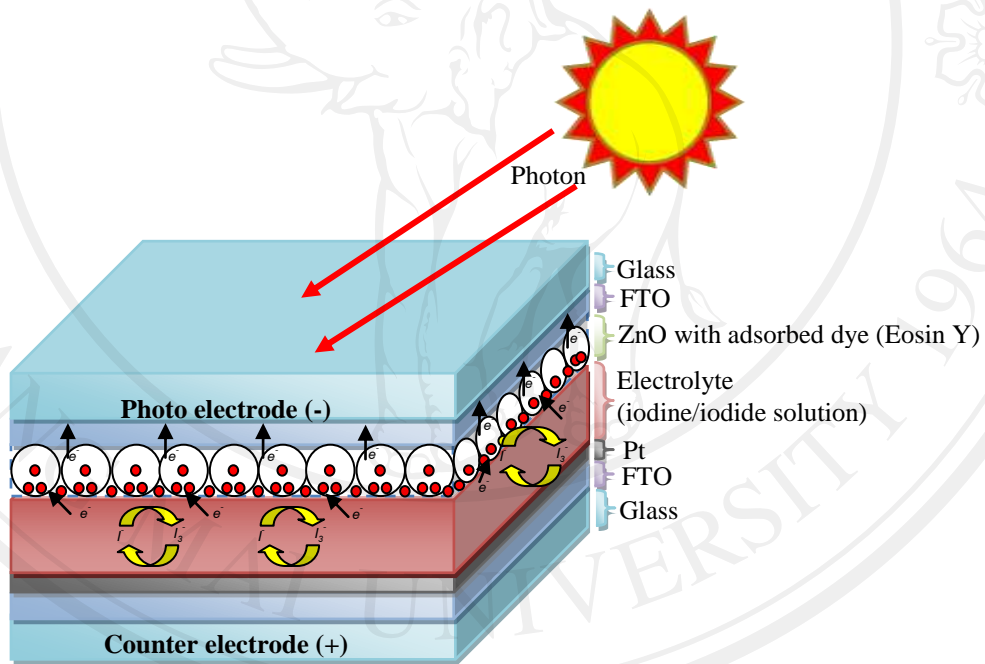


## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye Sensitized Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye Sensitized Solar Cells) นี้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยมีโครงสร้างของเซลล์ ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC)

แต่ละส่วนประกอบมีลักษณะสำคัญ ดังนี้

- 1) กระจกใสนำไฟฟ้า (Transparent conducting oxide glass: TCO glass): ทำจากกระจกใส ที่เคลือบด้วย Indium Tin Oxide (ITO) หรือ Fluorin Tin Oxide (FTO) 1 ด้าน
- 2) ชั้นอนุภาคสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor layer): เป็นสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal-oxide semiconductor) ที่มีช่องว่างแถบพลังงานสูง (wide band-gap) และ

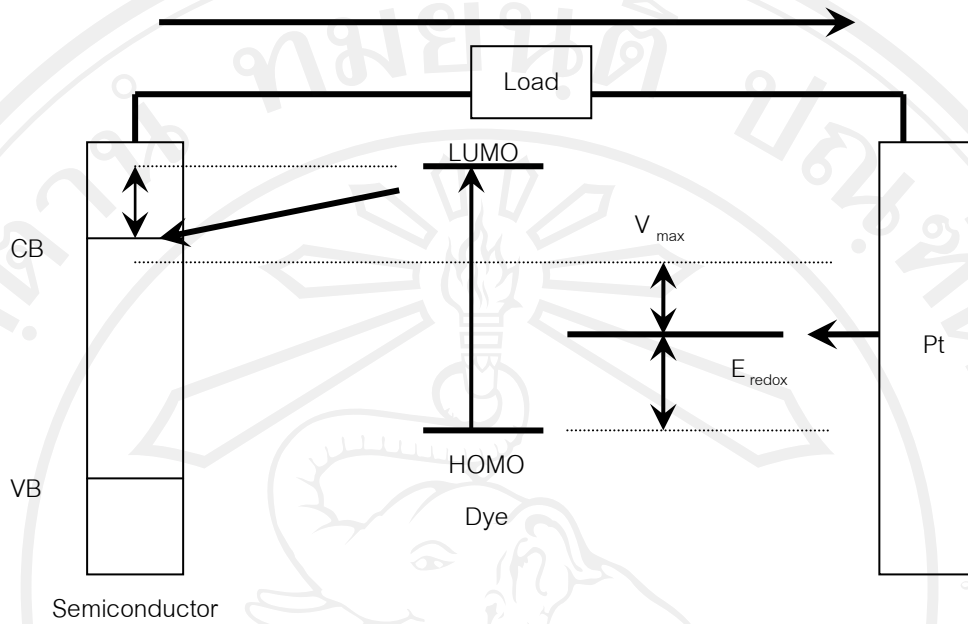
สามารถสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลสีย้อมได้ โดยชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีการศึกษากันมาก คือ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$

- 3) โมเลกุลสีย้อม (Dye): เป็นโครงสร้างสำคัญที่ดูดซับพลังงานแสงและปลดปล่อยอิเล็กตรอนสถานะกระตุ้น โดยจะยึดเกาะกับอนุภาคสารกึ่งตัวนำด้วยพันธะ  $-\text{OH}$  หรือ  $=\text{O}$  ตัวอย่างของสีย้อมที่นิยมใช้ เช่น Ruthenium, Eosin-Y, หรือ pigments ในพืช เช่น chlorophyll, anthocyanin
- 4) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte): ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่ทำงานในวงจรภายนอก กลับคืนสู่โมเลกุลสีย้อม
- 5) เพลตทินัม (Platinum): เป็นโลหะที่เคลือบบนกระจก TCO ที่เป็นขั้วบวก (counterelectrode) มีหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นและยังช่วยลดศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไป (Over Voltage) ในปฏิกิริยาของ Triiodide กับ Iodide ( $\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightarrow \text{I}^-$ )

หลักการในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีขั้นตอน ดังนี้

- 1) โมเลกุลสีย้อม ดูดซับพลังงานแสงเพื่อให้กระตุ้นอิเล็กตรอน ให้มีพลังงานสูงขึ้น
- 2) อิเล็กตรอนสถานะกระตุ้นมีระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (conduction band) จะย้ายไปอยู่บนแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
- 3) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำออกสู่วงจรภายนอก ผ่าน photoelectrode
- 4) อิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานจากวงจรภายนอก กลับคืนสู่เซลล์ผ่านทาง counterelectrode (ขั้วที่เป็นกระจกนำไฟฟ้าเคลือบด้วย Pt อยู่ด้านล่างของเซลล์)
- 5) อิเล็กตรอนกลับคืนสู่โมเลกุลสีย้อม ผ่านปฏิกิริยา redox ของ electrolyte

และแผนภาพแสดงหลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดังรูปที่ 2.2



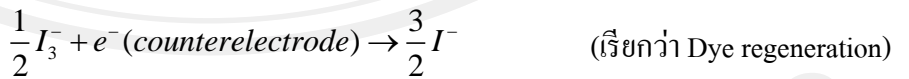
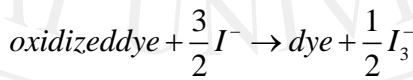
ประสิทธิภาพของเซลล์ขึ้นกับ

$$-\eta(e^- \text{ injection}) : E_{\text{LUMO}} - E_{\text{CB}}$$

$$-\eta(\text{dye regeneration}) : E_{\text{redox}} - E_{\text{HOMO}}$$

รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [13]

สามารถแสดงปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนในแต่ละขั้นตอน ดังนี้

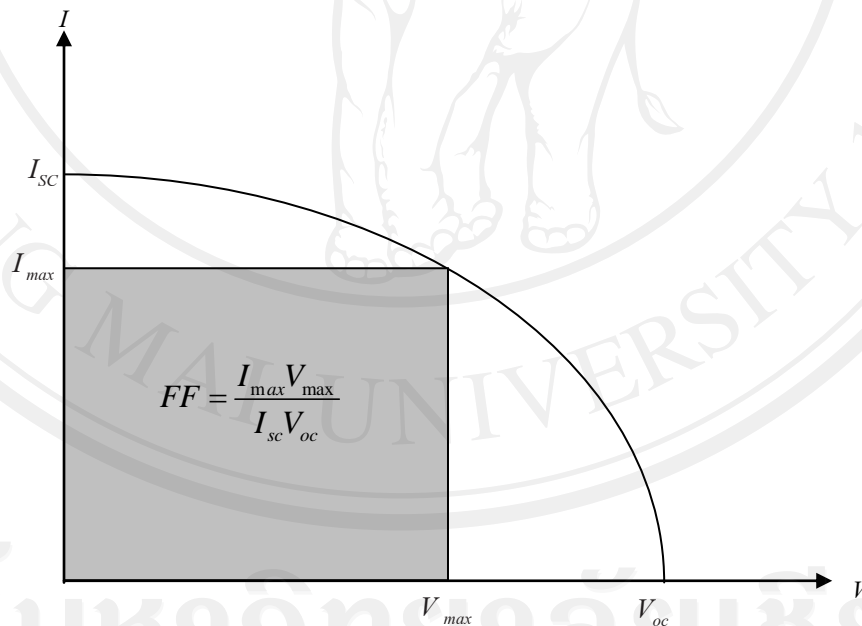


### 2.1.1 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) [14]

เมื่ออิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานจากวงจรรภายนอก กลับคืนสู่เซลล์ผ่านทาง counterelectrode ถูกเชื่อมกับวงจรรภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลรวมของกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของสองขั้วไฟฟ้า ดังสมการ (2.1)

$$I = I_p + I_D \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $I_p$  คือ photogenerated current และ  $I_D$  คือ dark current กระแสรวมสูงสุดมีค่าเป็น  $I_{SC}$  เป็นค่าที่ได้รับมาจากเงื่อนไขของ short-circuit  $\Delta E = V = 0$  ซึ่งเห็นได้จากกราฟ  $I-V$  (current-voltage curve) ภายใต้แสงตามรูปที่ 2.3 ค่า open circuit voltages ( $V_{oc}$ ) เป็นปฏิกิริยากับพลังงานที่แตกต่างระหว่าง ระดับ Fermi ของสารกึ่งตัวนำและระดับพลังงานของ electrolyte redox couple ค่ากำลังสูงสุดที่สามารถคำนวณได้คือ  $P_{max} = I_{max} \times V_{max}$  ซึ่งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.3 จากจุดที่มีกำลังสูงสุด ค่า Fill factor ( $FF$ ) สามารถคำนวณได้ ซึ่งเป็นข้อมูลจากการวัดของคุณภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสของกราฟ  $I-V$  (current-voltage curve)



รูปที่ 2.3 กราฟ  $I-V$  (current-voltage curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง [14]

ประสิทธิภาพ ( $E_{ff}$ ) ของการแปรผันพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2)

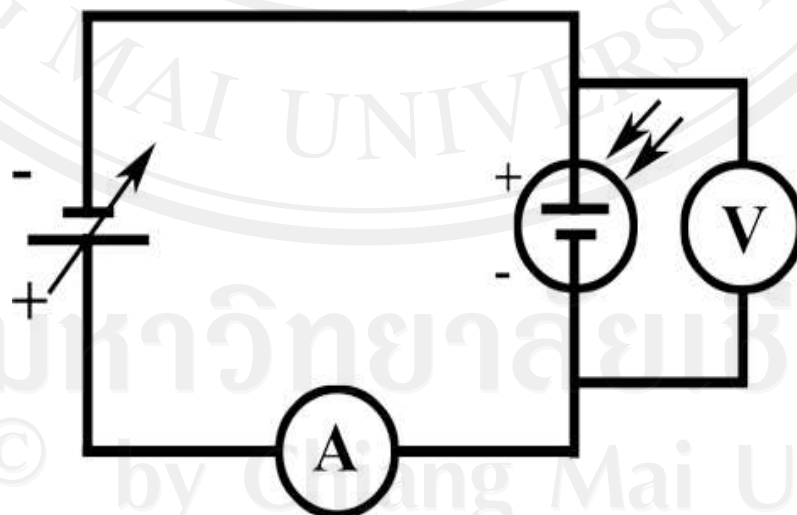
$$E_{ff} = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (2.2)$$

โดย  $P_{in}$  คือ ผลรวมของกำลังที่แผ่รังสีตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์  
 $I_{sc}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร  
 $V_{oc}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด  
 $I_{max}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังสูงสุด  
 $V_{max}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อทดสอบเซลล์ภายใต้เงื่อนไข Air Mass 1.5 (AM1.5)

- แสงตั้งฉากกับระนาบ
- ความเข้มแสง =  $100 \text{ mW/cm}^2$  หรือ  $1000 \text{ W/m}^2$
- อุณหภูมิ =  $25^\circ\text{C}$

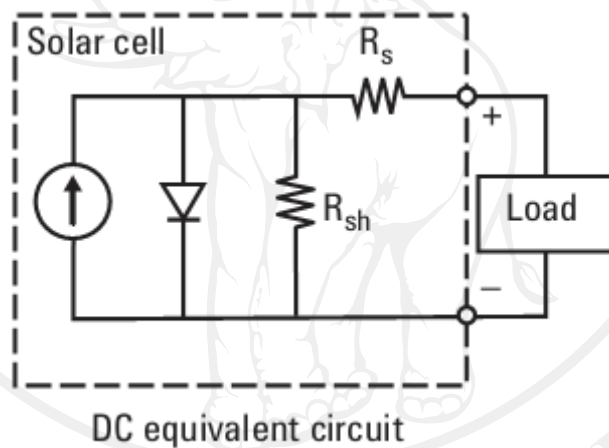
ซึ่งสามารถวัดค่าวัฏกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าตามวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรการวัดค่าทางไฟฟ้า (I-V tester)

### 2.1.2 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ [36]

วงจรสมมูลกระแสตรง แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งอธิบายลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแหล่งของกระแส, ไดโอด (PN junction) และตัวต้านทาน (shunt resistance,  $R_{sh}$ ) ที่ต่อขนานกับชุดตัวต้านทาน (series resistance,  $R_s$ ) ซึ่งเป็นความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดและเป็นความต้านทานหลักที่มีผลต่อการที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นถ้า  $R_s$  มีค่าน้อย ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความมากขึ้น ส่วนความต้านทาน  $R_{sh}$  มีผลต่อกระแสไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าลดลงเนื่องจากการคืนตัวของอิเล็กตรอน ( $e^-$  recombination) หรือเกิดจากกระแสรั่วไหลบริเวณขอบของอุปกรณ์ ซึ่งกรณีนี้ ค่า  $R_{sh}$  ต้องมีขนาดที่มากจึงจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นนั่นเอง



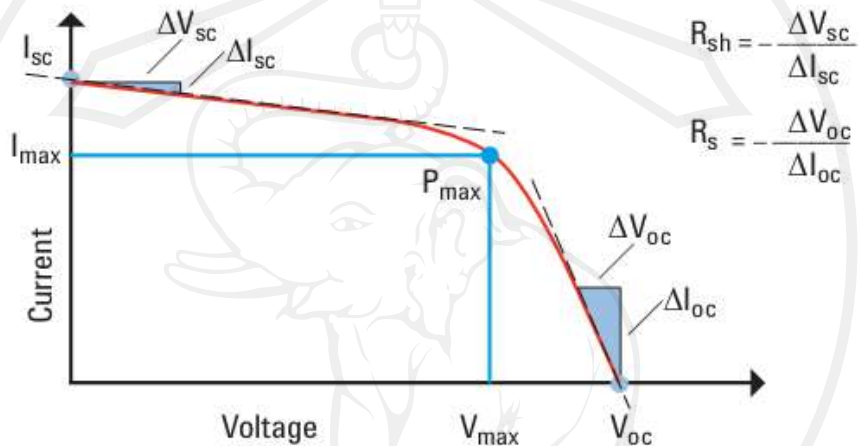
รูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลกระแสตรงของเซลล์แสงอาทิตย์ [36]

การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานถึงแม้ว่าจะมีหลายวิธีการที่จะประมาณค่า  $R_{sh}$  และ  $R_s$  ซึ่งมีวิธีการที่ง่ายที่สุด คือการวัดจากความชันของกราฟ IV ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แต่ค่าของ  $R_s$  ที่คำนวณโดยใช้วิธีนี้มีแนวโน้มที่มีค่ามากกว่าค่าที่แท้จริงซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (2.3) และ (2.4)

$$R_{sh} = -\frac{\Delta V_{sc}}{\Delta I_{sc}} \quad (2.3)$$

$$R_s = -\frac{\Delta V_{oc}}{\Delta I_{oc}} \quad (2.4)$$

- เมื่อ  $R_{sh}$  คือ ความต้านทานชัณฑ์ (shunt resistance) ( $\Omega$ )  
 $\Delta V_{sc}$  คือ ผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าลัดวงจร (V)  
 $\Delta I_{sc}$  คือ ผลต่างของการแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)  
 $R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรม (series resistance) ( $\Omega$ )  
 $\Delta V_{oc}$  คือ ผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V)  
 $\Delta I_{oc}$  คือ ผลต่างของกระแสไฟฟ้าวงจรเปิด (A)



รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการประมาณค่า  $R_{sh}$  และ  $R_s$  จากกราฟ IV [36]

สำหรับการประมาณค่า  $R_s$  ที่ถูกต้อง ภายใต้การวัดค่า IV แบบ forward biased จะได้ผลต่างของค่าปริมาณการฉายแสง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 การวัดค่า IV แบบ forward biased ภายใต้การเลือกสุมปริมาณการฉายแสงที่เพิ่มขึ้นและเลือกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_1$ ) ที่มีค่าสูงกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{max}$ ) เพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นคำนวณค่าผลต่างกระแส ( $\Delta I$ ) ดังสมการ (2.5)

$$\Delta I = I_{sc}(0) - I_{sc}(1) \quad (2.5)$$

ซึ่งกระบวนการนี้จะต้องมีการทำซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง โดยใช้ค่าที่ต่ำกว่าปริมาณแสงที่ฉายครั้งก่อนหน้า สุดท้ายคำนวณหาค่า  $R_s$  จากการประมาณค่าเฉลี่ยของความต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  ดังสมการ (2.6)

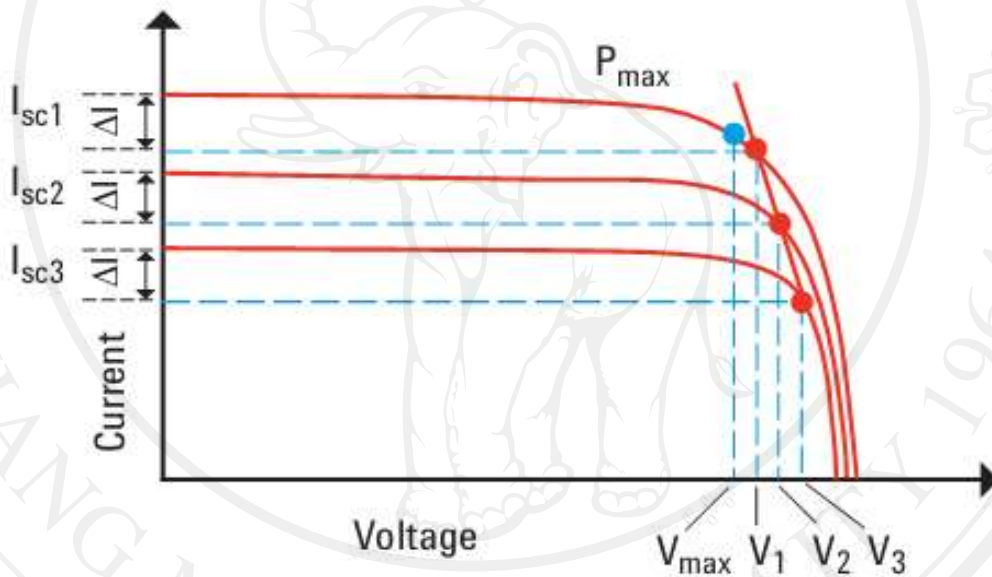
$$R_s = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} \quad (2.6)$$

และค่า  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  หาได้จากสมการ (2.7), (2.8), (2.9)

$$R_1 = \frac{V_2 - V_1}{I_{sc}(V_1) - I_{sc}(V_2)} \quad (2.7)$$

$$R_2 = \frac{V_3 - V_2}{I_{sc}(V_2) - I_{sc}(V_3)} \quad (2.8)$$

$$R_3 = \frac{V_3 - V_1}{I_{sc}(V_1) - I_{sc}(V_3)} \quad (2.9)$$

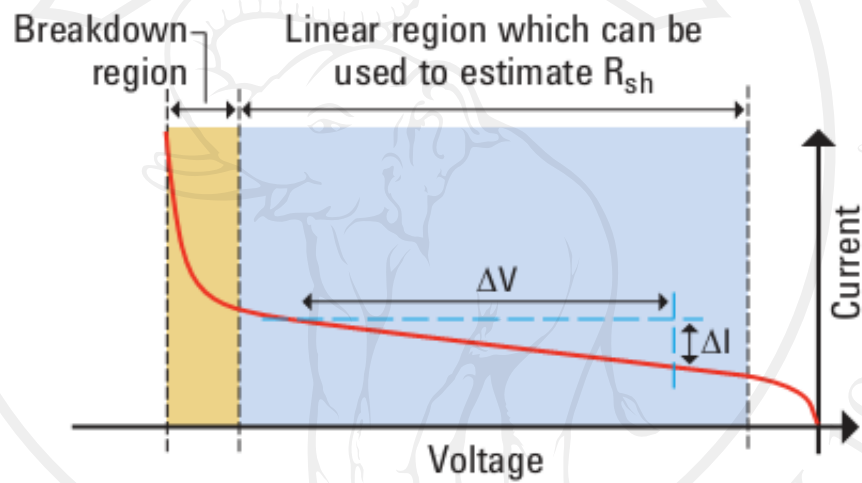


รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการประมาณค่า  $R_s$  จากกราฟ IV ที่ถูกต้อง [36]



สำหรับการวัดค่า IV แบบ reverse biased ภายใต้เงื่อนไข dark current จะทำให้ทราบข้อมูลของค่า  $R_{sh}$  ได้ถูกต้องขึ้น ซึ่งก็เหมือนวิธีการประมาณค่า  $R_{sh}$  แบบอื่นๆ คำนวณจากความชันของกราฟ IV แบบ reverse biased ในช่วงเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 2.8 และค่า  $R_{sh}$  คำนวณได้จากสมการ (2.10)

$$R_{sh} = -\frac{1}{dI/dV} \quad (2.10)$$

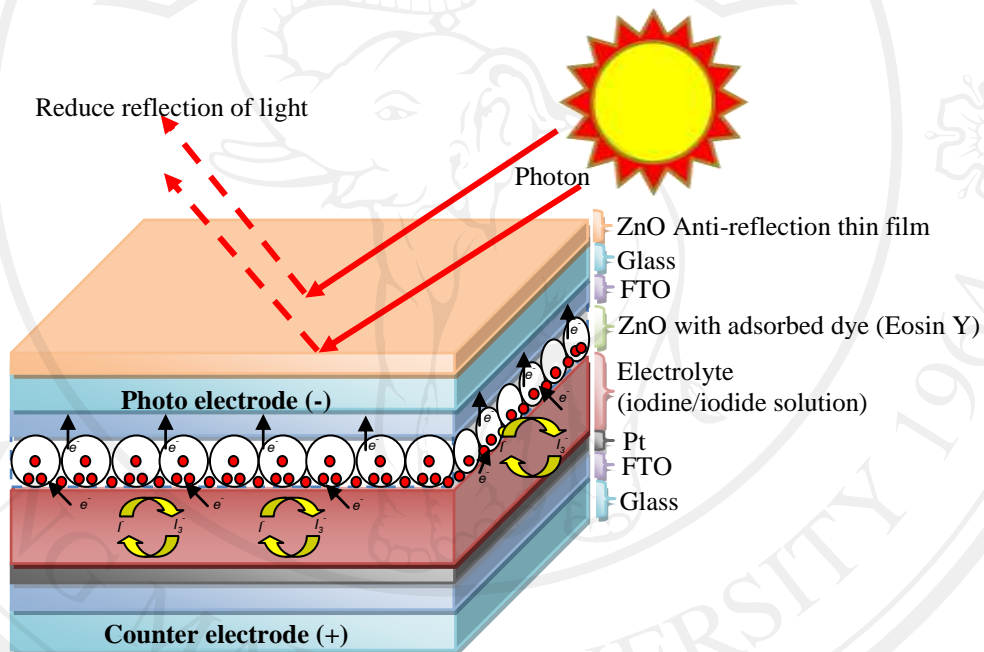


รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทั่วไปของกราฟ IV ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การวัดแบบ reverse bias [36]

## 2.2 ชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง (Anti-reflection layer)

การเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARCs) คือ การเคลือบฟิล์มโปร่งแสงเพื่อศึกษาทางด้านแสงแล้วนำมาประยุกต์ใช้เป็นพื้นผิวเลนส์และอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องการลดการสะท้อนของแสง [5]

ปัจจัยที่มีผลต่อการสะท้อนและการส่งผ่านของแสง ณ บริเวณรอยต่อของฟิล์ม คือ ความหนาของฟิล์มที่จะเป็นตัวเลือกที่จะสร้างการแทรกสอดแบบหักล้างของแสงจะทำให้ไม่เกิดการสะท้อนกลับของแสง ณ บริเวณรอยต่อ ส่วนการแทรกสอดแบบเสริมจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด [5]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ที่สูญเสียพลังงานจากวงจรภายนอก กลับคืนสู่เซลล์ผ่านทาง counterelectrode ถูกเชื่อมกับวงจรภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลรวมของกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ดังสมการ (2.1) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของสองขั้วไฟฟ้า [3] กระแสรวมสูงสุดมีค่าเป็น  $I_{SC}$  เป็นค่าที่ได้รับมาจากเงื่อนไขของ short-circuit  $\Delta E = V = 0$  ซึ่งเห็นได้จากกราฟ  $I-V$  (current-voltage curve) รูปที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ คือ open circuit voltages ( $V_{oc}$ ) ส่วนกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ short-circuit current ( $I_{SC}$ )

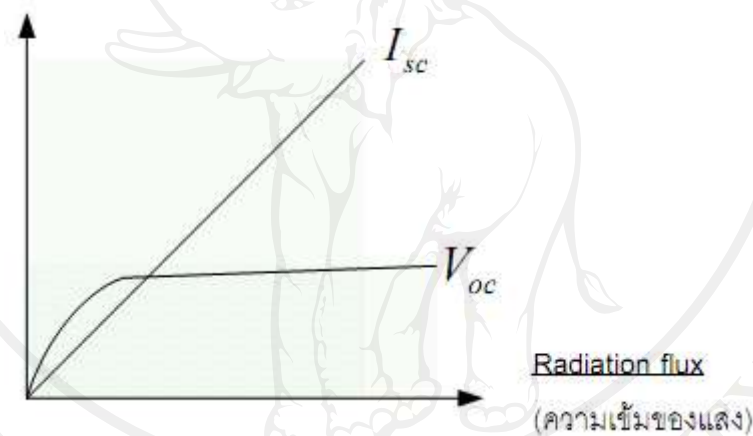
ซึ่งค่า  $I_{sc}$  จะขึ้นกับ solar radiation flux และมีค่าคงที่สำหรับเซลล์หนึ่งๆ ที่ค่า flux ค่าหนึ่ง เราสามารถแสดงได้ว่า  $I_{sc}$  จะอยู่ในรูปสมการ (2.11) [3]

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} Q(E)N(E)dE \quad (2.11)$$

เมื่อ  $Q(E)$  เป็นค่า quantum efficiency สำหรับโฟตอนที่มีความถี่  $E$  ค่า  $N(E)$  เป็นค่าฟลักซ์ของโฟตอนที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $E$  และ  $E + dE$  และค่า  $V_{oc}$  จะแปรตามลอการิทึม (logarithm) ของค่าฟลักซ์ของโฟตอนและอยู่ในรูปสมการ (2.12)

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \left( \ln \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $I_s$  เป็นค่า reverse saturation current ของ ideal diode ซึ่งแทนเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณ  $I_s$  จากพาหะ (carrier density), diffusion length และ life time ของพาหะ [3]



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  กับ radiation flux [3]

ในความเป็นจริงประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์ต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจาก loss mechanism [4] ต่างๆ เช่น 1. การสะท้อนกลับของแสงที่ผิว

2. การรวมตัว (recombination) ของพาหะ และการจับ (trap) พาหะในเนื้อสารและผิวสัมผัส ประสิทธิภาพในการจับพาหะซึ่งถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นแล้วย่อมต่ำกว่า 100%

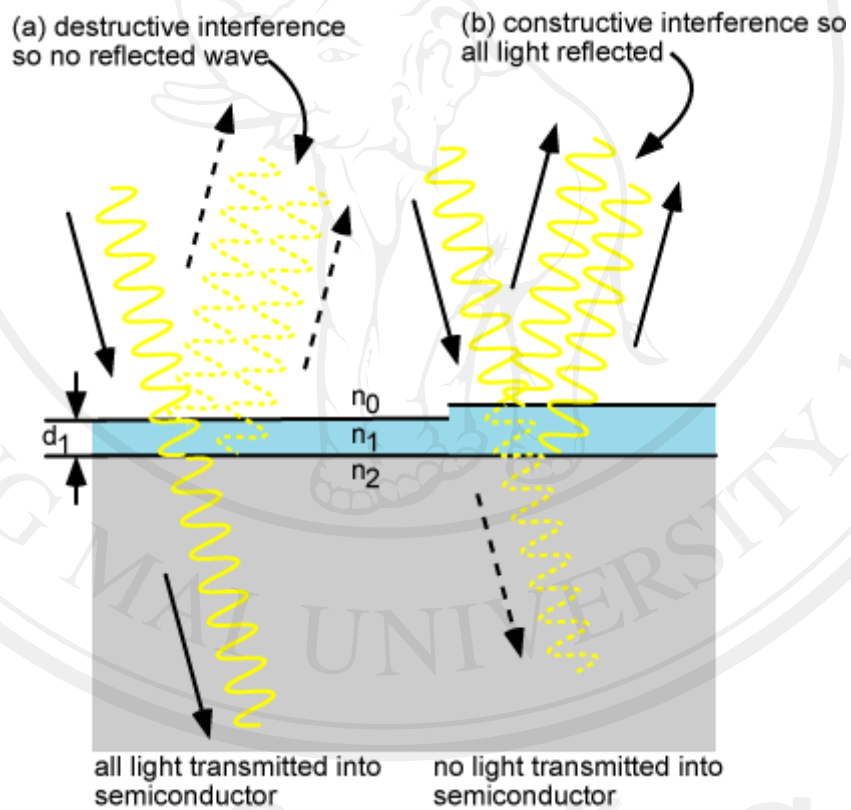
3. Power dissipation เนื่องจากความต้านทานของเซลล์ (เนื้อวัสดุ, ขั้วไฟฟ้าโลหะ ฯ) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้น ก็ต้องลด loss mechanism ต่างๆ ดังกล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจจะศึกษาในเรื่อง การลดการสะท้อนกลับที่ผิว ซึ่งนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ได้อีกทางหนึ่ง

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการลดการสะท้อนกลับของแสงนั้นทำได้โดยการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARCs) เพื่อเพิ่มแสง

ให้ทะลุผ่านเข้าไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากขึ้น โดยปกติแล้วจะเคลือบไว้ด้านบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการต่างๆอย่างหลากหลาย [4]

การเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARCs) คือ การเคลือบฟิล์มโปร่งแสงเพื่อศึกษาทางด้านแสงแล้วนำมาประยุกต์ใช้เป็นพื้นผิวเลนส์และอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องการลดการสะท้อนของแสง [5]

ปัจจัยที่มีผลต่อการสะท้อนและการส่งผ่านของแสง ณ บริเวณรอยต่อของฟิล์ม คือ ความหนาของฟิล์มที่จะเป็นตัวเลือกที่จะสร้างการแทรกสอดแบบหักล้างของแสงจะทำให้ไม่เกิดการสะท้อนกลับของแสง ณ บริเวณรอยต่อ ส่วนการแทรกสอดแบบเสริมจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด [5] ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการสะท้อนกลับของแสง ณ ผิวรอยต่อของฟิล์มกับแผ่นรองรับ [5]

(a) แสดงการแทรกสอดแบบหักล้าง ณ รอยต่อ (b) แสดงการแทรกสอดแบบเสริม ณ รอยต่อ

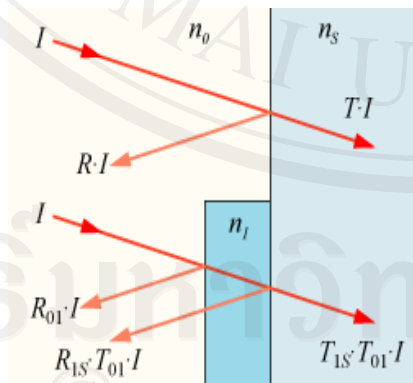
ความหนาของการเคลือบผิวชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงจะเป็นตัวเลือกความยาวคลื่นในตัวกลางที่มีค่าเป็นหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของคลื่นที่เข้ามา และการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงจากวัสดุโปร่งใสที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  และแสงที่ตกกระทบผิวมีความยาวคลื่น  $\lambda_0$  ฟิล์มมีความหนา  $d_1$  ซึ่งเป็นสาเหตุของการสะท้อนต่ำสุดตามสมการ (2.13) [5]

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1} \tag{2.13}$$

นอกจากนี้แล้วสิ่งที่มีผลต่อการสะท้อนการส่งผ่านยังขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของแสง ความยาวคลื่น ซึ่งช่วงความยาวคลื่นต้องกว้างพอสามารถรับแสงในช่วงต่างๆ ได้ เช่น UV, IR, Visible

ประเภทของชั้นต่อต้านการสะท้อนของแสง (Anti-Reflection) [4]

1. Index-matching เป็นการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนของแสงที่ง่ายที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ฝุ่นละอองที่เข้าเกาะอยู่บนผิวกระจก ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างพื้นผิว 2 รอยต่อ คือ รอยต่อระหว่างอากาศกับฝุ่นละออง และฝุ่นละอองกับกระจก ซึ่งฝุ่นละอองนั้นจำเป็นต้องมีค่าดัชนีหักเหที่อยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหของอากาศกับของกระจกจึงจะทำให้มีการลดการสะท้อนกลับของแสงให้น้อยกว่าพื้นผิวระหว่างอากาศกับกระจก
2. Single-layer interference เป็นการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนของแสงที่ประกอบด้วยวัสดุโปร่งแสง 1 ชั้น มีความหนาเป็น  $\frac{1}{4}$  ของความยาวคลื่นแสง และค่าดัชนีหักเหของแสงมีค่าเท่ากับรากที่สองของดัชนีหักเหของแผ่นรองรับ ดังสมการ (2.14) และลักษณะการสะท้อนและการหักเหของแสง ณ ผิวรอยต่อของฟิล์มกับแผ่นรองรับแสดงดังรูปที่ 2.12



$$n_1 = \sqrt{n_0 n_s} \tag{2.14}$$

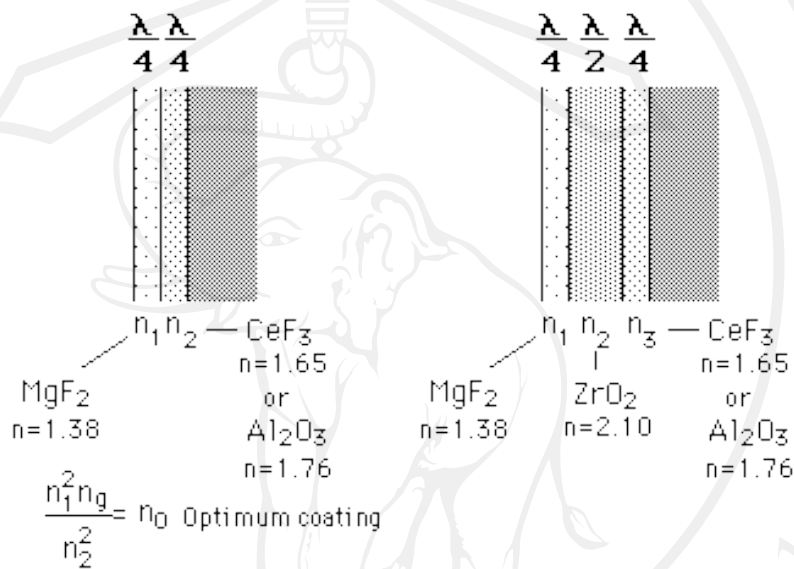
$n_1$  คือ ดัชนีหักเหของชั้นลดการสะท้อนของแสง

$n_0$  คือ ดัชนีหักเหของอากาศโดยปกติจะเท่ากับ 1

$n_s$  คือ ดัชนีหักเหของแผ่นรองรับ

รูปที่ 2.12 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสง ณ ผิวรอยต่อของฟิล์มกับแผ่นรองรับ

3. Multi-layer interference เป็นการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนของแสงที่ประกอบด้วยวัสดุโปร่งแสงตั้งแต่สองชั้นขึ้นไปสลับกันระหว่างวัสดุที่มีดัชนีหักเหต่ำและวัสดุที่ดัชนีหักเหสูง ซึ่งมีโอกาสที่จะช่วยลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่า single-layer เพราะที่ single-layer จะรับได้เฉพาะความยาวคลื่นเดียวมักจะเป็นความยาวคลื่นตรงกลาง ส่วน multi-layer สามารถรับได้ช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่าจึงทำให้ลดการสะท้อนแสงต่ำถึง 0.1 % ที่ช่วงความยาวคลื่นนั้นๆ ลักษณะของ Multi-layer coating แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่าง Multi-layer coating [15]

4. Absorbing เป็นการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนของแสงที่เรียกว่า “Absorbing ARC” การเคลือบประเภทนี้จะใช้ประโยชน์ในการส่งผ่านแสงให้ผ่านพื้นผิวมากที่สุดก็จะให้ค่าการสะท้อนกลับที่น้อยลงตามความต้องการ สามารถสร้างชั้นบางๆ ที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำมากๆ และสามารถผลิตด้วยวิธีการง่าย เช่น การสปัตเตอร์ริง ไทเทเนียมไนเทรต และ ไนโอเบียมไนเทรต เป็น Absorbing ARC เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ต้องการเพิ่มความชัดหรือเพื่อแทนที่กระจกย้อมสี ตัวอย่างเช่น ในจอแสดงผล CRT
5. Moth Eye คือ ตาของแมลงหรือผีเสื้อกลางคืนที่มีคุณสมบัติผิดปกติ ที่มีพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยฟิล์มที่มีโครงสร้างในระดับนาโนในธรรมชาติ ซึ่งช่วยกำจัดการสะท้อนแสง ช่วยให้แมลงมองเห็นได้ดีในที่มืด โดยไม่ต้องสะท้อนแสงสถานที่ต่างๆ ในการออกล่าเหยื่อ โครงสร้างประกอบด้วยรูปแบบหกเหลี่ยมมีความสูงประมาณ 200 nm และมีความกว้างประมาณ 300 nm โครงสร้างประเภทนี้ทำงานได้เพราะว่าขนาดของโครงสร้างมีขนาดเล็ก

กว่าความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นและจะมีดัชนีหักเหที่ต่อเนื่องระหว่าง อากาศกับตัวกลาง ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนของแสงได้ ลักษณะของ Moth eye แสดงดังรูปที่ 2.14



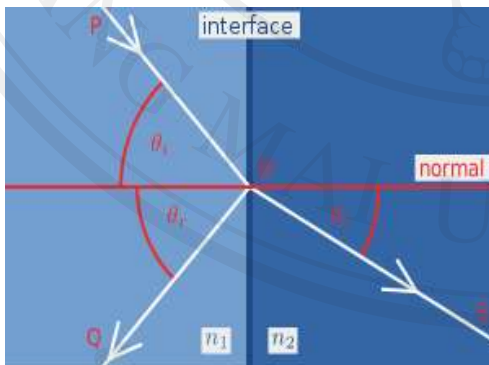
รูปที่ 2.14 แสดง Moth Eye ในธรรมชาติ [16-18]

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งฟิล์มบางประเภทต่างๆ ความหนาของฟิล์ม ความยาวคลื่น มุมตกกระทบ และดัชนีหักเหของแสง มีผลต่อการลดการสะท้อนแสง ซึ่งค่าต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการของเฟรสเนล (Fresnel equation) [19]

สมการของเฟรสเนล (fresnel equation) อธิบายว่าเมื่อแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหของแสงแตกต่างกันจะเกิดการสะท้อนกลับและการหักเหของแสงเกิดขึ้น ณ รอยต่อดังรูปที่ 2.15

เมื่อ

P คือ รังสีตกกระทบ, Q คือ รังสีสะท้อน,  
S คือ รังสีหักเห,  $n_1$  คือ ดัชนีหักเหตัวกลางที่ 1,  
 $n_2$  คือ ดัชนีหักเหตัวกลางที่ 2,  
 $\theta_i$  คือ มุมตกกระทบ,  $\theta_r$  คือ มุมสะท้อน,  
 $\theta_t$  คือ มุมหักเห



รูปที่ 2.15 แสดงการสะท้อนและหักเหของแสงที่ผิวยรอยต่อของตัวกลาง 2 ตัวกลาง [19]

จากรูปที่ 2.15 เป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง ตามสมการ (2.15)

$$\text{มุมตกกระทบ } (\theta_i) = \text{มุมสะท้อน } (\theta_r) \quad (2.15)$$

และ กฎของสเนล (Snell's Law) ดังสมการ (2.16) [19]

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.16)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R (Reflectance) คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของการสะท้อนต่อความเข้มของแสงที่ตกกระทบทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน T (Transmittance) คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงที่ผ่านตัวกลางต่อความเข้มแสงที่ตกกระทบทั้งหมด

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [19] คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง s-โพลาไรซ์ ดังสมการ (2.17)

$$R_s = \left( \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \left[ \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right]^2 \quad (2.17)$$

2. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง p-โพลาไรซ์ ดังสมการ (2.18)

$$R_p = \left( \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \left[ \frac{n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_t} \right]^2 \quad (2.18)$$

เช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับ s-โพลาไรซ์ ดังสมการ (2.19)

$$T_s = 1 - R_s \quad (2.19)$$

2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับ p-โพลาไรซ์ ดังสมการ (2.20)

$$T_p = 1 - R_p \quad (2.20)$$

โดยปกติแสงที่ตกกระทบจะเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ ซึ่งประกอบด้วย s และ p โพลาไรซ์

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมจะมีค่าดังสมการ (2.21)

$$R = \left( \frac{R_s + R_p}{2} \right) \quad (2.21)$$



และค่าความเข้มของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $r$ ) จะมีค่าดังสมการ (2.22)

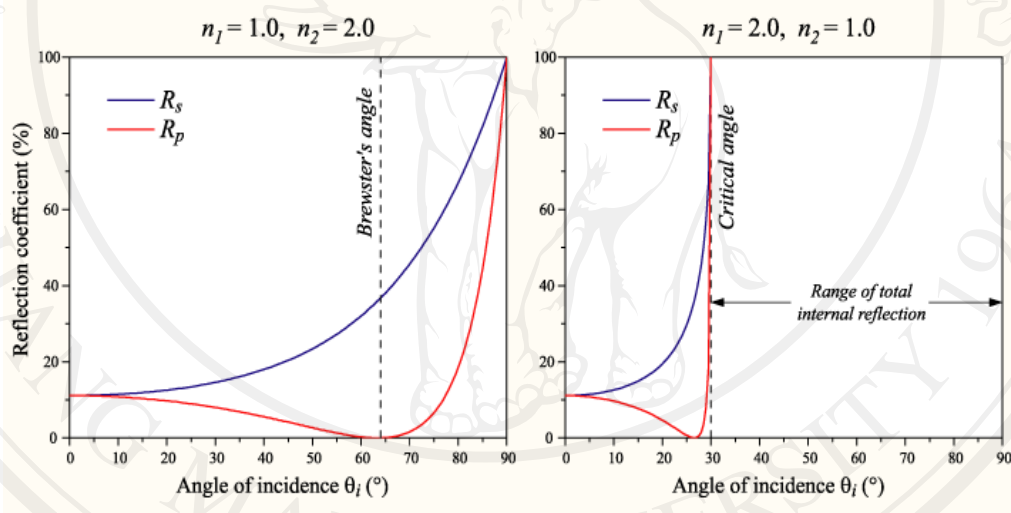
$$r = \sqrt{R} \quad \text{หรือ} \quad R = r^2 \quad (2.22)$$

และค่าความเข้มของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $t$ ) จะมีค่าดังสมการ (2.23)

$$T = \left( \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right)^2 t^2 \quad (2.23)$$

ค่ามุมตกกระทบค่าหนึ่ง สำหรับตัวกลาง  $n_1$  และ  $n_2$  ที่ทำให้ค่า  $R_p$  เข้าใกล้ศูนย์ เรียกมุมนี้ว่ามุมของบรูสเตอร์ (Brewster's angle) มีค่าประมาณ  $56^\circ$  สำหรับตัวกลางที่เป็นกระจกและสูญญากาศจะเป็นจริงได้เมื่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเป็นจำนวนจริงเท่านั้น สำหรับสารอื่นที่ดูดกลืนแสง เช่น โลหะและสารกึ่งตัวนำ ค่าดัชนีหักเหจะเป็นค่าเชิงซ้อน และทำให้ค่า  $R_p$  ไม่เข้าใกล้ศูนย์ ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับมุมตกกระทบที่ผิว แสดงดังรูป

ที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับมุมตกกระทบที่ผิว [19]

เมื่อแสงมีมุมตกกระทบเข้าใกล้เส้นปกติ จะมีผลทำให้  $\theta_i \approx \theta_t \approx 0^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ดังสมการ (2.24) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ดังสมการ (2.25) จะมีค่าเท่ากับ [19]

$$R = R_s = R_p = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$T = T_s = T_p = 1 - R = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.25)$$

จากที่กล่าวมาหลักการสร้างฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนแสงที่ผิวตกกระทบ ดังนั้นถ้านำหลักการดังกล่าวมาสร้างบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ก็จะช่วยลดการสะท้อนกลับ

ของแสงที่ผิวกระจกได้ จะทำให้แสงสามารถทะลุผ่านไปยังโมเลกุลของสีย้อมที่เกาะติดกับสารตัวนำได้มากขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงก็จะมีค่ามากเพิ่มขึ้น

ถ้าเราสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเพิ่มสัมประสิทธิ์การส่งผ่านให้มากขึ้น จะทำให้จำนวนฟลักซ์ของโฟตอนที่ผ่านมายังโฟโตอิเล็กโทรมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า short circuit current ( $I_{sc}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการ (2.26),(2.27),(2.28) [3],[20],[21]

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} Q(E)N(E)dE \quad (2.26)$$

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} qF(\lambda)IPCE(\lambda)d\lambda \quad (2.27)$$

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} qF(\lambda)[1-R(\lambda)]Q_i(\lambda)d\lambda \quad (2.28)$$

เมื่อ

$Q(E)$  คือ ค่า quantum efficiency สำหรับโฟตอนที่มีพลังงาน  $E$

$N(E)$  คือ ค่าฟลักซ์ของโฟตอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง  $E$  และ  $E + dE$

$q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron charge)

$F(\lambda)$  คือ ฟลักซ์ของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ (flux the solar spectrum)

$R(\lambda)$  คือ ค่าการสะท้อนแสง (reflection)

$Q_i(\lambda)$  คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency)

$IPCE(\lambda)$  คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency)

### 2.3 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

สำหรับเทคนิคการเตรียม anti-reflection coating มีได้หลายวิธีมาก เช่น thermal oxidation, sputtering deposition, electro-chemical etching, spin coating, plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD), electron beam evaporation (EBE), dip coating, spray pyrolysis, solgel method, chemical vapor deposition (CVD), sparking process และ evaporating

ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะศึกษาการเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ โดยวิธีการ sparking process และ evaporating

#### 2.3.1 กระบวนการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Thermal evaporation in vacuum) [22]

กระบวนการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เป็นวิธีการที่ใช้กันมานานทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมโรงงาน เพราะว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวก โดยกระบวนการมี 3 ขั้นตอนในการเกิดฟิล์มบางคือ

2.3.1.1 การก่อเกิดไอสารจากสารตั้งต้น

2.3.1.2 การเคลื่อนย้ายไอสารไปยังแผ่นรองรับ

2.3.1.3 การควบคุมของสารบนแผ่นรองรับเพื่อฟอร์มตัวเป็นฟิล์มบาง

กระบวนการนี้มักใช้ความดันประมาณ  $10^{-5}$  ทอร์ และอุณหภูมิต่ำ ในการเตรียมฟิล์มแต่ละชนิดก็จะมีเทคนิคต่างๆกันในการทำให้สารระเหยกลายเป็นไอ โดยเทคนิคที่ใช้กันมานานอย่างแพร่หลายคือการทำให้น้ำมันโลหะหรือสารในโบตระเหยเป็นไอ เช่น ทังสเตน แทนทาลัม หรือ โมลิบดีนัม ด้วยการให้ความร้อนโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่สารตั้งต้น

### 2.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีการสปาร์ค (Synthesis of Nanoparticle by Sparking process) [23]

วิธีการสปาร์คเป็นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของโลหะ โดยจัดให้มีระยะห่างระหว่างลวดโลหะประมาณ 1 mm และวางขั้วสเตรทด้านล่างของปลายลวดโลหะประมาณ 2 mm เมื่อจ่ายความต่างศักย์สูง(ประมาณ 1000 โวลต์ขึ้นไป) คร่อมระหว่างปลายลวดสองด้านจะทำให้โมเลกุลของอากาศบริเวณปลายลวดแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน ซึ่งไอออนจะเคลื่อนที่ชนปลายลวดด้านลบ (Cathode) และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ชนปลายด้านบวก (Anode) ทำให้เกิดการสปาร์ค เกิดความร้อน และแรงดันสูงบริเวณปลายลวด ซึ่งจะทำให้โลหะบริเวณปลายหลุดลงบริเวณแผ่นรองรับตกสะสมกลายเป็นอนุภาคฟิล์มนาโน ในกรณีสปาร์คโลหะบนของเหลวจะเกิดอนุภาคนาโนตกสะสมในของเหลวในรูปคอลลอยด์ได้เช่นกัน

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นต่อการสะท้อนของแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงก์ออกไซด์ ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนและวิธีการ sparking บนพื้นผิวกระจก ฟิล์มที่ได้จะนำไปวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าการส่งผ่านและการสะท้อนด้วยเครื่องยูวีวิสซิเบิลสเปคโตรสโคปี วัดค่าดัชนีหักเหได้จากเครื่องอิลิปโซเมทรี และนำฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นต่อการสะท้อนแสงที่สามารถลดการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบและเพิ่มการส่งผ่านของแสงที่นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงก์ออกไซด์

## 2.4 สมบัติของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [24]

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่งซึ่งในทางฟิสิกส์จะนิยามสารกึ่งตัวนำว่าเป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T=0$  K) เนื่องจากประจุทั้งหมดอยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence Band, VB) จึงไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบนำ (Conduction band, CB) เลย แต่ที่อุณหภูมิ  $T>0$  K อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากชั้น VB ให้ขึ้นไปอยู่ที่ชั้น CB ได้ ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ในสาร ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่อุณหภูมิห้อง

ZnO มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal structure) โดยมีสมบัติทางกายภาพบางประการแสดงในตารางที่ 2.1

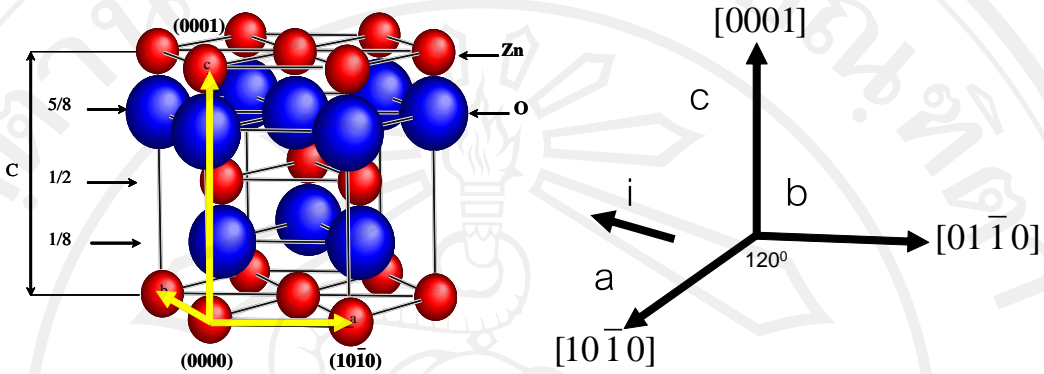
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพบางประการของ ZnO

|                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| น้ำหนักโมเลกุล                 | 81.7                            |
| สัดส่วนน้ำหนักอะตอมของสังกะสี  | 65.7 %                          |
| สัดส่วนน้ำหนักอะตอมของออกซิเจน | 34.3 %                          |
| ความหนาแน่น                    | 5.6803 g/ cm <sup>3</sup>       |
| จุดหลอมเหลว                    | 2248                            |
| จุดเดือด                       | -                               |
| ช่องว่างแถบพลังงาน             | 3.3 eV (~300 K)                 |
| โครงสร้าง                      | Hexagonal $a=b=3.24$ $c=5.20$ Å |
| Enthalpy of fusion             | 52.30 kJ/ mol                   |
| ดัชนีหักเหของแสง               | $\approx 2$                     |

เนื่องจาก ZnO มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลซึ่งในบางครั้งการอธิบายระนาบของ ZnO ด้วยระบบ (hkl) นั้นไม่สามารถอธิบายได้ดีเพราะเวกเตอร์ a และเวกเตอร์ b ใช้ในการบอกทิศทางในผลึกซึ่งไม่อยู่ในทิศของแกน x หรือ y โดยที่ a และ b ทำมุมกัน  $120^\circ$

ดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้การอธิบายระนาบในโครงสร้างเฮกซะโกนอลจำเป็นต้องใช้ตัวแปรถึง 4 ตัว คือเพิ่มตัวแปร i โดยที่  $i = -(h+k)$  ซึ่งจะเขียนเป็นระบบ (hkil) ยกตัวอย่าง เช่น ระนาบ (110) เป็น  $(11\bar{2}0)$  เป็นต้น ซึ่งระบบ (hkil) จะมีประโยชน์อย่างมากในการใช้อธิบายโครงสร้างของผลึกเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาระนาบที่เท่ากันแต่ระบบ (hkl) ต่างกัน ยกตัวอย่างระนาบ (110)

เมื่อใช้ระบบ (hkl) จะสามารถหาระนาบอื่นๆ ได้คือ (110) และ(110) แต่เมื่อใช้ระบบ (hkil) แล้ว จะได้ระนาบ(1120)(1120)(2110)(2110)(1210) เป็นต้น จะเห็นได้ว่าระบบ (hkil) ใช้ อธิบายระนาบได้หลากหลายกว่า ลักษณะโครงสร้างของ ZnO แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของ ZnO [24]

## 2.5 อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-vis spectroscopy)

เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม หรือสารละลาย ผ่านการทะลุผ่านของแสง หรือการสะท้อนของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ค่า transmittance หรือค่า reflectance สามารถบอกรายละเอียดของฟิล์มได้ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์หาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ได้ด้วย ซึ่งความยาวคลื่นจะขึ้นอยู่กับช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต ถึง ช่วงแสงที่ตามองเห็น (200-800 nm) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectroscopy เมื่อแสงความเข้ม  $I_0$  ผ่านแผ่นฟิล์มหรือสารละลาย ที่มีความหนา  $t$  และความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากแผ่นฟิล์ม หรือสารละลายวัดได้  $I$  จะมีค่าลดลงแบบเอกโพเนนเชียล ดังสมการ (2.29)

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (2.29)$$

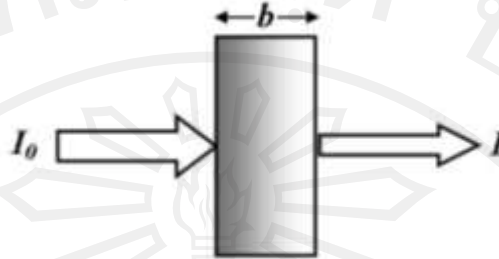
เมื่อ  $\alpha$  คือ absorption coefficient

ค่า transmission ( $T$ ) หาได้จาก อัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงที่ทะลุออกมากับความเข้มแสงเริ่มต้น ดังสมการ (2.30)

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\alpha = \frac{-\ln(T)}{t}$

โดยมีทิศทางของความเข้มแสงก่อนและหลังการดูดกลืน ดังรูปที่ 2.18 และเขียนเป็นค่า transmission ( $T$ ) ดังสมการ (2.31)



รูปที่ 2.18 แสดงความเข้มของแสงก่อนและหลังการทะลุผ่านสาร [25]

$$T = \frac{I}{I_0} \text{ หรือ } \%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (2.31)$$

สำหรับค่าการดูดกลืนแสง absorbance นั้นนิยามจากสมการ (2.32)

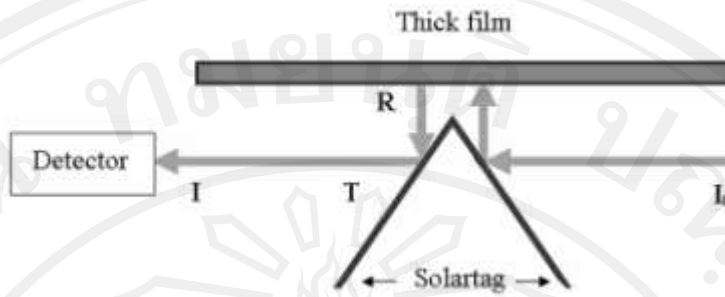
$$A = -\log T = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \epsilon b C \quad (2.32)$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าการดูดกลืน (absorbance)  
 $T$  คือ ค่าการส่งผ่านแสงของสาร (transmittance)  
 $I$  คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (intensity of transmitted light)  
 $I_0$  คือ ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (intensity of incident light)  
 $b$  คือ ความหนาของสารละลาย หน่วยเป็น เซนติเมตร (path length of sample หรือ cell length)

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วยเป็น  $\text{mol/dm}^3$  หรือ  $\text{mol/L}$

$\epsilon$  คือ molar absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุล คำนี้อาจจะระบุว่าสารแต่ละตัวมีพื้นที่ที่จะดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยต่อ 1 mol

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นฟิล์มที่หนามากจนแสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ จะใช้การวัดร้อยละของแสงที่สะท้อนออกจากสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงเส้นทางเดินของแสงเมื่อวัดฟิล์มแบบร้อยละการสะท้อน [25]

จากกฎการรวมกันของ  $R + T + A = 1$  จะอนุมานว่าเนื่องจากฟิล์มมีความหนาทำให้มีการสะท้อนออกไปนอกฟิล์มนั้นไม่มี ดังนั้นค่า reflectance ของฟิล์มตัวอย่างจะหมายถึงค่า transmittance ที่เครื่องวัดได้ เนื่องจากเครื่องวัดจะวัดความเข้มแสงเริ่มต้นกับความเข้มแสงสุดท้ายเท่านั้น และสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.33) (2.34) และ (2.35)

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad (2.33)$$

$$T_{\text{instrument}} = R_{\text{films}} \quad (2.34)$$

$$A = -\log R \quad (2.35)$$

### 2.5.1 อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีดังนี้

2.5.1.1 แหล่งกำเนิดรังสี (source) แหล่งกำเนิดรังสีในสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายมีดังนี้

ก. หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุด ตั้งแต่ช่วง ความยาวคลื่นประมาณ 160-360 nm มีทั้งประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 โวลต์) และ ประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 โวลต์) หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูง จนถึง ความยาวคลื่นประมาณ 360 nm หลังจากนั้นความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ข. หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสูญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง UV ใกล้ ช่วงแสงที่มองเห็นได้จนถึงช่วง IR หลอดชนิดนี้มีราคาถูกและหาได้ง่าย ในท้องตลาด

**2.5.1.2 โมโนโครเมเตอร์ (monochromator)** เป็นชิ้นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณภาพของ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียว ในช่วงแสงที่มองเห็นได้อาจใช้ปริซึมแก้ว ส่วนในช่วง UV จำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์ สำหรับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีราคาแพง มักใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ diffraction grating ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีร่องเป็นจำนวนมากและความกว้างของร่องใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี

**2.5.1.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (recorder)** หลังจากที่ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารที่ต้องการวัด การดูดกลืนแล้ว จะไปตกที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งให้ข้อมูลการดูดกลืนแก่เรา สำหรับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ราคาถูก ข้อมูลนี้จะปรากฏออกมาในรูปการป้ายเบนของเข็มบนหน้าปัทม์มิเตอร์ หรือปรากฏเป็นตัวเลขก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ ต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้สำหรับแต่ละความยาวคลื่นในกระดาษกราฟ เส้นที่เชื่อมจุดต่าง ๆ ก็คือสเปกตรัมนั่นเอง สำหรับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นเองโดยอัตโนมัติ จะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอยู่ด้วย สามารถบันทึกออกมาเป็นสเปกตรัมได้โดยตรง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดนี้มีราคาแพง

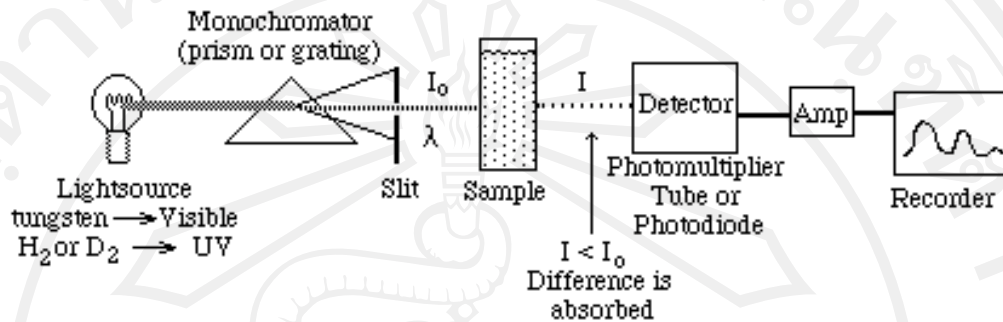
**2.5.1.4 เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง** เนื่องจากแก้วธรรมดาดูดกลืนรังสีในช่วง UV จึงจำเป็นต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยควอตซ์แทน เซลล์ที่นิยมใช้มีความหนา 1.00 ซม. การรักษาความสะอาดเซลล์เป็นเรื่องสำคัญมาก สำหรับการวัดสเปกตรัม ไม่ควรปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไปจนเหลือสารตัวอย่างติดอยู่กับเซลล์ ควรล้างเซลล์ให้สะอาดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์หรือน้ำกลั่นตามความเหมาะสม เช็ดผิวภายนอกเซลล์ด้วยกระดาษเช็ดเซลล์แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศก็เป็นการเพียงพอ ไม่ควรใช้กรดโครมิกล้างเซลล์ ควรแยกเซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายของสารอินทรีย์ออกจากเซลล์ที่บรรจุสารอนินทรีย์เพื่อให้ง่ายต่อการล้างทำความสะอาด เซลล์ควอตซ์นี้มีราคาแพงจึงควรเก็บรักษาไว้อย่างดีที่สุด



## 2.5.2 ชนิดของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทด้วยกันคือ

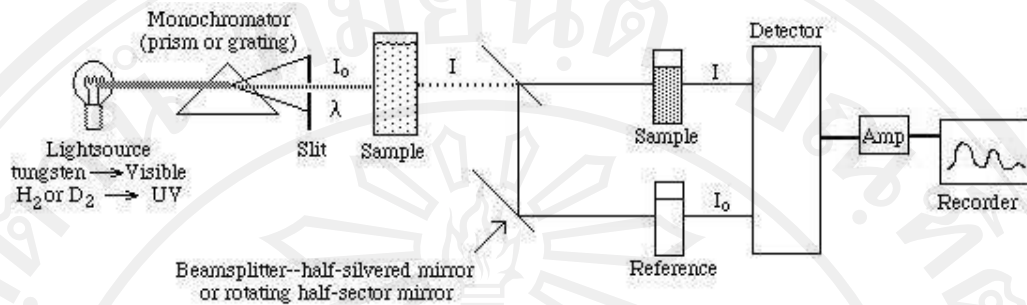
### 2.5.2.1 Single-Beam Spectrophotometer



รูปที่ 2.20 แสดงส่วนประกอบของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีเดี่ยว [25]

รูปที่ 2.20 แสดงทางเดินของรังสีในสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แบบลำรังสีเดี่ยว และสามารถวัดสเปกตรัมทั้งในช่วง UV และช่วง visible จะเห็นได้ว่า เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสี ซึ่งอาจจะเป็นหลอดควิที่เรียมหรือหลอดทังสแตนแล้ว ผ่านเลนส์กระจกต่างๆ โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น grating เลนส์ต่างๆ สารตัวอย่าง (ซึ่งไม่ได้แสดงในภาพนี้) แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ ตลอดเส้นทางของลำรังสีนี้มีลำรังสีเพียงลำเดียว จึงเรียกสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ว่าแบบลำรังสีเดี่ยว ฟังสังเกตุว่าเมื่อ grating หมุนทำมุมกับลำรังสีที่มาตกกระทบ ตัวเลขบนหน้าปัทม์ของเครื่องแสดงว่าในขณะที่รังสีที่ผ่าน grating มีความยาวคลื่นเท่าใด เนื่องจากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องทำตัวเซลล์พื้นฐานก่อน โดยจะเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ชนิดเดียวกับสารตัวอย่างที่มีตัวทำละลายนั้นๆ อยู่ด้วย เพื่อปรับสเปกตรัมให้อยู่ในตำแหน่ง “ศูนย์” ก่อน แล้วจึงให้ลำรังสีผ่านเซลล์สารตัวอย่าง ความแตกต่างระหว่างการดูดกลืนรังสีของทั้ง 2 เซลล์จะปรากฏบนหน้าปัทม์มิเตอร์ สำหรับทุกความยาวคลื่นที่ต้องการวัด แล้วนำข้อมูลที่ได้อ่านบันทึกเป็นสเปกตรัมต่อไป ก่อนนี้ใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทลำรังสีเดี่ยวควรให้เวลาเครื่องมือได้ปรับตัวอย่างน้อย 15-20 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าหลอดควิที่เรียมหรือหลอดทังสแตนให้รังสีที่มีความเข้มสม่ำเสมอ

### 2.5.2.2 Double-Beam Spectrophotometer



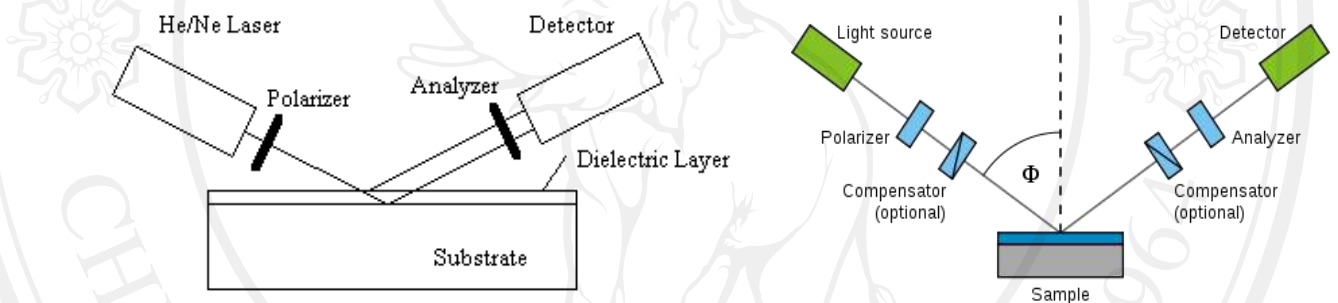
รูปที่ 2.21 แสดงส่วนประกอบของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ [26]

รูปที่ 2.21 แสดงส่วนประกอบของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ double pass ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้ง ด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียว อย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (beam chopper) ซึ่งในกรณีนี้เป็นแผ่นวงกลมซึ่งครึ่งหนึ่งเป็นโลหะและอีกครึ่งหนึ่งเป็นช่องว่าง โดยอุปกรณ์นี้จะหมุนอยู่ตลอดเวลา เมื่อลำรังสีตกกระทบครึ่งวงกลมที่เป็นโลหะ ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่ลำรังสีจะผ่านครึ่งวงกลมที่เป็นช่องว่างและทะลุไปผ่านสารอ้างอิงด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดี่ยวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป ในการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ ไม่จำเป็นต้องอุ่นเครื่องนานเหมือนเครื่องแบบลำรังสีเดี่ยว ทั้งนี้เพราะไม่ว่าแหล่งกำเนิดรังสีจะให้ความเข้มสูงหรือต่ำเพียงใด ลำรังสีทั้งสองที่อุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกจะมีความเข้มเท่ากันเสมอ นอกจากนี้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้มักจะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณติดอยู่ด้วยและสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นไปตลอดเวลาพร้อมกับบันทึกสเปกตรัมในเวลาเดียวกันเครื่องแบบนี้จึงมีราคาค่อนข้างแพง

## 2.6 อีลิปโซเมทรี (Ellipsometry)

อีลิปโซเมทรี (ellipsometry) ใช้ในการวัดค่าดัชนีหักเหของแสงและความหนาของฟิล์มบางกึ่งโปร่งใส โดยอาศัยว่าการสะท้อนที่อินเตอร์เฟสที่ขึ้นอยู่กับโพลาไรซ์ของแสงในขณะที่การส่งผ่านของแสงผ่านชั้นโปร่งใสมีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นที่เข้ามาซึ่งขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของวัสดุ อีลิปโซเมทรี (ellipsometry) สามารถนำมาใช้ในการวัดชั้นเป็นบาง 1 นาโนเมตร ถึงชั้นที่มีความหนาหลายไมครอน การประยุกต์ใช้การวัดความหนาที่ถูกต้องของฟิล์มบางของวัสดุและชั้นบางมาก ๆ และลักษณะของพื้นผิวของวัสดุได้อย่างดี

### หลักการของการทำงานของ อีลิปโซเมทรี (ellipsometry)

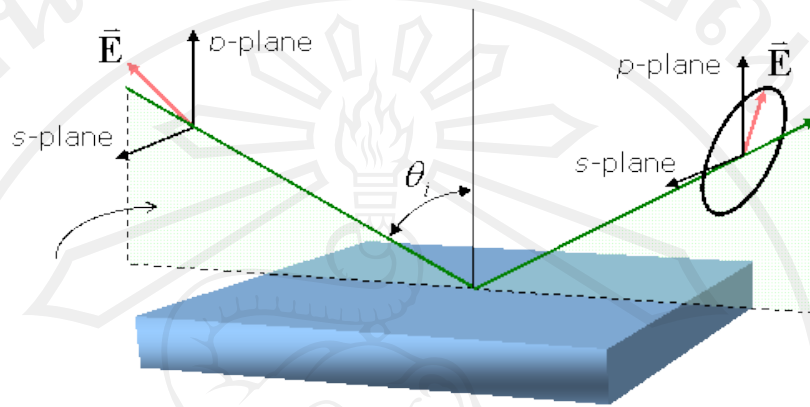


รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของอีลิปโซเมทรี (ellipsometry) [27]

จากรูปที่ 2.22 ประกอบด้วยเลเซอร์ (ปกติ 632.8 นาโนเมตรสำหรับ ฮีเลียม / นีออน เลเซอร์) และมุมของ polarizer มีผลทำให้เกิดโพลาไรซ์ที่ให้สถานะของโพลาไรซ์ที่แตกต่างกัน เช่นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตรง แสงโพลาไรซ์วงรีและแสงโพลาไรซ์วงกลม ถ้าแสงจะสะท้อนออกในชั้นของผิววัสดุและจากนั้นวิเคราะห์ด้วย analyzer จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของการโพลาไรซ์และวิเคราะห์จนกว่าจะมีสัญญาณน้อยที่สุดที่การตรวจพบ สัญญาณนี้จะถูกตรวจสอบอย่างน้อยถ้าแสงสะท้อนโดยกลุ่มตัวอย่างที่เป็นโพลาไรซ์เส้นตรง และการวิเคราะห์จะต้องตั้งค่าให้แสงเฉพาะที่ตั้งฉากกับโพลาไรซ์ที่เข้ามาเท่านั้น ส่วนมุมของการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องจะต้องไปตามทิศทางของการโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อน เพื่อให้ได้แสงเป็นโพลาไรซ์เส้นตรงหลังจากที่ผ่าน polarizer

นอกจากนี้แล้ว รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมาโดยแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นโพลาไรซ์เส้นตรงโดยผ่าน polarizer และสามารถผ่าน compensator (Retarder, quarter wave plate) และตรงไปยัง sample หลังจากที่มีการสะท้อนรังสีที่ผ่าน compensator และตัวทำโพลาไรซ์

ที่สองซึ่งเรียกว่า analyzer แล้วตกอยู่ในเครื่อง detector ซึ่งรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะได้ ทั้ง แสงซึ่งขนานกับระนาบ โพลาริซันนี้เรียกว่า p - polarized และแสงตั้งฉากกับทิศทางโพลาริซัน เรียกว่า s - polarized แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมาโดยแหล่งกำเนิดแสง [28]

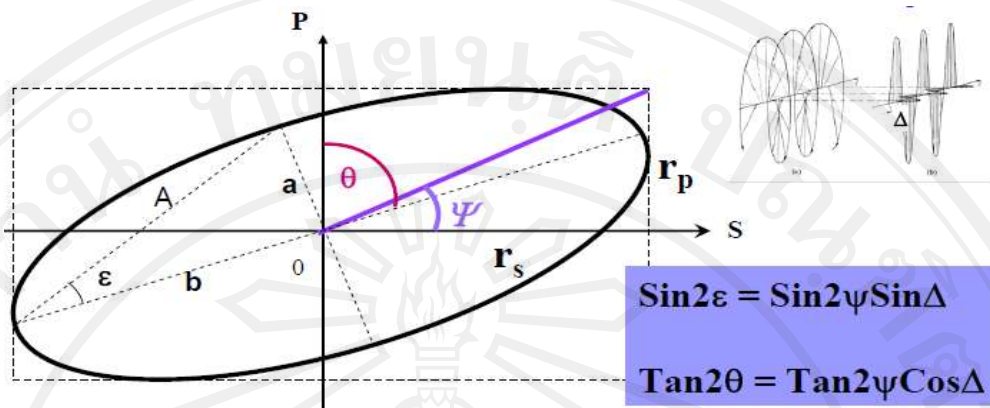
### 2.6.1 หลักการหาค่าดัชนีหักเหของแสงและความหนาของฟิล์มบาง

อิลิปโซเมทรี (ellipsometry) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสถานะของโพลาริซันของแสง ที่สะท้อนจากพื้นผิว ค่าที่วัดจะแสดงค่าที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตาม สมการของ Fresnel,  $R_p$  และ  $R_s$  สำหรับแสง p และ s-polarized ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการของ อิลิปโซเมทรี (ellipsometry) ดังสมการ (2.36) [27]

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) e^{i\Delta} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน,  $r_p$  คือ ความเข้มของสัมประสิทธิ์การ สะท้อนแสง p- polarized,  $r_s$  คือ ความเข้มของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง s- polarized,  $\tan(\psi)$  คือ อัตราส่วนแอมพลิจูดที่ขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน และ  $\Delta$  คือ มุมเฟสที่เปลี่ยนไป (phase shift difference)

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายค่าต่างๆ ในวงรี แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงส่วนประกอบของวงรีและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง [29]

1. มุมอิมิต (Azimuth:  $\theta$ ) คือ มุมระหว่างแกนหลักของวงรีจากรูปคือ แกน  $b$  และทิศทางตามแนว  $P$  ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการวางตัวของวงรี ที่มีค่าอยู่ระหว่าง  $-90^\circ$  ถึง  $90^\circ$
2. สัมประสิทธิ์ความรี ( $e$ ) คือ อัตราส่วนของความยาวครึ่งแกนรอง ต่อ ความยาวครึ่งแกนหลัก มีค่าตามสมการ (2.37)

$$e = \frac{a}{b} = \tan(\varepsilon) \quad (2.37)$$

3. แอมพลิจูด ( $A$ ) คือ ค่าของการวัดความสูงของการสั้นของวงรี จะมีค่าตามสมการ (2.38)

$$A = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.38)$$

ค่าคงที่ทางแสง (optical constant) ถูกกำหนดด้วยอันตรกิริยาของแสงกับวัสดุ ซึ่งก็คือค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าเชิงซ้อนเป็นตัวแทนของค่าคงที่ทางแสง (optical constant) ของวัสดุนั้นตามสมการ (2.39)

$$\tilde{n} = n + ik \quad (2.39)$$

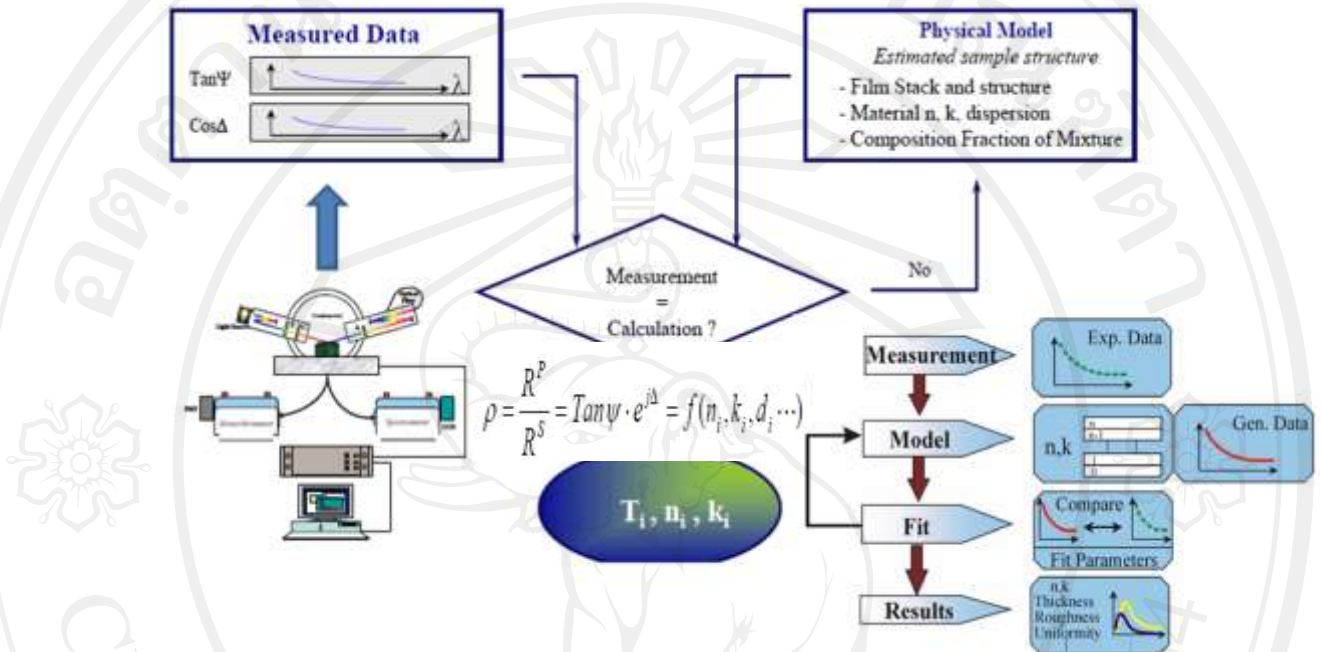
เมื่อ  $\tilde{n}$  คือค่าคงที่ทางแสง (optical constant),  $n$  คือ ส่วนจริงหรือดัชนีหักเหของแสงซึ่งกำหนดจากความเร็วเฟสของแสงในวัสดุนั้น หาได้จากสมการ (2.40)

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.40)$$

เมื่อ  $v$  คือความเร็วของแสงในวัสดุ และ  $c$  คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ,  $k$  คือ ส่วนจินตภาพหรือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมของวัสดุ ตามสมการ (2.41)

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.41)$$

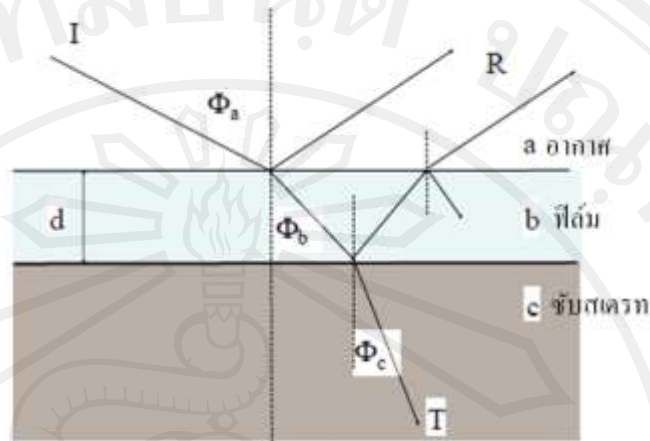
เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดซึม และ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของช่วงแสงนั้นๆ  
แบบจำลองและการวิเคราะห์อีลิปโซเมทรี (ellipsometry) ตามรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงานของ อีลิปโซเมทรี (ellipsometry) [29]

จากรูปที่ 2.25 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงานเมื่อนำสารตัวอย่างไปวัดเครื่องจะวัดค่า  $\tan(\Psi)$  อัตราส่วนแอมพลิจูดที่ขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน และ  $\Delta$  มุมเฟสที่เปลี่ยนไป (phase shift difference) และ detector จะวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น p-polarized และ s-polarized จากนั้นใช้สมการ(2.28) คำนวณค่า จะได้ค่าอยู่ในรูปของฟังก์ชัน ( $n, k, d$ ) (ดัชนีหักเห, ค่าจินตภาพ, ความหนา) เมื่อคำนวณเสร็จต้องทำการสร้างแบบจำลองเพื่อ-fit ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและข้อมูลที่วัดได้ซ้อนทับกันหรือไม่ ถ้าไม่ได้ต้องกลับไปเลือกแบบจำลองใหม่ จนกว่าจะได้ข้อมูลที่ถูกต้อง ข้อมูลที่ได้จะรายงานผลระหว่างดัชนีหักเห ความหนาของฟิล์ม กับ ความยาวคลื่นต่างๆ

กรณี อากาศ/ฟิล์ม/แผ่นรองรับ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงผ่านอากาศ/ฟิล์ม/แผ่นรองรับ [29]

จากรูปที่ 2.26 เกิดการสะท้อนหลายครั้งที่ระหว่างผิว อากาศกับฟิล์ม และ ฟิล์มกับแผ่นรองรับ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผิวได้ตามสมการของเฟรสเนล ซึ่งสามารถคำนวณผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ตามสมการ (2.42), (2.43)

$$R^P = \frac{r_{ab}^P + r_{bc}^P e^{-j2\beta}}{1 + r_{ab}^P r_{bc}^P e^{-j2\beta}} \quad (2.42)$$

$$R^S = \frac{r_{ab}^S + r_{bc}^S e^{-j2\beta}}{1 + r_{ab}^S r_{bc}^S e^{-j2\beta}} \quad (2.43)$$

เมื่อ สัญลักษณ์  $ab$  คือ ผิวรอยต่อระหว่างอากาศและฟิล์ม, สัญลักษณ์  $bc$  คือ ผิวรอยต่อระหว่างฟิล์มและ ซับสเตรท,  $\beta$  คือ phase factor หาได้จากสมการ (2.44)

$$\beta = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda}\right) (n_b - jk_b) \cos \phi_b \quad (2.44)$$

เมื่อ  $d$  คือความหนาของฟิล์ม,  $\lambda$  คือความยาวคลื่นในตัวกลาง

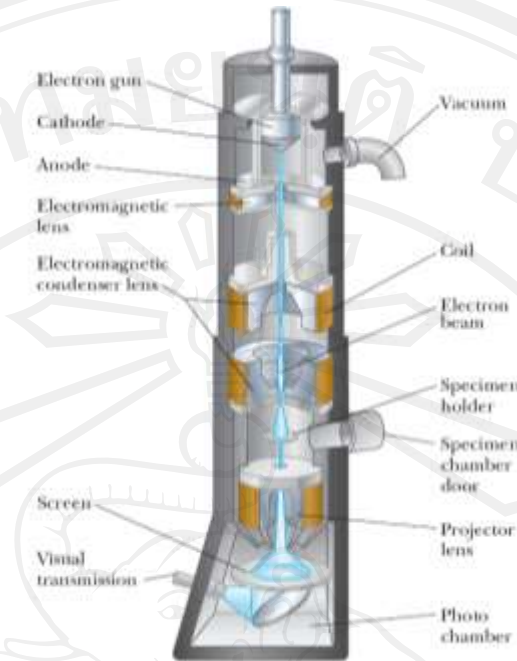
## 2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบลักษณะภายนอกของพื้นผิวชิ้นงานที่มีกำลังขยายสูงมาก ว่ามีลักษณะอย่างไร โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นพาหะแทนแสงในกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้มักใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์ การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดี และอื่นๆอีกหลายด้าน

### 2.7.1 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีดังนี้

1. ปืนกำเนิดอิเล็กตรอน (electrons gun) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้สำหรับทำให้เกิดภาพถ่ายกายภาพ
2. เลนส์ไฟฟ้าแม่เหล็ก (electromagnetic lens) ทำหน้าที่รวมลำอิเล็กตรอนหรือควบคุมลำอิเล็กตรอนที่ยิงมาจากปืนกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งในกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาจะใช้เลนส์แก้ว แต่สำหรับอิเล็กตรอนแล้วจะใช้เลนส์ไฟฟ้าแม่เหล็ก ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือ condenser lens และ objective lens
3. ขดลวดควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอน (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนที่ผ่านมาจากเลนส์ไฟฟ้าแม่เหล็กให้ไปยังพื้นผิวที่ต้องการศึกษาอย่างแม่นยำ
4. ช่องสำหรับใส่สารตัวอย่าง (specimen chamber) ใช้สำหรับใส่ชิ้นงานที่เราต้องการศึกษาโดยชิ้นงานนั้นจะติดอยู่บน stuff ที่ทำจากแท่งทองเหลืองทรงกระบอก
5. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector and scintillator) ทำหน้าที่ในการรวบรวมสัญญาณที่เกิดจากการเอาลำอิเล็กตรอนไปชนชิ้นงานเกิดเป็น secondary electrons และ back-scattered electrons
6. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging photographic devices) ทำหน้าที่ประมวลผลของสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ แล้วนำมาสร้างเป็นภาพแสดงบนจอภาพให้เราเห็น โดยภาพองค์ประกอบทั้งหมดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 2.27





รูปที่ 2.27 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [30]

### 2.7.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเริ่มต้นจากปืนกำเนิดอิเล็กตรอนยิงอิเล็กตรอนอิสระ จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนลงมาด้านล่างใน chamber ที่เป็นสถานะสุญญากาศ โดยใช้ความต่างศักย์เร่งประมาณ 0.5-40 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกบังคับโดยเลนส์ไฟฟ้าแม่เหล็ก และปริมาณอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิด aperture

เลนส์ไฟฟ้าแม่เหล็กที่เรียกว่า condenser lens นับว่าเป็นเลนส์ไฟฟ้าแม่เหล็กที่สำคัญในการควบคุมลำของอิเล็กตรอนจากปืนกำเนิดอิเล็กตรอน จะทำหน้าที่ในการบีบลำอิเล็กตรอนให้มีลำที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ยิ่งลำเล็กลงคุณภาพของภาพถ่ายก็จะดีขึ้น ส่วนเลนส์วัตถุ (objective lens) จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยมีคอยล์สแกน (scan coil) ทำหน้าที่ในการกวาดลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวที่เราต้องการศึกษาเป็นกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยม ซึ่งจะควบคุมการกวาดของอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อสิ้นสุดก็จะเคลื่อนลงอีกแถวหนึ่ง และกวาดจากซ้ายไปขวาเช่นเดิม เป็นเช่นนี้จนครบเฟรม โดยภาพ 1 เฟรมตามเส้นแนวนอนจะประกอบด้วยจุด 1000 จุด และเส้นทั้งหมด 1000 เส้น

เมื่ออิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดตกกระทบผิวตัวอย่าง จะเกิดสัญญาณที่เป็นอิเล็กตรอนออกมาซึ่งจะสามารถจับสัญญาณได้โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ (detector) โดยสัญญาณที่ได้ส่วนใหญ่จะมีอยู่สองชนิดคือ secondary electrons และ back-scattered electrons

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) เป็นสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากสารตัวอย่างให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเมื่ออิเล็กตรอนตัวแรกจากแหล่งกำเนิดมาชนสารตัวอย่าง ทำให้สามารถนำมาสร้างสัญญาณภาพได้

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับหลัง (back-scattered electrons) เป็นสัญญาณอิเล็กตรอนของป็นกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเกิดการสะท้อนจากผิวของชิ้นงานทำให้สามารถนำมาสร้างสัญญาณภาพได้ นอกจากนี้สัญญาณสองชนิดนี้แล้วยังมีสัญญาณอื่นๆอีก เช่น x-ray electromagnetic wave และ ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electrons) เป็นต้น

เมื่อมีการตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนทั้งสองชนิดแล้ว สัญญาณที่ได้จะถูกนำมาสร้างภาพ โดยจะใช้หลอดรังสีแคโทดเป็นจอในการแสดงผล การสแกนของอิเล็กตรอนในหลอดรังสีแคโทด ซึ่งเป็นจอแสดงผลนั้น จะสแกนไปพร้อมๆ กับการสแกนของอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนความสว่างของจอแสดงผลนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณอิเล็กตรอนสองชนิดดังที่ได้จากแอมพลิไฟเออร์ที่ขยายสัญญาณจากเครื่องตรวจจับอิเล็กตรอน ถ้าความเข้มของสัญญาณมากก็จะเป็นจุดสว่างสีขาว หากความเข้มของสัญญาณน้อยลงก็จะเป็นจุดที่มีความสว่างน้อยลงในจอแสดงผล

## 2.8 Air Mass

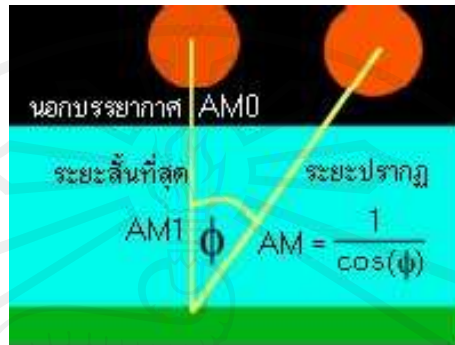
### ค่ามวลอากาศ

มวลอากาศ หรือ Air mass (AM) คือ ระยะที่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านบรรยากาศ โดยกำหนดให้ระยะตั้งฉากจากผิวโลกที่ระดับน้ำทะเลกับดวงอาทิตย์มีค่าเป็น 1 ( $AM = 1$ ) และสามารถหาค่า Air Mass จากสมการ (2.45) [31]

$$AM = \frac{1}{\cos(\phi)} = \sec(\phi) \quad (2.45)$$

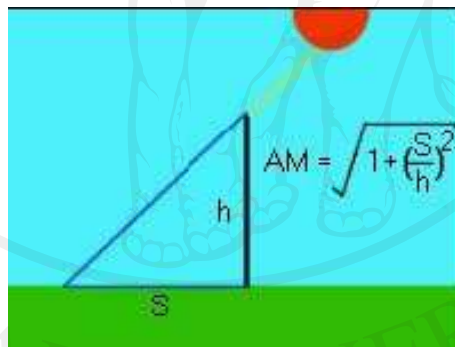
เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางผ่านเข้ามาในบรรยากาศของโลก จะถูกรบกวนโดยบรรยากาศของโลกทั้งการกระเจิง การดูดกลืน และการสะท้อนกลับ เมื่อแสงแดดเดินทางผ่านบรรยากาศเป็นระยะทางมากขึ้น ความเข้มของแสงก็จะลดลงเป็นลำดับ โดยตามทฤษฎีแล้ว จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ส่งผลให้ในวันเดียวกัน เราจะสังเกตความเข้มของแสงแดดเปลี่ยนไป ทั้งนี้ความเข้มของแสงจะมีค่ามากที่สุด เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางฟ้าพอดี เราสามารถบอกลักษณะความเข้มของแสงแดดได้ ตามระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศ โดยค่าความเข้มแสงสูงที่สุดที่สังเกตได้ที่ผิวโลก เรียกว่าค่าอากาศมวล 1 (Air Mass 1 - AM1) ดังนั้น แสงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (ไม่

ผ่านบรรยากาศเลย) จะเรียกว่า ค่าอากาศมวล 0 (AM0) ลักษณะทางเดินแสงผ่านบรรยากาศแสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศ

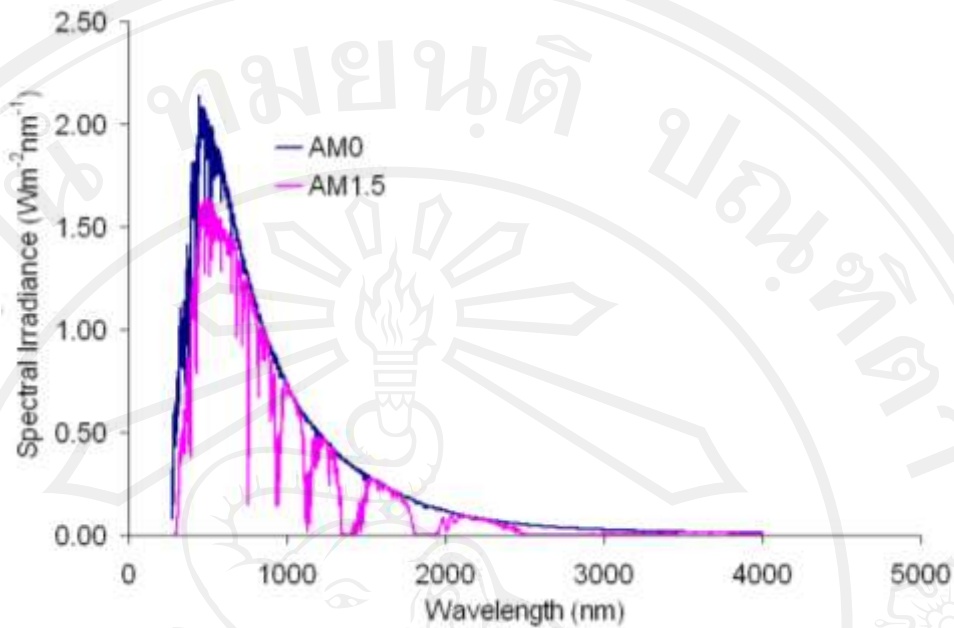
ค่าอากาศมวลมีความสัมพันธ์กับมุมที่แสงอาทิตย์กระทำกับเส้นตั้งฉากที่ผิว ถ้ามุมดังกล่าวคือ  $f$  ค่าอากาศมวลจะมีค่าเท่ากับ  $[\cos(f)]^{-1}$



รูปที่ 2.29 แสดงมุมตกกระทบ

บางครั้ง เราอาจสังเกตค่าอากาศมวลได้ง่ายจากเงาของวัตถุที่ปักตั้งฉากอยู่กับพื้น กล่าวคือเงาของวัตถุจะทอดยาวออกไปขึ้นกับมุมที่รังสีแสงแดดกระทำกับเส้นตั้งฉากนั่นเอง ในกรณีนี้ ค่าอากาศมวลจะหาได้ดังรูปที่ 2.29

สำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นใช้เงื่อนไข AM1.5 ตามที่สมาคมอเมริกันเพื่อการทดสอบวัสดุ (American Society for Testing Materials, ASTM) ได้กำหนดไว้ [32] นั่นคือแสงอาทิตย์ที่ผิวโลกขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งทำมุม  $48.81^\circ$  กับแนวตั้งซึ่งมีการแผ่รังสีดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM0 และ AM1.5 [32]

นอกจากเงื่อนไข AM1.5 แล้วยังมีการกำหนดให้ค่าความเข้มของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  หรือ  $100 \text{ mW/cm}^2$  และมีอุณหภูมิที่  $25^\circ\text{C}$