเซลล์อ้างอิงเป็น 18.6% + 1.86% = 20.26% ดังนั้นหากพิจารณาใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 15.675 × 15.675 cm² จะสามารถพิจารณากำลังไฟฟ้า จากสมการประสิทธิภาพในสมการที่ ง.2

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad \text{ง.2}$$

โดยที่ P_{in} คือกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.1 W/cm²

จากสมการที่ ง.2 สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1×1 cm² ได้ ดังนี้

$$\text{แทนค่าลงในสมการ ง.2} \quad 20.26 \% = \frac{P_{out}}{0.1 \frac{W}{cm^2}} \times 100\%$$

$$\text{จะได้} \quad P_{out} = 0.02026 \frac{W}{cm^2}$$

จากนั้นพิจารณาแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 15.675 × 15.675 cm² ซึ่งสามารถพิจารณาโดยเทียบบัญญัติไตรยางค์ได้ดังนี้

เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 cm² สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.02026 W

ถ้าใช้แผ่นขนาด 15.675 × 15.675 cm² จะผลิตได้ 0.02026 × 15.675 × 15.675 = 4.978 W

ดังนั้นแผ่นขนาด 15.675 × 15.675 cm² สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าขนาด 4.978 W/piece

และเมื่อพิจารณาจำนวนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ 10,000,000 แผ่น จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ เท่ากับ $4.978 \times 10,000,000 = 49,780,000 \text{ W}$

หมายเหตุ สามารถใช้สมการลดในการคำนวณได้แสดงในสมการที่ ง.3 ซึ่งต้องพิจารณาพื้นที่ ขนาดเซลล์แสงอาทิตย์ในหน่วย cm^2

$$P_{\text{out}} = \frac{\eta \times \text{Area of solar cell (cm}^2\text{)}}{1000} \times \text{no. of solar cells} \quad \text{ง.3}$$

ดังนั้นจะสามารถพิจารณาราคาของเสาเคมีที่เพิ่มขึ้นมาในหน่วย บาทต่อวัตต์ ได้จากสมการที่ 5.1 ในบทที่ 5 จะได้ว่า

จาก	ราคาต้นทุน [บาท/วัตต์] =	$\frac{\text{ราคาต้นทุนที่พิจารณาทั้งหมด [บาท]}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด [วัตต์]}}$
แทนค่า	ราคาต้นทุน [บาท/วัตต์] =	$\frac{20,300,746.86 \text{ [บาท]}}{49,780,000 \text{ [วัตต์]}} = 0.41 \text{ บาท/วัตต์}$

ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่า ต้นทุนของ 1 วัตต์ ต้องใช้เงินทุนของสารละลายที่เพิ่มขึ้นอีก 0.41 บาท

ลำดับถัดมาคือการคำนวณต้นทุนของ Additional cost ประกอบด้วย Flash foam เครื่อง Spin coater เครื่อง Military ball mill Qm2l หม้อบด Ball mill jar ลูกบด alumina ball และ เครื่อง Stamp machine ซึ่งสามารถพิจารณาข้อมูลและผลการคำนวณต้นทุนได้ในตารางที่ ง.5

ตารางที่ ง.5 รายการต้นทุนเพิ่มเติม

รายการ Additional cost	การพิจารณาราคาใน 1 ปี	บาท/วัตต์
Flash foam	Flash foam 1 แผ่น ใช้งานได้ 50,000 ครั้ง ราคาแผ่นละ 72.56 บาท ดังนั้นแผ่นเซลล์ 10,000,000 แผ่น ต้องใช้ Flash foam 200 แผ่น คิดเป็น 14,512 บาท	0.0003
Military ball mill รุ่น Qm2l	พิจารณาใช้งานได้ 5 ปี แล้วทำการเปลี่ยนเครื่อง ราคาเครื่องละ 73,032 บาท ซื้อ 5 เครื่อง ดังนั้นถ้าคิดต่อปีจะเป็นราคา 73,032 บาท	0.0105
Ball mill jar	พิจารณาซื้อ 20 ชุด ราคา 288,900 บาท ใช้งานได้ 1 ปี จึงคิดเป็นราคา 28,890 บาท	0.0015
Spin coater	พิจารณาใช้งานได้ 5 ปี แล้วทำการเปลี่ยนเครื่อง ราคาเครื่องละ 131,292.00 บาท ซื้อ 20 เครื่อง ดังนั้นถ้าคิดต่อปีจะเป็นราคา 525,168 บาท	0.0058
Stamp machine	พิจารณาใช้งานได้ 5 ปี แล้วทำการเปลี่ยนเครื่อง สร้างเครื่องเอง ราคาเครื่องละ 50,000 บาท รวมค่าจ้างแล้วโดยจัดทำ 20 เครื่อง ดังนั้นถ้าต่อปี คิดเป็น 200,000 บาท	0.0040
	รวม	0.0221



ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

ปริญญาเอกและปริญญาโท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาเอก

- ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์, ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, พีรภูมิ รัตนวิชัย, วรากร ลีมีศิริ และคณะ (2566). ซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมสำหรับประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46*. (หน้า 397-400)
- พีรภูมิ รัตนวิชัย, ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์, ภาคิน อินทร์เจริญ, ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ และคณะ (2566). ผลของฟูลอยน้ำสีเทากับฟูลอยน้ำดำที่มีผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้า. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46*. (หน้า 405-408)
- Rattanawichai, P., Fangsuwannarak, T., & Laohawiroj, S. (2021). Monitoring System of Smart Cassava Farm with Solar Energy by Using Internet of Things. *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. 146-149.
- Fangsuwannarak, T., Laohawiroj, S., & Mekmork, K. (2019). Synthesis of Phosphorus Solution for n^+ Si Selective Emitter Solar Cell by Spin on Doping. *2019 The 2nd International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2019)*. 4.
- Fangsuwannarak, T., Laohawiroj, S., Rattanawichai, P., Mekmork, K., & et al. (2021). Silicon dots films deposited by spin-coating as a generated carrier addition layer of third generation photovoltaics. *Progress in Natural Science: Materials International*. 31(2), 192-200.
- Laohawiroj, S., Fangsuwannarak, T., Rattanawichai, P., Limsiri, W., & et al. (2022). Silicon composite films as an anti-reflection coating layer for third generation photovoltaic. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 29(3), 1-8.
- Limsiri, W., Fangsuwannarak, T., Mekmork, K., Laohawiroj, S., & et al. (2022). Effects of double layer anti-reflection coating on optical properties and electrical factors of black solar cells. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 29(3), 1-7.
- Naidoo, N.J., Fangsuwannarak, T., Laohawiroj, S., Rattanawichai, P., & et al. (2022). Effect of varied number of multilayers, for cadmium sulphide with bismuth-doped zinc oxide buffer layer, on optical properties. *Ferroelectrics*. 586(1), 147-159.

- Rattanawichai, P., Fangsuwannarak, T., Fangsuwannarak, K., Laohawiroj, S., & et al. (2022). Effect of rapid thermal treatment on the electrical conductivity improvement of nc-ZnO:Bi thin film and ITO substrate. *Ferroelectrics*. 586(1), 160-1.
- Fangsuwannarak, T., Rattanawichai, P., Laohawiroj, S., Limsiri, W., & et al. (2022). Conductivity Improvement of Spherical Nano-Crystalline ZnO:Bi/Indium Tin Oxide Layer for Low Cost of Semiconductor Devices. *Integrated Ferroelectrics*. 222(1), 14-27.

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท

- พีรฤติ รัตนวิชัย, ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, รุ่งเรือง พัฒนากุล, และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ (2561). การศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย บิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์. *การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14*. 879-885.
- ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, พีรฤติ รัตนวิชัย, กมลชนก เมฆหมอก, และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ (2561). การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนดอปในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์โด๊ปบิสมัทจากหมึก คอมโพสิตซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14*. 899-905.
- ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, พีรฤติ รัตนวิชัย, กมลชนก เมฆหมอก, วรากร ลีมีศิริ และคณะ (2562). การ สังเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัทที่มีผลึกนาโน สำหรับเป็นชั้นรับแสงของเซลล์ แสงอาทิตย์. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15*. 1022-1028.
- พีรฤติ รัตนวิชัย, ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, กมลชนก เมฆหมอก, วรากร ลีมีศิริ และคณะ (2562). การศึกษา โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแสงของฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนชั้นซิงค์ออกไซด์เจือด้วย บิสมัท สำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์. *การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14*. 1042-1049.
- กมลชนก เมฆหมอก, วรากร ลีมีศิริ, ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, พีรฤติ รัตนวิชัย และคณะ (2562). ผลของ อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วต่อประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14*. 1050-1055.

- Laohawiroj, S., Mangkornkaew, A., Maneedaeng, A., and Fangsuwannarak, T. (2018). Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*. 13(2), 34-40.



SILICON COMPOSITE FILMS AS AN ANTI-REFLECTION COATING LAYER FOR THIRD GENERATION PHOTOVOLTAIC

Supanut Laohawiroj¹, Thipwan Fangsuwannarak^{1,2,*}, Peerawoot Rattanawichai¹, Warakorn Limsiri¹, Nikhil Jaden Naidoo¹ and Rungrueang Phatthanakun³

Received: March 12, 2021; Revised: June 23, 2021; Accepted: July 19, 2021

Abstract

Anti-reflection coating (ARC) layer is a thin dielectric layer to be useful on the surface of photovoltaic cells due to its supportable reduced carrier recombination. The silicon composite film acts as an ARC layer that can collect the desired light wavelength. In this work, silicon composite ink (Si-ink) consisting of silicon powder and phospho-silicate glass solution (PSG-sol) was prepared by the sol-gel technique at the low temperature. Silicon powder at the average diameter of around 4 microns was produced in-house by grinding technique. Silicon composite films were formed on quartz substrates by spin coating technique. The effects of the varying Si concentrations on the electrical resistivity, and the optical, properties were studied to find the optimal Si dense. It is found that the Si composite films provide the basal absorption edge shifting to the higher energy along with the decrease of Si dense, and also the optical band gap of Si composite films computed by Tauc plot were shown the expanding value to the higher energy from 1.2 eV to 1.7 eV. The refractive index and extinction coefficient of the Si composite films are much lower than Si bulk. The refractive index of the Si composite film can be adjustable by varying the Si dense. The optimal Si composite conditions are in the ratio of PSG-sol:Si as 1:0.050 and 1:0.025 to provide good dielectric, low reflectance, high absorbance properties. The Si composite film with PSG matrix can be a promising approach for ARC layer in the third-generation solar cells.

Keywords: Anti-reflection coating, silicon ink, phosphosilicate glass, silicon composite film

Introduction

Solar cells have normally been used for generating electrical power from sunlight directly. They have many types such as crystalline silicon solar cell, amorphous silicon solar cell, GaAs solar cell, perovskite solar cell, organic solar cell, multijunction solar cell and etc (Glunz *et al.*, 2012;

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. E-mail : thipwan@g.sut.ac.th

² Research Network NANOTEC-SUT on Advanced Nanomaterials and Characterization, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

³ BL6a: Deep X-ray Lithography, Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* Corresponding author

concentration between Si powder and PSG sol in range of 0:1 to 0.075:1, respectively. Then the Si-inks were blended by ultrasonic to disperse the accumulated Si powder for 10 min. The Si ink was instantaneously spun on quartz substrates with a spin rate of 2,500 rpm for 30 sec and baked at 50°C for 1 h. The thickness of the film was measured by an optical surface profiler (Bruker).

The optical microscope was used to observe the dispersion of silicon powder. The electrical properties of the film for getting the relationship between the current density and voltage curve were analyzed by two probe methods (Lataste, 2010; Singh, 2013), which have 0.05 cm diameter of silver metal contacts for becoming electrical current pass through the film. And the intensity of the light for the illumination test is about 1.77 mW/cm². The resistivity (ρ) can be calculated by using the Equation (1) (Kaewphoka *et al.*, 2014).

$$\rho = \frac{R \times A}{l} = \frac{R \times (t \times D)}{l} \quad (1)$$

where R is the electrical resistance (Ω)
 A is the cross section area of the electrical measurement (cm²)
 l is the length between metal contact (cm)
 t is the thickness of the PSG thin film with Si concentration (cm)
 D is the diameter of the electrode (cm)

The optical properties of the film were analyzed by UV VIS spectrophotometer (PerkinElmer Inc.,

series LAMDA 950) for observing the light transmittance (T) and reflectance (R) with the wavelength of 200-1,250 nm. We have calculated the absorption coefficient from Equation (2) to observe the light absorption and used the Tauc plot to estimate E_g of the PSG film with various Si concentration from Equation (3) (Pankove, 1976; Aziz *et al.*, 2016). Moreover, the extinction coefficient and refractive index were also calculated by using the Equations (4) and (5) (Pankove, 1976; Abdullah *et al.*, 2017), respectively.

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2 R^2} - (1-R)^2}{2TR} \right) \quad (2)$$

$$\alpha h\nu = C(h\nu - E_g)^N \quad (3)$$

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (4)$$

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (5)$$

where α is an absorption coefficient (cm⁻¹)
 t is the thickness of the film (cm)
 R is the reflectance of light
 T is the transmittance of light
 $h\nu$ is the photon energy
 C is a constant for an allowed indirect transition
 E_g is the bandgap energy
 N is equal to 2 for an allowed indirect transition
 k is an extinction coefficient
 n is the refractive index

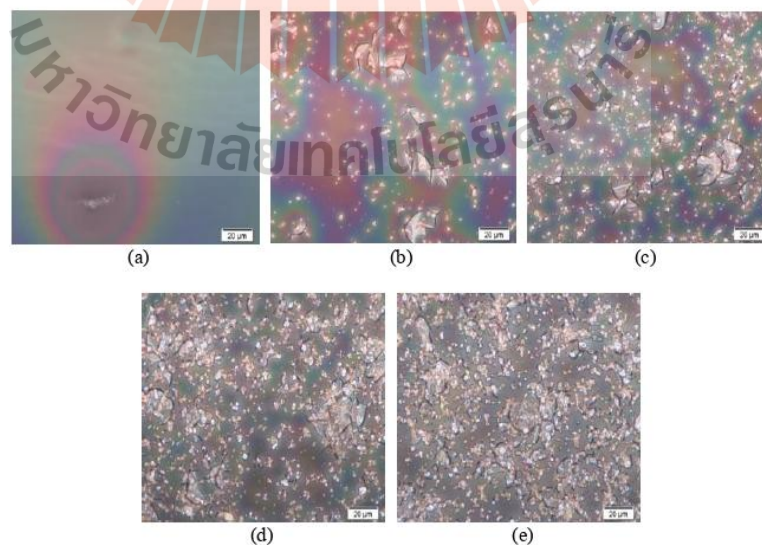


Figure 1. Shows illustration from the optical microscope with a magnification of 1000x of the a) PSG thin film and PSG thin film with Si in a concentration of Si powder : PSG of b) 0.015 : 1, c) 0.025 : 1, d) 0.05 : 1 and e) 0.075 : 1

Results and Discussion

Figure 1 shows the surface morphology of PSG thin films with varying Si concentration ratios of Si powder and PSG-sol from the fraction of 0:1 to 0.075:1. For PSG film, it reveals the smooth surface and some defects in the film, whereas the increase in the concentration of Si powder obviously revealed the dense existences of silicon particles in the film. An optical surface profiler was used for measuring the average thickness of the film and the films have the thickness in a range of 390 – 600 nm as shown in Table 1.

Figure 2 shows the result of current density (J) with an increase of voltage (V) for PSG thin film and PSG thin film with Si powder by using the 2-probe method. The linear relationship of the J-V curve in both dark and illumination tests were expressed the Ohmic behavior between a silver metal contact and PSG film as shown in Figures 2(a) and 2(b). The comparison of J-V curves under dark test and illumination test was described in Figures 2(c) and 2(d). They revealed the PSG thin film with a Si concentration of 0.025:1 that has the current density higher than bare PSG film, on the other hand, the current density of the other films is lower. The PSG thin films with Si in various concentration provided the current density in dark test in the range of 10^{-2} to 10^{-3} A/cm² at 10 V. However, the illumination test indicated the light-induced degradation from the

decrease of current density, it is due to the defect in the impurity of PSG and Si powder (Dhamrin *et al.* 2002; Lindroos and Savin, 2016; Meyer *et al.*, 2019). Table 1 shows the result of resistivity from computing with Equation (1) and expressed the increase of resistivity in illumination test.

Table 1. Shows the resistivity of the PSG film and PSG film with various Si concentration

Si:PSG	Thickness (nm)	Resistivity (Ωcm)	
		Dark test	Illumination test
PSG	606	4.05×10^2	3.15×10^3
0.015:1	515	9.91×10^3	3.60×10^4
0.025:1	548	1.18×10^2	1.49×10^3
0.05:1	390	3.51×10^2	1.24×10^3
0.075:1	478	4.12×10^2	3.17×10^3

Figures 3 and 4 show the reflectance and transmittance spectra in the wavelength range of 200-1,200 nm for PSG thin films composed of the different Si fraction ratios, respectively. It is found that the Si composite films present the minimum reflectance of 5-8% in the wavelength range of 450-550 nm. The wider range of minimum reflectance found in the Si composite film is very effective ARC requirement in the solar cell, while commercial ARC film provide the minimum %R at the one wavelength. It is indicated that the Si composite films can be an effective candidate for an ARC

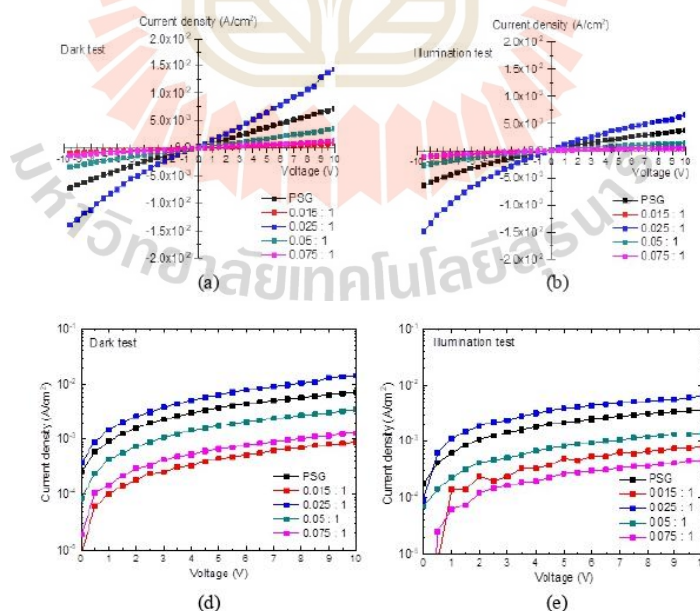


Figure 2. Relationship between current density and voltage of PSG thin film and PSG thin film with various concentration of Si powder in dark and illumination test for (a) (b) linear graph and (c) (d) semi-log graph, respectively

layer due to presence of the potential to trap the high photon energy (Tang *et al.*, 2014) and reduce the optical loss for the window layer of solar cells. Furthermore, all transmittance spectra of the film are higher than 60% which indicates that the remaining light can penetrate through to the other active layer of the underneath films. For considering the light absorption of the film, the Equation (2) was used and plotted as shown in Figure 5.

From Figure 5, the PSG thin film and Si composite film with condition of 0.015:1 revealed the high absorption coefficient in the range of 200-225 nm wavelength, which can imply that an absorbance edge is in only the high photon energy in UV region. Meanwhile, the increasing concentration of Si composite from 0.025:1, 0.05:1 and 0.075:1 present an extended absorbance edge to 720, 840, and 890 nm, respectively, which can indicate that these films can improve the light absorption ability from the UV through the IR wavelength. The absorbance edge implying to the optical band gap (E_g) of Si composite shift into the lower photo energy near at 1.1 eV (E_g of a Si bulk) when the Si concentration is denser.

Figure 6 shows the optical energy bandgap estimation from Tauc plot Equation (3). When the Si concentration is decreased in the PSG thin film, it presents the blue shifted spectra (higher photon energy) from 1.1 eV, which is original energy band gap of Si bulk into 1.4 eV, 1.5 eV, and 1.7 eV for the sample conditions of 0.075:1, 0.05:1 and 0.025:1, respectively. It is most probable due to the increase of localized states within the forbidden band gap of the film (Abdullah *et al.*, 2017). Meanwhile, PSG film as a doped-silica material indicates the wide bandgap replied from the absorption edge at 5.7 eV relating to E_g about 5-9 eV of silica materials. It is noticed that the absorption edge of the lowest Si dense (0.015:1 sample) is close to that of PSG film. A few increasing Si concentration of 0.025:1 indicates the 2-separating curve that behaves the 2 roles of silicon composite and silica materials.

In addition, other composite films consisting of silicon in various matrix can also occur the phenomenal blue shifting of the energy band gap, such as silicon nanocrystals embedded in SiC matrix, silicon quantum dot in silicon rich oxide (SRO), Si quantum dots in a hydrogenated SiN_x and silicon dot in ZnO as shown in Table 2. However, their thin films were fabricated with high temperature and high pressure to obtain the nano sized silicon.

The curves of extinction coefficient and refractive index in Figures 7 and 8 were computed by relationship in Equations (4) and (5), respectively. The evaluation of the optical losses in Figure 7 as the result of optical absorption and light scattering were described. From the optical loss

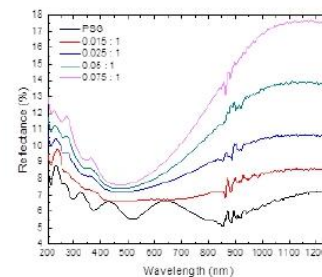


Figure 3. Reflectance of PSG thin film and Si composite film with various Si concentration

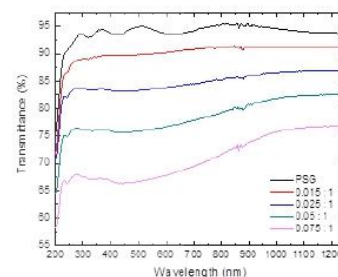


Figure 4. Transmittance of PSG thin film and Si composite film with various Si concentration

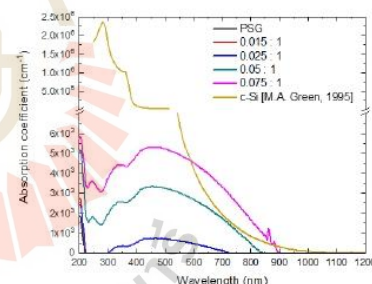


Figure 5. Absorption coefficient of PSG thin film and Si composite film with various Si concentration

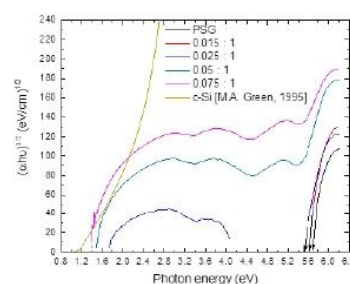


Figure 6. Optical bandgap estimation at the absorbance edge curve of films with various Si concentration

results, the PSG thin film and low Si concentration film of 0.015:1 indicated the amount of light losses in only UV wavelength region, while the higher Si concentration films provide the optical losses to dominant IR region. It is noticeable that the extinction coefficient increased along the higher Si concentration film to have relative agreement with a silicon bulk property. Figure 8 showed the refractive index curve of the PSG film which have the value that alter along the wavelength of the light incident. However, the refractive index value increases with the increase of concentration of Si in the film. Moreover, the PSG films with various Si powder ratio have values of refractive index lower than crystal silicon (c-Si) (Green and Keevers, 1995) which indicated that the film can apply to be a window layer of the solar cell application.

Conclusions

The Si composite film consisting of such Si powder dispersed into the phospho-silicate matrix was deposited on quartz substrate by spin coating technique to observe the electrical and optical properties. The decrease of current density of the Si composite film with various Si concentrations in illumination test expressed the appearing of light induced degradation. Therefore, the film thickness around 400-500 nm in this study is considered for solar cell application. The Si composite films have the minimum reflection around 6-8% at the wavelength range of 450-550 nm and 50% higher light transmission in visible region of the Si composite films have been observed. This is attributed to that the optical band gap values of the Si composite films shifts toward the higher photon energy from 1.1 eV (Si bulk) to 1.7 eV for decreasing Si concentration ratios from 1:0.075 to 1:0.025, which implying the increase of blue-light absorption. However, too low dense of Si concentration can obtain the very low light absorption and the optical property similar to PSG film. Therefore, the optimal Si composite ratios at the range 1:0.050 to 1:0.025 are considered in the functions of good dielectric, low reflectance, high absorbance properties. These property contributions of the Si composite film with PSG matrix can be a promising approach for efficiency improvement of third-generation solar cells.

Acknowledgement

This work has been supported by Suranaree University of Technology and Research Network

NANOTEC - SUT on Advanced Nanomaterials and Characterization

Table 2. Blue shifting of energy bandgap of silicon composite film

Matrix	Estimation of E_g of composite film (eV)	Reference
SiC	1.52-2.45	(Kole and Chaudhuri, 2014)
SRO	1.98-2.35	(Hao <i>et al.</i> , 2009)
SiN _x	2.2-4.3	(Goncharova <i>et al.</i> , 2015)
ZnO	1.7-3.8	(Castaldo <i>et al.</i> , 2014)
PSG	1.4-5.7	This work

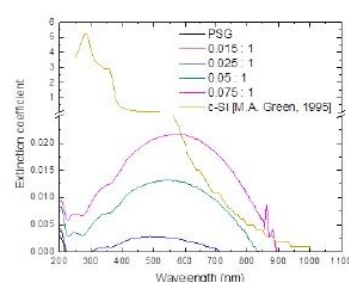


Figure 7. Extinction coefficient curve of PSG thin film with various Si concentration

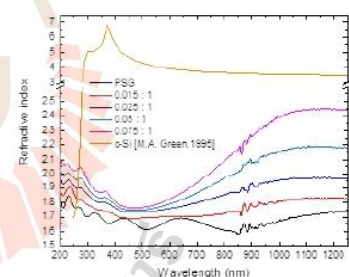


Figure 8. Refractive index curve of PSG thin film with various Si powder concentration

References

- Abdullah, O.G., Aziz S.B., and Rasheed M.A. (2017). Effect of silicon powder on the optical characterization of Poly(methyl methacrylate) polymer composites. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 28(5):4,513-4,520.
- Amador-Bedolla, C., Olivares-Amaya R., Johannes H., and Aspuru-Guzik A. (2013). Chapter 17 - Organic Photovoltaics. In: *Informatics for Materials Science and Engineering*. Krishna, R. (ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, p. 423-442.
- Aziz, B.S., Rebar, A., Hazhar, R., and Hameed, A. (2016). In situ synthesis of CuS nanoparticle with a distinguishable SPR peak in NIR region. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 27:4,163-4,171.

- Bagher, A.M. (2016). Solar Cell Quantum Dots. *American J. Renew. Sustain. Ener.*, 2:1-5.
- Battaglia, C., Andres C., and Stefaan D.W. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. *Energy Environ. Sci.*, 9:1,552-1,576.
- Brown, A.S. and Green, M.A. (2002). Detailed balance limit for the series constrained two terminal tandem solar cell. *Physica E Low Dimens. Syst. Nanostruct.*, 14(1):96-100.
- Castaldo, A., Alessandro, A., and Maria, L.A. (2014) Synthesis of silicon quantum dots in zinc silicate matrix by low-temperature process: Optical, structural and electrical characterization. *Thin Solid Films*, 562:172-180.
- Chee, K.W.A., Ziqiang, T., Hong, L., and Feng, H. (2018). Anti-reflective structures for photovoltaics: Numerical and experimental design. *Energy Rep.*, 4:266-273.
- Cho, E.C., Green, M.A., Gavin, C., Dengyuan, S., Cho, Y.H., Giuseppe, S., Shujuan, H., Sangwook, P., Hao, X.J., Yidan, H., and Lap, V.D. (2007). Silicon Quantum Dots in a Dielectric Matrix for All-Silicon Tandem Solar Cells. *Adv Optoelectron.*, p. 11.
- Conibeer, G., Green, M., Cho, E.C., Dirk, K., Cho, Y.H., Fangsuwannarak, T., Giuseppe, S., Edwin, P., Yidan, H., Tom, P., Shujuan, H., Dengyuan, S., Chris, F., Sangwook, P., Xiaojing, H., and Daniel, M. (2008). Silicon quantum dot nanostructures for tandem photovoltaic cells. *Thin Solid Films*, 516(20): 6,748-6,756.
- Dhamrin, M., Akihide, T., Hashigami, H., and Saitoh, T. (2002). Light-induced lifetime degradation of commercial multicrystalline silicon wafers. *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, May 19-24, 2002; Naka-cho, Koganei, Tokyo, Japan, p. 395-398.
- Dutta, S., Somenath, C., Kumar, M., Cho, Y.H., and Junsin, Y. (2019). Control of size and distribution of silicon quantum dots in silicon dielectrics for solar cell application: A review. *Renew. Energy*, 144:2-14.
- El amrani, A., Menous, I., Mahiou, L., Tadjine, R., Touati, A., and Lefgoum, A. (2008). Silicon nitride film for solar cells. *Renew. Energy*, 33(10):2,289-2,293.
- Fangsuwannarak, T., Laohawiroj, S., Rattanawichai, P., Mekmork, K., Limsiri, W., and Phatthanakun, R. (2021). Silicon dots films deposited by spin-coating as a generated carrier addition layer of third generation photovoltaics. *Prog. Nat. Sci. PROG NAT SCI-MATER.* "In press"
- Gan, J., Li, Q., Hu, Z., Yu, W., Gao, K., Sun, J., Xu, N., and Wu, J. (2011). Study on phase separation in a-SiOx for Si nanocrystal formation through the correlation of photoluminescence with structural and optical properties. *Appl. Surf. Sci.*, 257(14):6,145-6,151.
- Glunz, S.W., Preu, R., and Biro, D. (2012). 1.16 - Crystalline Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and Future Developments. In: *Comprehensive Renewable Energy*, Sayigh A. (ed.) Elsevier, Oxford p. 353-387.
- Goncharova, L.V., Nguyen, P.H., Karner, V.L., D'Ortenzio, Chaudhary, R.S., Mokry, C.R. and Simpson P.J. (2015). Si quantum dots in silicon nitride: Quantum confinement and defects. *J. Appl. Phys.*, 118: 224302.
- Green, M.A., and Keever, M.J. (1995). Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 3:189-192.
- Hao, X.J., Podhorodecki, A.P., Shen, Y.S., Zatyrb, G., Misiewicz, J. and Green, M.A. (2009). Effects of Si-rich oxide layer stoichiometry on the structural and optical properties of Si QD/SiO₂ multilayer films. *Nanotechnology*, 20(48):485703.
- Hashmi, G., Rashid, M.J., Mahmood, Z.H., Hoq, M., and Rahman, M.H. (2018). Investigation of the impact of different ARC layers using PC1D simulation: application to crystalline silicon solar cells. *J. Theor. Appl. Phys.*, 12(4):327-334.
- Higuera-Valenzuela, H.J., Romo-García, F., Cabrera-German, D., Ramos-Carrasco, A., Rosas-Burgos, R., García-Gutiérrez, R., Contreras, O.E., and Berman-Mendoza, D. (2018). Novel two-stage method for the synthesis of silicon quantum dots embedded on ZnO matrix. *Mater. Lett.*, 228:157-159.
- Kaewphoka, J., Fangsuwannarak, T. and Rattanachan, S.T. (2014). Synthesis of surfactant-assisted nanostructured Bi-doped Zinc oxide for photo-sensing application. In: *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*; May 14-17, 2014, p. 1-4.
- Karmouch, R., G. Savard, D. Barba, D. Koshel, F. Martin, and Ross, G.G. (2013). Investigation of electrical and optical measurements of silicon nanocrystals embedded in SiO₂ matrix. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 24(6):1,837-1,841.
- Kim, B.H., Cho, C.H., Kim, T.W., Park, N.M., Sung, G.Y., and Park, S.J. (2005). Photoluminescence of silicon quantum dots in silicon nitride grown by NH₃ and SiH₄. *Appl. Phys. Lett.*, 86(9):091908.
- Kim, T.G., Kwak, G.Y., Do, K., and Kim, K.J. (2019). High efficiency Si quantum dot heterojunction solar cells using a single SiO_x-B layer. *Nanotechnology*, 30(32):325404.
- Kole, A., and Chaudhuri, P. (2014). Growth of silicon quantum dots by oxidation of the silicon nanocrystals embedded within silicon carbide matrix. *AIP Adv.*, 4(10):107106.
- Laohawiroj, S., Mangkornkaew, A., Maneedaeng, A., and Fangsuwannarak, T. (2018). Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique. *J. Renew. Energy Smart Grid Technol.*, 13(2).
- Lataste, J.F. (2010). 12-Electrical resistivity for the evaluation of reinforced concrete structures. In: *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*. Maierhofer, C., Reinhardt, H.W., and Dobmann, G. (eds.). Woodhead Publishing, France, p. 243-275.
- Lee, S.H., Kwak, G.Y., Hong, S., Kim, C., Kim, S., Kim, A., and Kim, K.J. (2016). Ultraviolet responses of a heterojunction Si quantum dot solar cell. *Nanotechnology*, 28(3):035402.
- Li, M., Shen, H., Zhuang, L., Chen, D., and Liang, X. (2014). SiO₂ Antireflection Coatings Fabricated by Electron-Beam Evaporation for Black Monocrystalline Silicon Solar Cells. *Int. J. Photoenergy*, 2014:670438.
- Lindroos, J., and Savin, H. (2016). Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 147:115-126.
- Meyer, A.R., LaSalvia, V., Nemeth, W., Page, M., Young, D., Agarwal, S., and Stradins, P. (2019). Mitigating Process Induced Degradation in p- and n-Czochralski Silicon Wafers with Tabula Rasa. In: *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*; June 16-21, 2019, p. 0068-0071.
- Moon, S., Kim, K., Kim, Y., Heo, J., and Lee, J. (2016). Highly efficient single-junction GaAs thin-film solar cell on flexible substrate. *Sci. Rep.* 6(1):30107.
- Pankove, J.I. (1976). *Optical Processes in Semiconductors*. Dover publications, New York.
- Philippis, S.P., Dimroth, F., and Bett, A.W. (2018). Chapter I-4-B - High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells. In: *McEvoy's Handbook of Photovoltaics (3rd Ed.)*. Kalogirou S.A. (ed.). Academic Press, p. 439-472.
- Qarony, W., Hossain, M.I., Hossain, M.K., Uddin, M.J., Haque, A., Saad, A.R., and Tsang, Y.H. (2017). Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis. *Results Phys.*, 7:4,287-4,293.
- Sahoo, S., Manoharan, B., and Sivakumar, N. (2018). Chapter 1 - Introduction: Why Perovskite and Perovskite Solar Cells?. In: *Perovskite Photovoltaics*. Thomas, S. and Thankappan, A. (eds.). Academic Press, p. 1-24.

- Shockley, W. and Hans, J.Q. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, *J. Appl. Phys.*, 32(3):510-519.
- Singh, Y. (2013). Electrical resistivity measurements: a review. *Int. J. Mod. Phys.: Conf. Ser.*, 22:745-756.
- Tang, Z., Tress, W., and Inganäs, O. (2014). Light trapping in thin film organic solar cells. *Mater. Today.*, 17(8):389-396.
- Yu, X., Yu, W., Wang, X., Zheng, Y., Zhang, J., Jiang, Z., and Fu, G. (2015). Effects of phosphorus doping on the optical and electronic properties of Si-quantum-dots/SiO₂ multilayer films. *Superlatt. Microstruct.*, 78:88-96.





ซิลิคอนดอทในเมทริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมสำหรับประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์

Silicon Dots in Matrix of Aluminum-Doped Zinc Oxide as an Absorber Layer for Photovoltaic cell

¹ ทัพวรรณ พงสุวรรณรักษ์ ^{1*} คุณัฐ เลาหิโรจน์ ธีรฤดี รัตนวิชัย ¹ วรากร ลิ้มศิริ ¹ กาญญ พงสุวรรณรักษ์ ² และ รุ่งเรือง พัฒนากุล ³

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000 thipwan@g.sut.ac.th

² สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

³ BL6a: Deep X-ray Lithography สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จ.นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) ที่มีผงซิลิคอน (Silicon: Si) จากแผ่น Si เสริมสภาพอยู่ภายในเมทริกซ์ซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม (Aluminum doped zinc oxide: AZO) สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการที่ใช้ต้นทุนต่ำ ด้วยการใช้นิพจน์การหมุนเหวี่ยงสารละลาย มีการจุ่มและการอบแห้งและการเผา เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง ทางไฟฟ้าและทางแสง ซึ่งฟิล์มบางที่ได้จากการเผาปกติที่อุณหภูมิ 550°C และการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 930°C เกิดเป็นฟิล์มบางที่มีการก่อรูปของเกรนผลึก ZnO มีความสามารถในการผลิตพาหะและเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้หากได้รับแสง Si ที่กระจายตัวในเมทริกซ์ AZO ในฟิล์มบางสามารถขยายขอบเขตการดูดกลืนแสงจากแสงอัลตราไวโอเล็ต มาสู่บริเวณช่วงความยาวคลื่นแสงที่ดวงตามองเห็น ฟิล์มบางมีการสะท้อนแสงกลับน้อยกว่า 20% และมีค่าการทะลุผ่านที่สูงมากกว่า 80% อีกทั้งยังมีค่าดัชนีหักเหแสงที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ ผงซิลิคอน

Abstract

Si powder from waste Si wafers in matrix AZO can be fabricated into thin films with a low-cost spin technique. Drying, annealing, and rapid thermal annealing are utilized to classify the condition in order to investigate and study qualities, including their structural, electrical, and optical characteristics. The grain crystalline of zinc oxide was discovered in the thin films that were annealed at 550°C and were annealed pass through the rapid thermal annealing process at 930°C. They have the capability to generate carriers and improve the current density when exposed to light. The absorption coefficient result indicated that the absorption edge of the thin films can be stretched from ultraviolet to visible light by dispersed Si powder in zinc oxide thin films. Finally, the thin films that have appropriate refractive index values, a low reflectance of 20%, and high transmittance of 80% can apply to be the window layer for solar cells and optoelectronic devices.

Keywords: Thin Film, Zinc Oxide, Silicon Powder

1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์คือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้จากการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si ที่ถูกผลิตขึ้นมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 25 ปี เมื่อครบกำหนดเวลา แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพลดลงประมาณ 2 – 5% อย่างไรก็ตามแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานไม่ได้จะถูกแยกส่วนเพื่อนำมารีไซเคิล [1, 2] สำหรับประเทศไทยมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นดิน บนหลังคาและบนทุ่นลอยน้ำ มีกำลังการผลิตสะสมที่มากกว่า 3,000 MW [3] เมื่อพิจารณาเพียงจำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์เสื่อมสภาพ ไม่รวมส่วนประกอบอื่นเช่น โครงเหล็ก กระจก และอื่นๆ ในอนาคตจะมีมากกว่า 6,500 ตัน ซึ่งประเทศไทยยังไม่มีเทคโนโลยีการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้การกำจัดเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องส่งไปรีไซเคิลที่ต่างประเทศหรือการกำจัดทิ้งด้วยการฝังกลบกระบวนการเหล่านี้มีการใช้ดินที่ปนเปื้อนและเกิดเป็นมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ

ปัจจุบันการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มีวัตถุดิบหลักคือ Si เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานช่องว่างคือ 1.1 eV มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 30% ตามทฤษฎี Detailed balance limit [4] จากแนวคิดเรื่อง Tandem cells คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการนำชั้นฟิล์มบางดูดกลืนแสง มีการเรียงลำดับค่าพลังงานช่องว่างซ้อนทับกันเพื่อให้แต่ละชั้นดูดกลืนแสงเฉพาะค่าความยาวคลื่นแสง [5] เมื่อนำมาประยุกต์เข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถปรับปรุงคุณภาพการดูดกลืนแสงโดยไม่เกิดการสูญเสียเชิงความร้อน และเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้

ในงานวิจัยนี้ได้นำแผ่น Si ที่แตกเสียหายจากการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์นำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยการบดให้เป็นผง Si แล้วนำมาผสมกับสารละลาย AZO ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าเมื่อได้รับแสง และการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตที่ดี [6] มาสร้างเป็นฟิล์มบางคอมโพสิทระหว่าง Si และ AZO เรียกว่าฟิล์มบางซิลิคอนดอท (Si dots) บนแผ่นคาวดซ์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง ทางไฟฟ้าและทางแสงที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการอบแห้งและการเผาที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะได้นำมาปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46

The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ คิวน่า พลาซ่า กระบี่ อำเภอนาง จังหวัดกระบี่



2. การทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้

ฟิล์มบางรับแสงประกอบด้วย Si ผลิตจากแผ่น Si เสื่อมสภาพเข้าสู่กระบวนการบัดด้วยเครื่องบัด Planetary รุ่น QM2L มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 4 ไมครอน [7 - 8] สารละลาย AZO ประกอบด้วย Zinc acetate dehydrate (ZnAc , $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.5%) Mono ethanolamine (MEA, $\text{NH}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$, 99%) Aluminum chloride hexahydrate (AlCl_3 , $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Ethanol (EtOH , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) และ Isopropanol (IPA, $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$).

2.2 การเตรียมสารละลายและการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

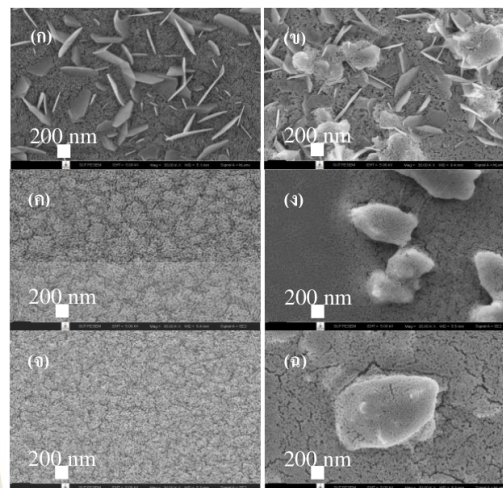
เตรียมสารละลาย AZO เริ่มจากละลาย ZnAc ด้วย IPA+MEA โดยให้ $\text{MEA}:\text{Zn}$ เป็น 0.75:1 กวนสารละลายที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที ต่อมายกขึ้นเพื่อ AlCl_3 +IPA ความเข้มข้น 0.2 M ลงในสารละลายเริ่มต้นเพื่อให้มีจำนวนอะตอมของ Al ในสารละลายทั้งหมดเท่ากับ 1% กวนสารละลายต่ออีก 30 นาที จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เติมน้ำ Si ลงในสารละลาย AZO ในอัตราส่วน 1g : 66.67ml เขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นสร้างฟิล์มบางบนแผ่นควอตซ์โดยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง ด้วยความเร็ว 100 rpm 15 วินาที จากนั้นเพิ่มความเร็วเป็น 2500 rpm 30 วินาที ฟิล์มบางให้แห้งที่อุณหภูมิ 200°C 30 นาที (Drying: Dry) ทำการจุ่มแผ่นฟิล์มบางในการเผาฟิล์มบางเพื่อให้ ZnO เกิดผลึกด้วยการเผาด้วยอุณหภูมิ 550°C 1 ชั่วโมง (Thermal annealing: TA) และการเผาอย่างรวดเร็วด้วยอุณหภูมิ 930°C 20 วินาที (Rapid thermal annealing: RTA)

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบาง Si dots ประกอบด้วย การวิเคราะห์เชิงพื้นผิว ทางโครงสร้างผลึก ทางไฟฟ้าและทางแสง ด้วยกล้อง Field emission scanning electron microscopy (FESEM) บริษัท Auriga Carl Zeiss เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 บริษัท Bruker เครื่อง UV VIS NIR spectrophotometer รุ่น LAMBDA 950 บริษัท PerkinElmer และ เครื่อง Electrometer รุ่น 2400 บริษัท Keithley ตามลำดับ

3. ผลที่ได้จากการทดลอง

3.1 จุลโครงสร้างของฟิล์มบาง

รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวฟิล์มบาง AZO และ Si dots ในเงื่อนไขการอบด้วยวิธีต่างๆ กำลังขยาย 30,000 เท่า จากรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) การอบฟิล์มบาง AZO และ Si dots แบบ Dry นั้น ZnO มีลักษณะเกิดเป็นกลีบดอกไม้ทั่วบริเวณพื้นผิว เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง AZO และ Si dots เงื่อนไข TA และ RTA แสดงในรูปที่ 1(ค) 1(ง) 1(จ) และ 1(ด) ฟิล์มบางมีลักษณะพื้นผิวเรียบมากขึ้น ไม่ปรากฏ ZnO ในรูปกลีบดอกไม้ ฟิล์มบาง Si dots แสดงถึงการปกคลุมของ Si ด้วยอนุภาค ZnO อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ฟิล์มบางสามารถวัดค่าความหนาได้จากเครื่อง Optical profiler บริษัท Bruker มีความหนาแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ภาพถ่าย FESEM ของฟิล์มบาง AZO และ Si dots ในเงื่อนไข Dry (ก), (ค), (จ) TA และ (ข), (ด), (ฉ) RTA ตามลำดับ

3.2 คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง

รูปที่ 2 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง AZO และ Si dots เงื่อนไขต่างๆ พบว่าฟิล์มบาง AZO ที่ผ่านการเผาแบบ RTA และ TA เกิดออกสัณฐานผลึกนาโนของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 31.76° , 34.44° และ 36.28° ตามลำดับ มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal wurtzite ตามมาตรฐานของ Joint Committee of Powder Diffraction Standards (JCPDS) card 36-1451 [9 - 10] กรณีฟิล์มบาง Si dots ปรากฏออกสัณฐานผลึกนาโนของ Si ที่ระนาบ (111) (220) และ (311) ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 28.44° , 47.3° และ 56.12° ตามลำดับ ตรงกับมาตรฐาน JCPDS 00-027-1402 แสดงโครงสร้างผลึกในรูปแบบ Simple cubic ของ Si [8] ระนาบเด่นของ ZnO (002) และ Si (111) สามารถคำนวณขนาดเกรนผลึก (Crystal grain size) จาก Scherrer's equation ในสมการที่ (1) ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 1 พบว่าฟิล์มบาง AZO แบบ RTA มีเกรนผลึกใหญ่กว่าแบบ TA บ่งชี้คุณสมบัติของ ZnO ที่ขนาดผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเผาด้วยอุณหภูมิสูง [11] อย่างไรก็ตามฟิล์มบาง Si dots แบบ RTA และ TA มีขนาดเกรนผลึกของ ZnO ใกล้เคียงกัน มีข้อสังเกตว่าฟิล์มบาง Si dots แบบ RTA มีความเป็นไปได้จากการถูกขัดขวางการก่อรูปผลึก ZnO เนื่องจากผล Si ที่กระจายตัวทั่วทั้งแผ่นฐานประกอบกับการเผาอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ฟิล์มบาง AZO และ Si dots แบบ Dry ไม่เกิดเกรนผลึก ZnO และสำหรับขนาดเกรนผลึกของ Si จากการคำนวณมีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 97.3 nm

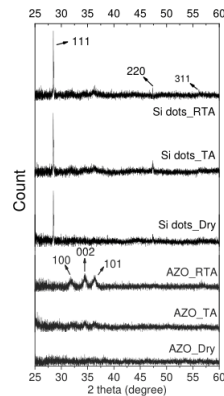
$$d = \frac{0.9\lambda}{B \cos(\theta_B)} \quad (1)$$

โดยที่ d คือขนาดของเกรนผลึก [nm] λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($1.5418\text{\AA}$) B คือ Full width at half maximum ของยอด XRD [เรเดียน] และ θ_B คือตำแหน่งมุมของจุดยอด [$^\circ$]

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46

The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ คิวน่า พลาซ่า กระบี่ อ่าวนาง จังหวัดกระบี่



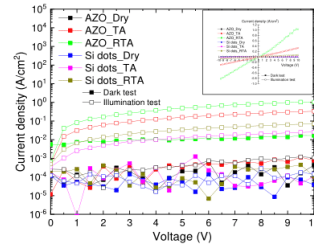
รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของฟิล์มบาง AZO และ Si dots

ตารางที่ 1 ขนาดเกรนผลึกของฟิล์มบาง AZO และ Si dots

เงื่อนไข	ความหนาของฟิล์มบาง (nm)	ขนาดของเกรนผลึก (nm)	
		Si (111)	ZnO (002)
AZO_Dry	106.5 ± 11.7	-	-
AZO_TA	68.4 ± 15.8	-	11.1
AZO_RT	60.6 ± 1.0	-	19.4
Si dots_Dry	131.0 ± 16.7	95.4	-
Si dots_TA	124.4 ± 9.7	90.1	11.8
Si dots_RT	130 ± 20.0	106.5	10.4

3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density: J) และแรงดันไฟฟ้า การทดสอบภายใต้สภาวะสว่างและสภาวะมืดของฟิล์มบาง AZO และ Si dots พบว่าฟิล์มบาง AZO และ Si dots แบบ Dry มีค่า J ที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 10^{-3} A/cm² เนื่องจาก ZnO ไม่เกิดความเป็นผลึกอ้างอิงจากผลของ XRD อีกทั้งพื้นผิวมีความไม่สม่ำเสมอเกิดเป็นจุดผิดเพี้ยน (Defect) ทำให้ไม่เกิดการนำกระแสไฟฟ้า สำหรับฟิล์มบาง AZO และ Si dots แบบ TA และ RTA ในสภาวะสว่างพบว่า J มีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะมืดถึง $10^1 - 10^2$ เท่า เพราะฟิล์มบางที่มีการเผาจะเกิดผลึก ZnO ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างพาหะอิเล็กตรอนให้มีการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งขนาดผลึกของ ZnO ที่มีขนาดใหญ่ในชั้นงาน AZO_RT จะสามารถให้ค่า J ที่สูงกว่าขนาดผลึกขนาดเล็กในชั้นงาน AZO_TA ด้วย อย่างไรก็ตามฟิล์มบาง Si dots ทั้งแบบ TA และ RTA ในสภาวะสว่าง ให้ค่า J ที่น้อยกว่าฟิล์มบาง AZO เนื่องจากบริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ZnO และผลึก Si เกิดการดักจับและเกิดการรวมตัวกลับระหว่างพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ส่งผลให้ค่า J ลดลง และสำหรับภาพขนาดเล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง J และแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบเชิงเส้น พบว่าพฤติกรรมระหว่างฟิล์มบางและขั้วโลหะมีลักษณะเรียกว่า Ohmic contact บ่งชี้คุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อประยุกต์เป็นชั้นรับแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งฟิล์มบางนี้หากนำมาสร้างบนเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้มากถึง 1 – 2 % [8]



รูปที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า JV-curve ของฟิล์มบาง AZO และ Si dots ในเงื่อนไขต่างๆ

3.4 คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

รูปที่ 4 (ก) และ 4(ข) แสดงสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงและการสะท้อนแสงกลับช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 1500 nm ของฟิล์มบาง AZO และ Si dots ตามลำดับ พบว่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง AZO ในช่วงแสงที่ตามองเห็น (380 – 780 nm) และแสงอินฟราเรด (>780 nm) มีค่ามากกว่า 90% แต่ฟิล์มบางชนิด Si dots จะมีการทะลุผ่านของแสงลดลงมา เนื่องจากมีการบดบังแสงของผลึก Si กรณีแสงอัลตราไวโอเลต (<380 nm) ของฟิล์มบางในทุกเงื่อนไขมีการทะลุผ่านที่มากกว่า 50% โดยเฉลี่ย สำหรับการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบางพบว่าทุกๆ เงื่อนไขมีการสะท้อนแสงที่น้อยกว่า 20% ในทุกช่วงความยาวคลื่น ทั้งนี้ฟิล์มบาง Si dots จะมีการสะท้อนแสงกลับสูงกว่าชนิด AZO

การหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient: α) สามารถพิจารณาจากการนำค่าการทะลุผ่านของแสงและค่าการสะท้อนแสงกลับมาคำนวณในสมการที่ (2) [12] ผลลัพธ์ได้นำมาพล็อตในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าความยาวคลื่นและพลังงานแสงในรูปที่ 4(ค) พบว่าฟิล์มบาง AZO มีขอบการดูดกลืนแสงช่วง 3.3 – 3.5 eV บ่งชี้ว่ามีการดูดกลืนแสงมากที่สุดในช่วงแสงอัลตราไวโอเลต ขณะที่ฟิล์มบาง Si dots เกิดการขยายขอบการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 1.7 – 1.9 eV เป็นบริเวณช่วงแสงที่ตามองเห็น มีค่าความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Irradiance) ในปริมาณมาก ดังนั้นหากเพิ่มชั้นฟิล์มบาง Si dots ลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้มากขึ้น

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2 R^2} - (1-R)^2}{2RT} \right) \quad (2)$$

โดยที่ t คือความหนาของฟิล์มบาง [cm] T คือค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง และ R คือค่าการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบาง

ดัชนีหักเหแสง (Refractive index: n) ของฟิล์มบางจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) สามารถอธิบายในรูปของกราฟแสดงในรูปที่ 4(ง) เมื่อพิจารณาทุกๆ ค่าความยาวคลื่น พบว่าค่าดัชนีหักเหของแสงมีค่าไม่เกิน 2.2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแผ่นฐานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si ที่มีค่าเท่ากับ 3.9 เมื่ออ้างอิงตามกฎของ Snell's law เมื่อชั้นฟิล์มบาง AZO หรือ Si dots อยู่ด้านบนแผ่น Si จะทำให้แสงหักเหเข้าแผ่นฐานมากขึ้น ดังนั้นฟิล์มบางทั้ง AZO และ Si dots จึงมีความเหมาะสมที่สามารถเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si ได้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46

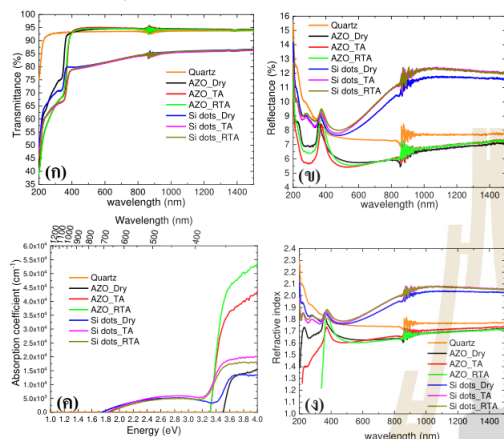
The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ คิวน่า พลาซ่า กระบี่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่



$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3)$$

โดยที่ R คือค่าการสะท้อนแสงกลับของฟิล์มบาง และ k คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสงมีค่าเท่ากับ $k = \alpha / 4\pi$



รูปที่ 4 สเปกตรัม (ก) การทะลุผ่านของแสง (ข) การสะท้อนกลับของแสง (ค)

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ (ง) ดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง AZO และ Si dots

4. สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสร้างฟิล์มบาง AZO และ Si dots บนแผ่นควอตซ์จากผง Si ที่มาจากแผ่น Si เสื่อมสภาพผสมกับสารละลาย AZO ด้วยกระบวนการผลิตต้นทุนต่ำจำแนกเงื่อนไขการศึกษาด้วยวิธีการอบและการเผารูปแบบต่างๆ ฟิล์มบาง AZO และ Si dots แบบ Dry ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่น้อยกว่าแบบ TA และ RTA เนื่องจากไม่เกิดเกรนผลึก ZnO ที่เป็นปัจจัยหลักในการผลิตพาหะจากภาพ FESEM พบว่าแบบ Dry มีพื้นผิวไม่เรียบเกิดลักษณะกีดขวางไม่เหมาะสมกับแสงซึ่งให้ถึงการขยายขอบการดูดกลืนแสงของผง Si ที่ผสมลงในฟิล์มบาง Si dots ในทุกๆ เงื่อนไขมาที่บริเวณแสงที่ตามองเห็น ซึ่งได้มากกว่าฟิล์มบาง AZO ที่ดูดกลืนแสงเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต และค่าดัชนีหักเหของแสงยังระบุว่าฟิล์มบางทั้ง AZO และ Si dots เหมาะสมสำหรับเป็นชั้นรับแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จากการด้อยอดเมื่อสร้างฟิล์มบาง Si dots บนเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx สามารถให้ราคาต้นทุนต่อวัตต์ที่เทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง p/n/SiNx มีราคาต้นทุนลดลง 0.56 บาทต่อวัตต์ หรือลดลงประมาณ 9.6% [13]

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการเข้าร่วม EECON-46

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Liu, Q. Zhang, and H. Wang, "Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China," *Waste Manage.*, vol. 118, pp. 491-500, 2020.

- [2] M.S. Chowdhury, K.S. Rahman, T. Chowdhury, and et al., "An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling," *Energy Strategy Rev.* vol. 27, pp 100431, 2020.
- [3] P. Kerdlap, and K. Boonrat, "Sustainable Management of Solar Panel Wastes and Electronic Products Wastes," *EAU Herit. J. Sci. Tech.*, vol. 15(2), pp. 49-63, 2021.
- [4] W. Shockley, and H.J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 32(3), pp. 510-519, 1961.
- [5] M.A. Green, "Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond," *Phys. E: Low-Dimens.*, vol. 14(1), pp. 65-70, 2002.
- [6] P. Koralli, S.F. Varol, G. Mousdis, and et al., "Comparative Studies of Undoped/Al-Doped/In-Doped ZnO Transparent Conducting Oxide Thin Films in Optoelectronic Applications," *Chemosensors*, vol. 10(5), 2022.
- [7] S. Laohawiroj, A. Mangkornkaew, A. Maneeadaeng, and et al., "Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique," *J. Renew. Energy Smart Grid Technol.*, vol. 13(2), pp. 32-40, 2018.
- [8] T. Fangsuwannarak, S. Laohawiroj, P. Rattanawichai, and et al., "Silicon dots films deposited by spin-coating as a generated carrier addition layer of third generation photovoltaics," *Prog. Nat. Sci.: Mater.*, vol. 31(2), pp. 192-200, 2021.
- [9] T. Fangsuwannarak, P. Krongarom, J. kaewphoka and et al., "Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells," *Int. Conf. Electr. Eng. Inform. Commun. Technol.*, 2013.
- [10] D. Raoufi, "Synthesis and microstructural properties of ZnO nanoparticles prepared by precipitation method," *Renew. Energy*, vol. 50(Supplement C), pp. 932-937, 2013.
- [11] B. Bekele, L. Jule, and A. Gungure, "The effects of annealing temperature on size, shape, structure and optical properties of synthesized zinc oxide nanoparticles by sol-gel methods," *Dig. J. Nanomater. Biostructures*, vol. 16, pp. 471-478, 2021.
- [12] J.I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*. New York: Dover publications, 1976.
- [13] S. Laohawiroj, "The study in silicon dots films fabrication from recycling of waste silicon wafer for applying emitter layer of silicon solar cells," M.Eng., thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, TH, 2019.

ประวัติผู้เขียน

นายสุภณัฐ เลาหิโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2536 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนครพนมวิทยาคม จังหวัดนครพนม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2559 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง) เมื่อปี พ.ศ. 2562

หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีแล้ว ได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโทที่ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2559 โดยได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับค่าเล่าเรียน ในระหว่างการศึกษได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ปฏิบัติการระบบควบคุม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน และ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาในส่วนของวัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประยุกต์กับ เซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบชนิดซิลิคอนโครงสร้างนาโนซิลิคอนที่ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานถึง 12.72% และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 6 บทความ

ภายหลังได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาเอกที่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2562 โดยได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับค่าเล่าเรียน เช่นเดียวกับระดับปริญญาโท ในระหว่างการศึกษ ได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ ปฏิบัติการ เครื่องจักรกลไฟฟ้า ปฏิบัติการระบบควบคุม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน และปฏิบัติการ วิศวกรรมไฟฟ้า ในงานวิจัยได้ศึกษาต่อยอดสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบชนิดซิลิคอนโครงสร้างนาโน ซิลิคอน โดยพัฒนาฟิล์มบางซิลิคอนดอทโครงสร้างซ้อนทับและสลับชั้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ รูปแบบใหม่ให้เกิดการแตกแขนงองค์ความรู้และความเป็นไปได้รูปแบบใหม่ ซึ่งมีผลงานทางวิชาการที่ ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 10 บทความ