

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ดวงอาทิตย์และพลังงานจากแสงอาทิตย์ [6]

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ศูนย์กลางของระบบสุริยะ เนื้อสารส่วนใหญ่ของระบบสุริยะอยู่ที่ดวงอาทิตย์ คือ มีมากถึง 99.87% เป็นมวลสารดาวเคราะห์รวมกันน้อยกว่า 0.13% ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับดาวฤกษ์อื่น ๆ บนฟ้า แต่เป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้โลกที่สุด จึงปรากฏเป็นวงกลมโต บนฟ้าของโลกเพียงดวงเดียว ดาวฤกษ์อื่นปรากฏเป็นจุดสว่าง เพราะอยู่ไกลมาก ขนาดที่แท้จริงโตกว่าโลกมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางเกือบ 109 เท่าของโลก ดวงอาทิตย์สร้างพลังงานขึ้นมาเองโดยการเปลี่ยนเนื้อสารเป็นพลังงานตามสมการของไอน์สไตน์ บริเวณที่เนื้อสารกลายเป็นพลังงาน คือ แกนกลาง แกนกลางของดวงอาทิตย์มีระเบิดไฮโดรเจนจำนวนมาก กำลังระเบิดเป็นปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ ที่ไฮโดรเจนหลอมรวมกันกลายเป็นฮีเลียม ที่ผิวของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 5,700 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 6,000 เคลวิน ดวงอาทิตย์จึงถูกจัดเป็นดาวฤกษ์สีเหลือง มีอายุประมาณ 5,000 ล้านปี เป็นดาวฤกษ์หลัก

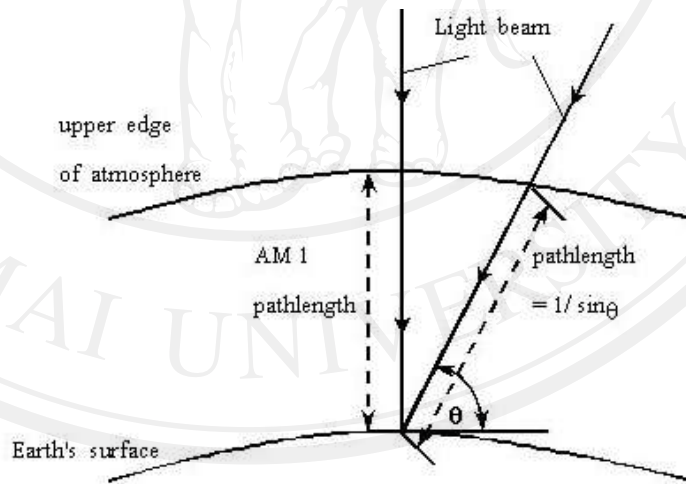
ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลายบนโลกพลังงานจากดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ (thermonuclear reaction) โดยการรวมตัวกันของแก๊สไฮโดรเจนเพื่อกลายเป็นแก๊สฮีเลียม ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้จะลดมวลของดวงอาทิตย์ลงประมาณ 4×10^6 กิโลกรัม/วินาที พร้อมกับมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในอัตรา 3.85×10^{23} กิโลวัตต์/วินาที และพลังงานส่วนนี้จะตกกระทบพื้นผิวโลกในอัตราเพียง 1.79×10^{14} กิโลวัตต์/วินาที นักวิทยาศาสตร์ได้คาดการณ์ว่าอีก 300 ล้านปีข้างหน้าดวงอาทิตย์จะยังคงให้พลังงานแสงออกมาใกล้เคียงกับปัจจุบันหรืออาจกล่าวได้ว่าดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดไป ที่บริเวณผิวของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 5,700 °C และบริเวณใจกลางของดวงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิมากกว่า 10^6 °C แสงอาทิตย์จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 200 - 3,000 นาโนเมตร (nm) ในขณะที่แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลกความเข้มของแสงอาทิตย์จะมีค่าลดลงอันเนื่องมาจาก

- กระบวนการกระเจิง (scattering processes) เกิดเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบกับโมเลกุลของแก๊สและฝุ่นละอองต่างๆ ในชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้เกิดการหักเหทิศทางของแสงอาทิตย์

- กระบวนการดูดกลืน (absorption processes) กระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากภายในชั้นบรรยากาศของโลกประกอบไปด้วยกลุ่มแก๊สต่างๆ มากมาย เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และโอโซน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังมีไอน้ำอีกด้วย สิ่งต่างๆ เหล่านี้สามารถดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่ง เช่น เมื่อแสงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศที่เรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) พลังงานของแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร จะดูดกลืนเกือบหมดนอกจากนี้แล้วสิ่งต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น O_2 N_2 และ O_3 สามารถดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นได้ (ต่ำกว่า 300 นาโนเมตร) ในขณะที่ไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นยาว (มากกว่า 700 นาโนเมตร แต่จะดูดกลืนในบางช่วงความยาวคลื่นเท่านั้น) เป็นต้น ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ลดลงเนื่องจากกระบวนการของการกระจายและการดูดกลืนแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่แสงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศก่อนตกกระทบพื้นผิวโลก ระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศสามารถอธิบายได้ด้วย Air Mass (AM) ดังสมการที่ 2.1

$$AM_n, n = 1/\sin\theta \quad (2.1)$$

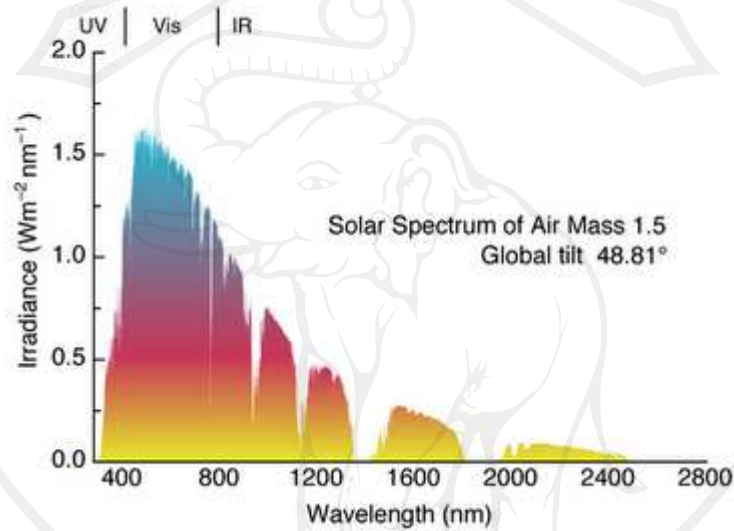
เมื่อ θ คือ มุมระหว่างแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับพื้นผิวโลก ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงทางเดินของแสงเมื่อผ่านเข้ามายังชั้นบรรยากาศของโลก [6]

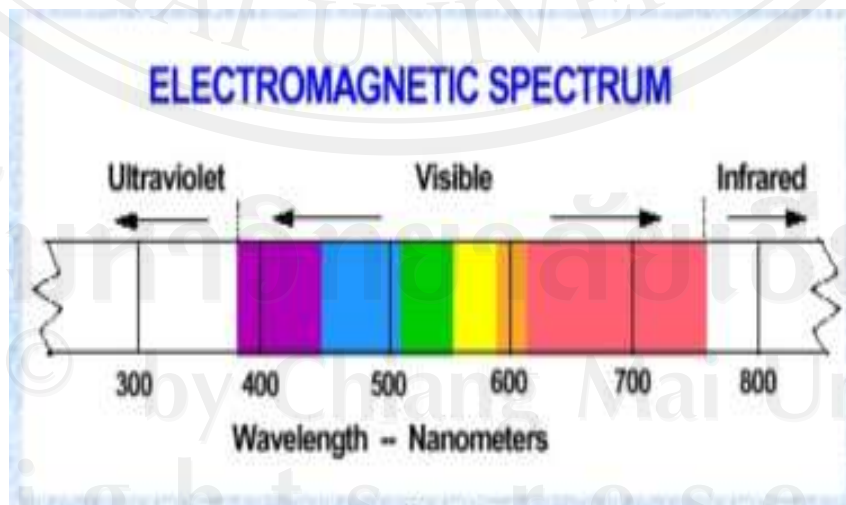
ปริมาณแสงแดดในอวกาศวัดได้มีค่าคงที่เรียกว่า solar constant มีค่าเท่ากับ 1365 W/m^2 เมื่อแสงแดดผ่านชั้นบรรยากาศโลกเกือบ 30% จะสะท้อนกลับไป 20% จะถูกดูดกลืนโดยเมฆ ฝุ่น ก๊าซเรือนกระจก คาร์บอนไดออกไซด์และชั้นโอโซน ปริมาณการกระจายของค่าความยาวคลื่นต่างๆ ที่ใกล้โลกที่สุดแต่ยังไม่แผ่เข้ามาชั้นบรรยากาศเรียกว่าสเปกตรัมมวลอากาศศูนย์ หรือ

AM = 0 (air mass zero) เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะ (เวลาเที่ยงวัน หรือ $\theta = 90^\circ$) แสงอาทิตย์จะเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกเป็นระยะทางที่สั้นที่สุดทำให้ AM1 ในกรณีที่ $\theta = 30^\circ$, $\sin 30^\circ = 1/2$ ได้ค่า AM2 American Society for Testing and Materials (astm) ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มสเปกตรัมของแสง โดยได้ทำการกำหนดในขณะที่อากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มแสงที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $1,000 \text{ W/m}^2$ หรือ 100 mW/cm^2 นั้นเอง ซึ่งเท่ากับ AM 1.5 และได้กำหนดสเปกตรัมแสงมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ASTM กำหนด

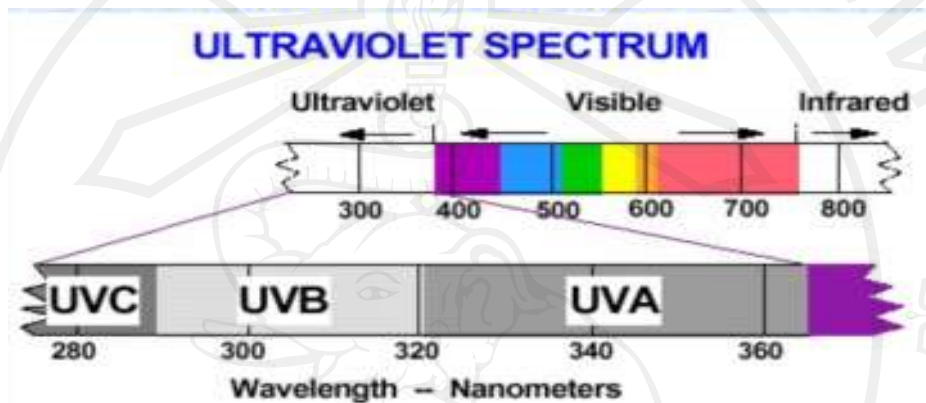
2.1.1 รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) เป็นพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่รังสีออกจากดวงอาทิตย์ ประกอบด้วยสเปกตรัม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แถบกว้างๆ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [8]

2.1.2 ชนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีควมอาทิตย์ประกอบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) รังสีช่วงแสงสว่าง (visible) และอินฟราเรด (infrared) รังสีมีสมบัติตามช่วงคลื่นมักแสดงในหน่วยนาโนเมตร (nanometer, nm = 10^{-9} m) สเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต (solar ultraviolet spectra) ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต [8]

UV-C ช่วงคลื่น 100 - 280 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดโดย โอโซน และออกซิเจนในบรรยากาศ

UV-B ช่วงคลื่น 280 - 315 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนเป็นส่วนใหญ่และส่องถึงพื้นโลกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

UV-A ช่วงคลื่น 315 - 400 นาโนเมตร ไม่ดูดกลืนโดยโอโซน แต่ส่วนมากไม่ทำลายสิ่งมีชีวิต

2.2 แสง [8]

แสงคือการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็นหรือบางครั้งอาจรวมถึงการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีอินฟราเรดถึงรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยสมบัติพื้นฐานของแสง และของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าทุกช่วงคลื่น ได้แก่ ความเข้ม ความสว่างหรือแอมพลิจูด ซึ่งปรากฏแก่สายตามนุษย์ในรูปความสว่างของแสง ความถี่หรือความยาวคลื่น ซึ่งปรากฏแก่สายตามนุษย์ในรูปสีของแสง และ โพลาริเซชันมุมการสั่นของคลื่นซึ่งโดยปกติมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ แสงจะแสดงสมบัติทั้งของคลื่นและของอนุภาคในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค ธรรมชาติที่แท้จริงของแสงเป็นปัญหาหลักปัญหาหนึ่งของฟิสิกส์สมัยใหม่แสงมีสมบัติทวิภาวะกล่าวคือ แสงเป็นคลื่น แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กตั้ง

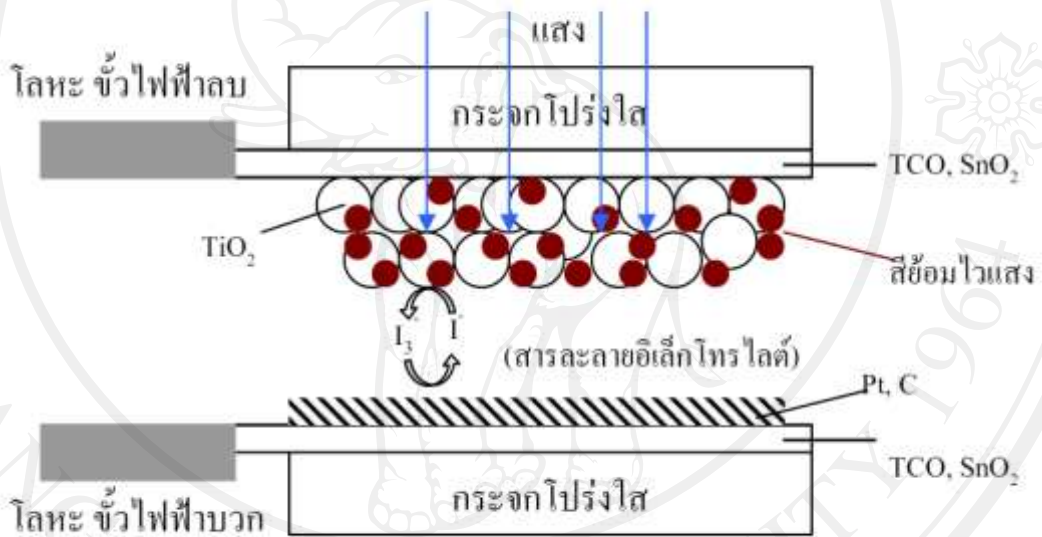
จากกับระนาบการสั้นของสนามไฟฟ้าและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และ แสงเป็นอนุภาค เป็นก้อนพลังงานมีค่าพลังงาน

$$E = hf \quad (2.2)$$

โดยที่ h คือค่าคงตัวของพลังค์ และ f คือความถี่ของแสง เรียก อนุภาคแสงว่าโฟตอน

2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยมีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ DSSCs [9]

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมี ดังนี้

1. กระจกนำไฟฟ้า (Transparent Conductive Oxide Glass: TCO Glass)

กระจกใสนำไฟฟ้า เป็นกระจกโปร่งใสที่ถูกเคลือบด้วย Indium-doped Tin Oxide (ITO) หรือ Fluorine-doped Tin Oxide (FTO)

2. ชั้นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor layer)

เป็นสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (metal-oxide semiconductor) ที่มีช่องว่างแถบพลังงานสูง (wide band-gap) มีลักษณะเป็นรูพรุน (porous) สูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น ทำให้เม็ดสี

ย้อมสามารถเข้าไปเกาะที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นำมาศึกษากันอย่างแพร่หลาย คือ TiO_2 , ZnO และ Nb_2O_5 เป็นต้น

3. สีย้อม (Dye)

สีย้อมควรมีสมบัติในการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็นและเพื่อให้การดูดกลืนแสงอาทิตย์ของสีย้อม (dye) มีประสิทธิภาพมากที่สุดดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ต้องไม่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็น ทำให้ต้องเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีช่วงแถบพลังงานกว้าง (>3 eV) และขอบล่างของแถบการนำ (conduction band edge) ต้องต่ำกว่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นของสีย้อม เพื่อให้สามารถเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากสีย้อมไปยังสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เป็นสารที่ยึดเกาะอยู่กับอนุภาคสารกึ่งตัวนำด้วยพันธะ $-\text{OH}$ หรือ $=\text{O}$ ซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์และทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกไป ตัวอย่างสีย้อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ruthenium, Eosin-Y หรือ pigment ในพืช เช่น chlorophyll และ anthocyanin เป็นต้น

4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เดินทางมาจากวงจรภายนอกให้กลับคืนสู่โมเลกุลของสีย้อม

5. แพลทินัม (Platinum)

เป็นโลหะที่เคลือบบนกระจก FCO ที่ขั้วแคโทด ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นและลดศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไปในปฏิกิริยา Triiodide กับ Iodide ($\text{I}_3^- + 2e^- \rightarrow 3\text{I}^-$) [9]

หลักการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม

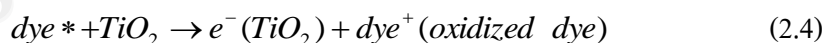
1. การดูดกลืนพลังงานแสง

เมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงจะดูดกลืนพลังงานแสงไว้เพื่อใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้น HOMO (highest occupied molecular orbital) ไปยังชั้น LUMO (lowest unoccupied molecular orbital)



2. อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น

อิเล็กตรอนสถานะกระตุ้น (dye^*) ที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อมในชั้น LUMO ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (conduction band) จะย้ายไปอยู่บนแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เราเรียกขั้นตอนนี้ว่า electron injection

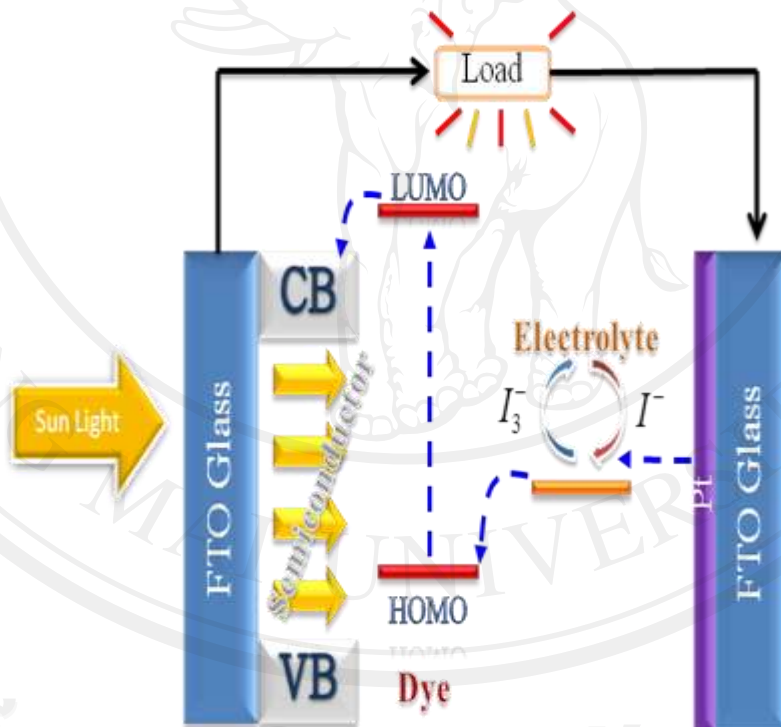
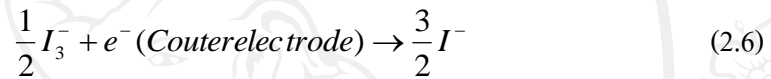
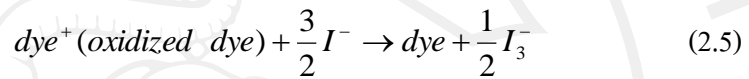


3. อิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่

อิเล็กตรอนที่มาจากชั้น LUMO จะเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำออกสู่วงจรรภายนอกผ่านทางขั้วไฟโตอิเล็กโทรดเกิดการสูญเสียพลังงานให้แก่วงจรรภายนอก หลังจากนั้นกลับคืนสู่เซลล์ผ่านทางขั้วแคโทดรีดอกซ์ (ขั้วที่กระจกนาไฟฟ้าเคลือบด้วย Pt)

4. อิเล็กตรอนคืนสภาพ

อิเล็กตรอนกลับสู่โมเลกุลของสีย้อม โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ในอิเล็กโทรไลต์ และเรียกขั้นตอนนี้ว่า Dye regeneration [10] ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดจะเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



HOMO = Highest Occupied Molecular Orbital LUMO = Lowest Unoccupied Molecular Orbital

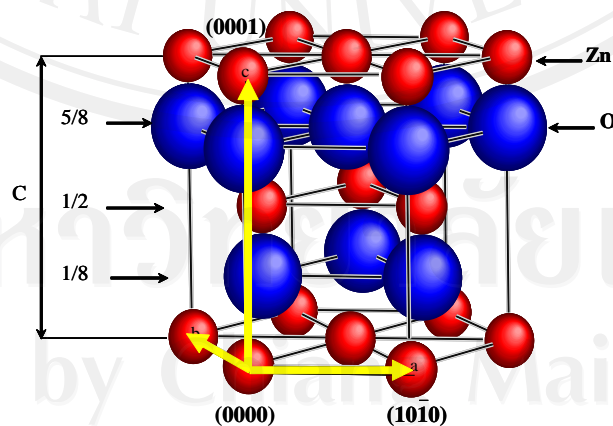
รูปที่ 2.6 กลไกการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ DSSCs

2.4 สมบัติของซิงก์ออกไซด์ (ZnO)

ZnO เป็นสารที่น่าศึกษาเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจาก ZnO เป็นสารที่ถูกใช้ในชีวิตประจำวันของใครหลายคน โดยไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายไม่ว่าจะเป็นแป้งทาหน้าหรือครีมกันแดด ซึ่งล้วนแล้วแต่มี ZnO เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในทางฟิสิกส์นิยามสารกึ่งตัวนำว่าเป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0\text{ K}$) เนื่องจากประจุทั้งหมดอยู่ในแถบวาเลนซ์ (valence band, VB) จึงไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบการนำ (conduction band, CB) เลย แต่ที่อุณหภูมิ $T>0\text{ K}$ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจาก VB ขึ้นไปอยู่ที่ชั้น CB ได้ จึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ในสาร ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่อุณหภูมิห้อง

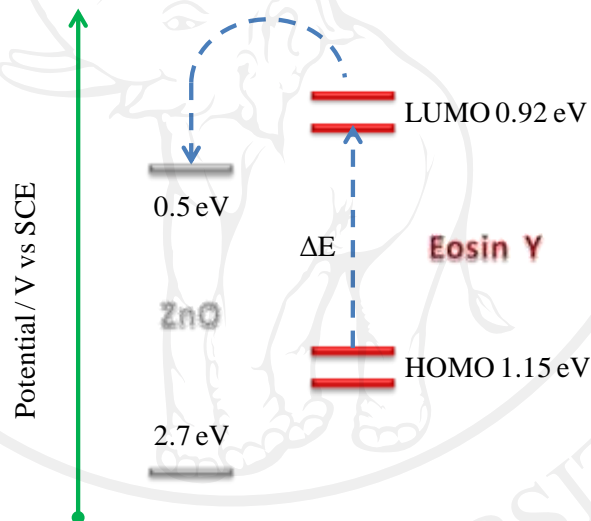
ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่มที่มีช่องว่างของแถบพลังงานกว้าง (wide band gap semiconductor) ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.3 eV ที่อุณหภูมิห้องและประมาณ 3.44 eV ที่อุณหภูมิ 4 K นอกจากนี้ยังมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบ direct band gap และมีโครงสร้างเป็นแบบ Wurtzite hexagonal structure ที่มีค่าแลตทิซ (Lattice Constant) $a = b = 3.24982\text{ \AA}$ และ $c = 5.20661\text{ \AA}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีค่ามวลยังผล (effective mass) $0.24m_0$ และ $0.59m_0$ สำหรับอิเล็กตรอนและโฮล (hole) ตามลำดับ ค่าสภาพคล่องในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron mobility) อยู่ระหว่าง $100\text{-}200\text{ cm}^2/\text{V}$ และค่าสภาพคล่องในการเคลื่อนที่ของโฮล (Hole Mobility) มีค่า $180\text{ cm}^2/\text{V}$



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้าง Wurtzite hexagonal ของ ZnO [10]

2.5 ตัวรับแสง (photo sensitizer)

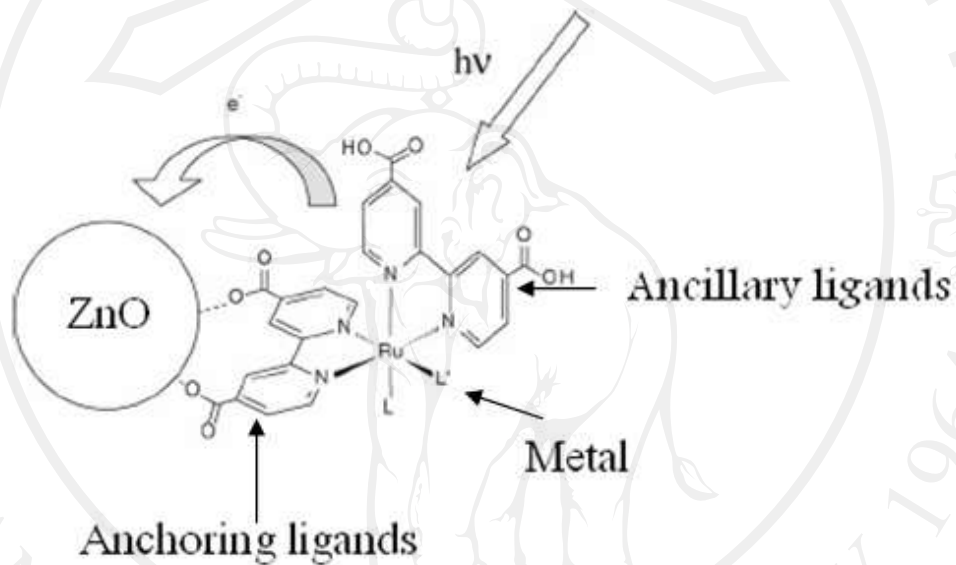
สีย้อมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม เนื่องจากสีย้อมมีหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ซึ่งเมื่อสีย้อมได้รับพลังงานแสง โมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ในชั้น HOMO จะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ที่ชั้น LUMO หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในชั้น LUMO จะถูกฉีดเข้าไปในชั้นแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในการเลือกสีย้อมจำเป็นต้องเลือกสีย้อมที่เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ซึ่งสีย้อมต้องมีระดับพลังงาน LUMO สูงกว่าระดับแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [11]



รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระดับพลังงานของ Dye และแถบนำไฟฟ้าของ ZnO [11]

ใน DSSCs มีสีย้อมไวแสงหลายกลุ่มที่นำมาใช้ เช่น กลุ่มสีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน (porphyrin) [12] เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (transition metal complexes) เช่น รูทีเนียมกับลิแกนด์โพลี-ไพริดีนและกลุ่มสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ (organic dye) [9] เป็นต้น แต่ที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือกลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (transition metal complexes) ซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขป ดังนี้

สีย้อมไวแสงในกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ เป็นสารที่มีโลหะเชิงซ้อน เป็นแกนของโครงสร้าง โดยส่วนมากจะเป็นจำพวกโลหะทรานซิชัน ข้อดีของตัวสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ คือมีช่วงในการรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่กว้าง สามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้ดี แต่มีข้อเสียคือ สันเคราะห์ยาก และราคาสูง ปกติจะประกอบด้วย anchoring ligands และ ancillary ligands โดยที่ anchoring ligands มีหน้าที่ในการยึดเกาะกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ แต่ ancillary ligands จะไม่สามารถจับกับสารกึ่งตัวนำได้แต่จะสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติของตัวรับแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

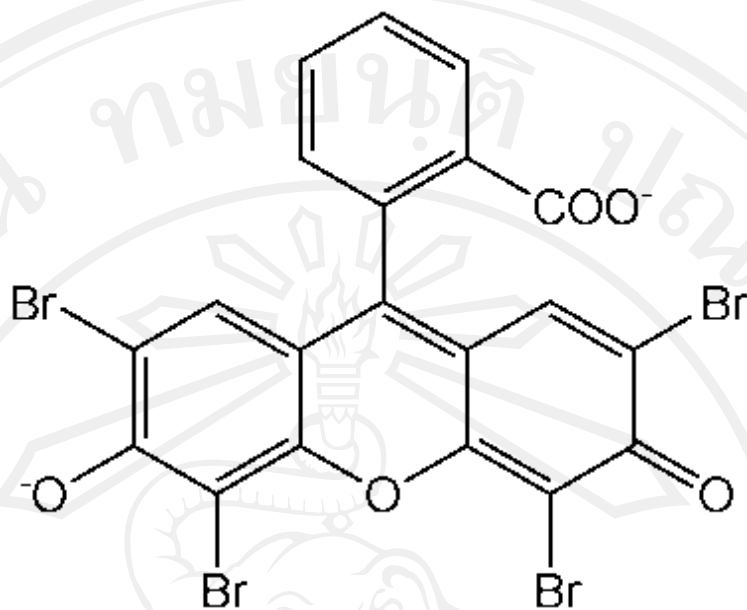


รูปที่ 2.9 การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและสีย้อมไวแสง [13]

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ (organic dye) ที่สกัดได้จากพืชธรรมชาติ และเลือก Eosin - Y เป็นตัวเปรียบเทียบใน DSSCs ที่มี ZnO เป็นฐานซึ่งมีรายละเอียดของสีย้อมที่นำมาใช้ในงานวิจัย ดังนี้

2.5.1 อีโอสินาย (Eosin Y)

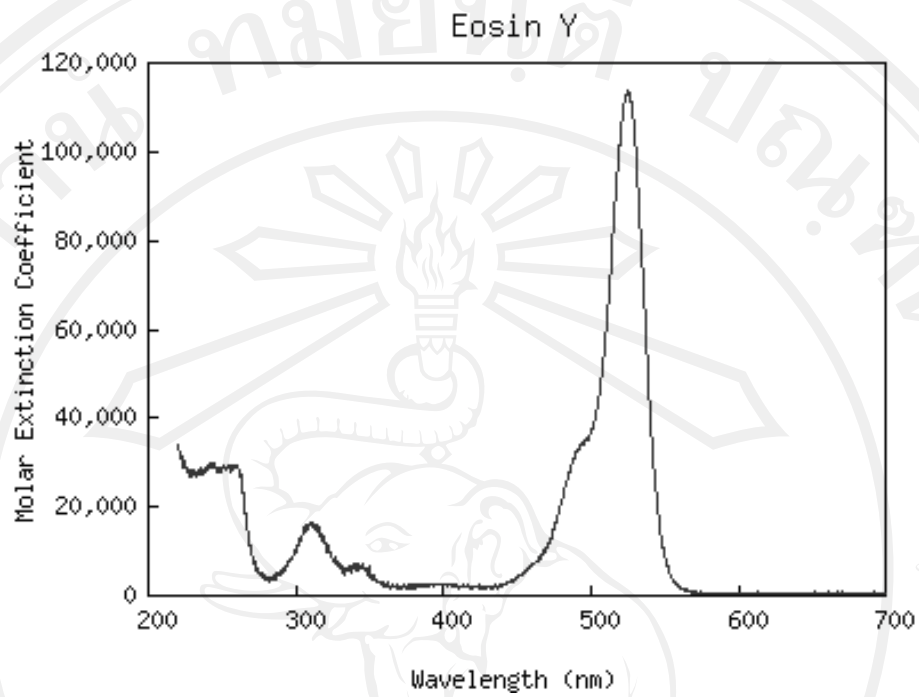
Eosin Y จัดเป็นสีย้อมไวแสงจำพวกสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างของสารไฮโดรคาร์บอน เกาะกับโบรมีน ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงดังรูปที่ 2.10 และมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดย Eosin-Y สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 527 nm ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ Eosin-Y [10]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ Eosin-Y [10]

Common name	Eosin Y
Other names	Eosin Yellowish Bromoeosine Tetrabromofluorescein
C.I. number	45380
C.I. name	Acid red 87
Class	Fluorone
Ionization	Acid
Solubility aqueous	40%
Solubility ethanol	2%
Absorption maximum	527
Color	Red
Empirical formula	$C_{20}H_8O_5Br_4$
Formula weight	691.9



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมดูดกลืนของสารละลาย Eosin-Y [14]

2.5.2 Xanthone สารสกัดจากเปลือกมังคุด

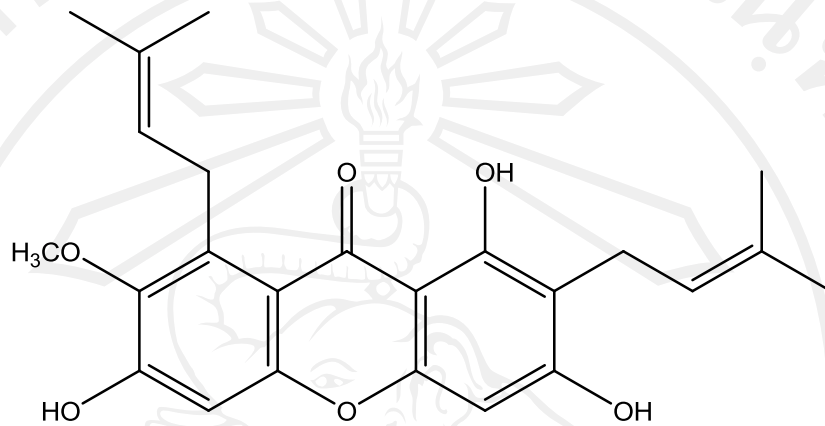
ลักษณะของมังคุดแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 มังคุด [15]

ชื่อสามัญ Mangosteen
 ชื่อวิทยาศาสตร์ *Garcinia mangostana* Linn
 วงศ์ CLUSIACEAE

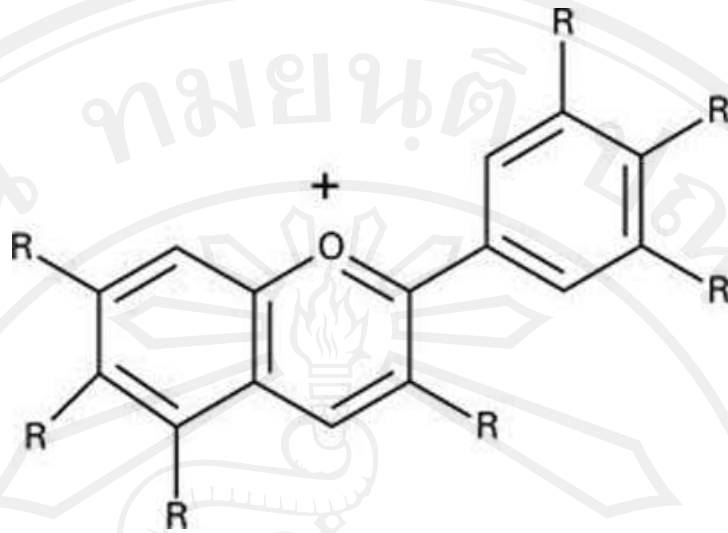
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สาร Xanthone 2 ชนิด ได้แก่ SS-DW01 เป็นสารสกัดมังคุดที่มีปริมาณสารแซนโทนไม่น้อยกว่า 30 ชนิด ไม่ละลายน้ำ SS-DW04 เป็นสารบริสุทธิ์แซนโทน alpha - mangostin ซึ่งเป็นแซนโทนหลักของมังคุด ซึ่งมีโครงสร้างหลัก ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างหลักของสาร Xanthone [15]

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สนใจได้สนใจที่จะค้นหาพืชที่จะนำมาสกัดเป็นสีข้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงจากพืชท้องถิ่นของประเทศไทยในกลุ่มของพืชที่มีสารแอนโทไซยานิน เป็นส่วนประกอบเพราะจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาในบทที่ 1 นั้นว่าแอนโทไซยานินมีความสามารถในการยึดเกาะกับสารกึ่งตัวนำออกไซด์ที่เกิดจากหมู่คาร์บอนิลและไฮดรอกซิล ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ดีขึ้น

สาร Anthocyanin (แอนโทไซยานิน) มีชื่อย่อมาจากรากศัพท์เดิมของกรีกคือ anthos แปลว่าดอกไม้ และ kyanos แปลว่าสีน้ำเงิน แอนโทไซยานินจึงแปลว่าดอกไม้สีน้ำเงิน แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ (water-soluble pigment) จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นสารที่มีสีตั้งแต่สีน้ำเงินเข้มในสภาพจะเป็นด่าง (pH>7) มีสีม่วงเมื่อเป็นกลาง (pH 7) และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงถึงส้มได้ในสภาพเป็นกรด (pH<7) เป็นสารสีที่พบได้ทั่วไปในดอกไม้ ผลไม้บางชนิด ใบหรือลำต้นของพืชบางชนิดที่มีสีจัด โดยสารแอนโทไซยานินมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Anthocyanin [16]

ในงานวิจัยนี้ได้ผู้วิจัยได้ใช้พืชที่มีแอนโทไซยานิน โดยสกัดจากพืชท้องถิ่นของประเทศไทยจาก ผลของลูกผักปริง ลูกกระดุกอึ้ง และลูกหม่อนดังแสดง ดังรูปที่ 2.15 - 2.17

2.5.3 ผักปริง [17]



รูปที่ 2.15 ผักปริง

ชื่อสามัญ East Indian Spinach, Malabar Nightshade, Indian Spinach
 ชื่อวิทยาศาสตร์ *Basella rubra* Linn.
 วงศ์ BASELLACEAE

2.5.4 กระจูดอึ้ง [18]



รูปที่ 2.16 กระจูดอึ้ง

ชื่อท้องถิ่น กระจูดอึ้ง แกลบหนู

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Dicerma biarticulatum* (L.) DC.

วงศ์ PAPILIONOIDEAE

2.5.5 หม่อน [19]



รูปที่ 2.17 หม่อน

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Morus alba* L.

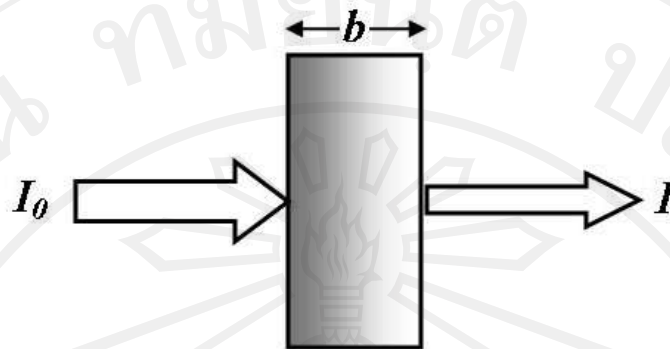
วงศ์ MORACEAE

2.6 อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-visible spectroscopy, UV-vis spectroscopy) [20]

UV-vis spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารอินทรีย์ ซึ่งในปัจจุบันเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้กลายมาเป็นเครื่องมือในวิเคราะห์ที่สำคัญที่ใช้ปัจจุบัน เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย ประยุกต์ใช้ได้กว้าง มีความรวดเร็ว และมีความแม่นยำสูง อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูงอีกด้วย

เทคนิคนี้เลือกใช้แสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (ความยาวคลื่น 10-380 nm) และช่วงที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 380-700 nm) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์ โดยอาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสง เริ่มจากเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะสามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ ข้อมูลที่ได้จากช่วงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet, UV) และช่วงที่ตามองเห็น (visible) นั้นอาจใช้ในการช่วยยืนยันข้อมูลที่ได้จากช่วงอินฟราเรด (infrared, IR) หรือข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นที่ต่างกันแต่จะไม่สามารถใช้ระบุชนิดของสารได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นเทคนิคนี้ในการใช้เกือบทั้งหมดจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ในการหาปริมาณสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ในตัวอย่างต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารละลาย [21]

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต (beer-lambert's law) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า กฎของเบียร์ ซึ่งมีใจความดังนี้ “สัดส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวที่ถูกดูดกลืนโดยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน จะเป็น exponential function ของความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนรังสีและความยาวของเส้นทางที่รังสีผ่านสารตัวอย่าง” หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อผ่านลำแสงที่มีความเข้ม I_0 ไปยังเนื้อสารที่มีความหนา b cm โฟตอนของคลื่นแสงจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลของสารทำให้ความเข้มของคลื่นแสงลดลงจาก I_0 เป็น I (I เป็นพลังงานของคลื่นแสงที่เหลือออกมา) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ทิศทางของแสงที่ทะลุผ่านสาร [21]

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.7)$$

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon b C \quad (2.8)$$

- เมื่อ
- A คือ absorbance หรือ optical density
 - T คือ ค่าการส่งผ่านแสงของสาร (transmittance)
 - I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (intensity of transmitted light)
 - I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (intensity of incident light)
 - b คือ ความหนาของสารละลาย หน่วยเป็น cm (path length of sample)
 - C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วยเป็น mol/dm^3 หรือ mol/L หรือ molar

ϵ คือ molar absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุล คำนี้อาจจะระบุว่า สารแต่ละตัวมีพื้นที่ที่จะดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยต่อ 1 mol

การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (electron transition) จะมีค่า ϵ อยู่ในช่วง $0-10^6$ ถ้า ϵ มีค่าตั้งแต่ 10^4 ขึ้นไป หมายความว่าสารประเภทนั้นมีค่าความเข้มของรังสีที่ดูดกลืนอยู่ในระดับที่สูง (strong absorption) และถ้า ϵ มีค่าต่ำกว่า 10^4 จัดว่าสารประเภทนั้นมีค่าความเข้มที่รังสีที่ดูดกลืนอยู่ในระดับปานกลาง (medium absorption) แต่ถ้า ϵ มีค่าต่ำกว่า $10-100$ จัดว่าสารนั้นมีค่าความเข้มที่รังสีดูดกลืนอยู่ในระดับที่น้อย (weak absorption) (หมายเหตุ สำหรับ forbidden transition จะมีค่า ϵ อยู่ระหว่าง $100-1000$)

เนื่องจาก spectrophotometer อาจจะวัดค่าออกมาเป็น absorbance (abs) หรือ transmittance (%T) จึงอาจใช้สมการต่อไปนี้คำนวณกลับไป - มาได้ ดังนี้กำหนดให้

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{2.9}$$

และ %T เท่ากับ

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \tag{2.10}$$

ดังนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \log \frac{1}{T} = \epsilon b C \tag{2.11}$$

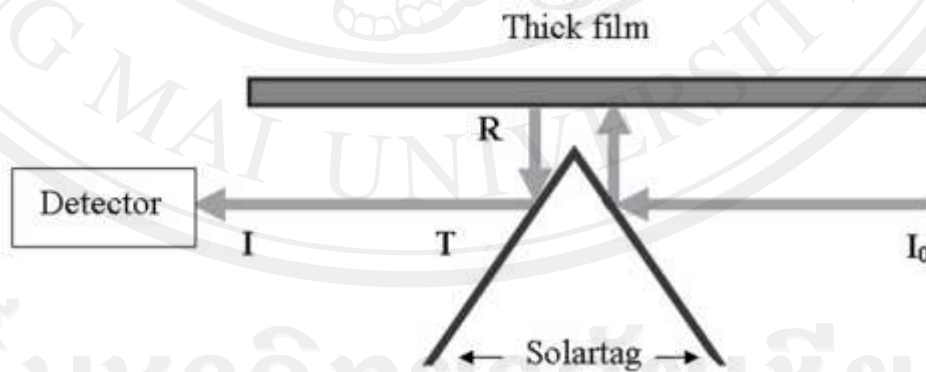
หาก A เปลี่ยนค่าจาก ∞ ถึง 0 ส่วน T จะเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 1 และ %T จะเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 100 เราเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Abs และ %T ได้เป็น

$$A = \log \frac{100}{\%T} \tag{2.12}$$

และ

$$\%A = 100 - \%T \tag{2.13}$$

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นฟิล์มที่หนามากจนแสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ จะใช้การวัด ร้อยละของแสงที่สะท้อนออกจากสารตัวอย่าง โดยพิจารณา ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงเส้นทางเดินของแสง เมื่อวัดฟิล์มแบบร้อยละการสะท้อน เครื่องจะวัดด้วยค่า transmittance ของความเข้มแสงเริ่มต้นและสุดท้ายเท่านั้น [21]

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{2.14}$$

สำหรับแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับจะสามารถวัดเป็นค่า reflectance ส่วนแสงที่ทะลุฟิล์มออกไปจะสามารถวัดเป็นค่า transmittance ได้และแสงที่ดูดกลืนไปโดยฟิล์มตัวอย่างจะสามารถวัดเป็นค่า absorption ได้

$$R + T + A = 1 \quad (2.15)$$

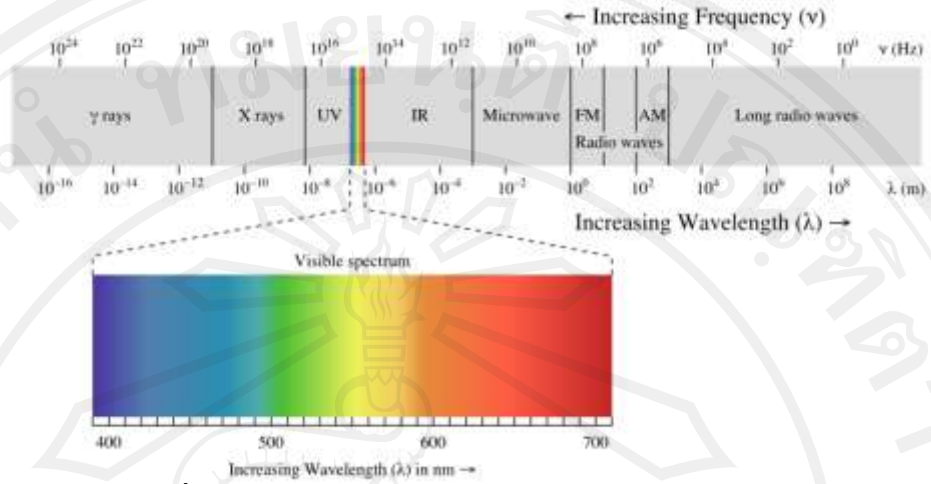
ค่า reflectance ของฟิล์มตัวอย่างจะหมายถึงค่า transmittance ที่เครื่องวัดได้ ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Abs.} &= -\log R \\ &= -\log \left(\frac{I}{I_0} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

ดังนั้นสามารถแปลงค่า %R เป็นค่า absorbance ได้โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\text{Abs.} = -\log (\%R/100) \quad (2.17)$$

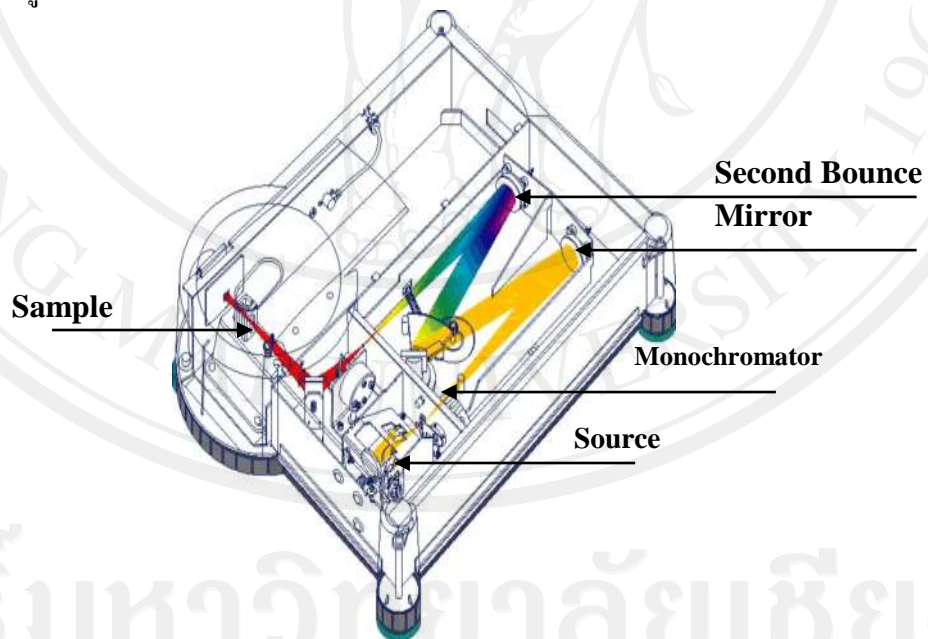
UV-vis Spectroscopy เป็นการวัดพลังงานที่ถูกดูดกลืนเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เลื่อนระดับชั้นพลังงานไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (electronic transition) เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์การกระตุ้นอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งจึงเรียก UV-vis spectroscopy ว่า electronic spectroscopy ปกติช่วง UV จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10-380 nm แต่การวิเคราะห์โดยเครื่อง UV spectrum จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200 - 380 nm ซึ่งเรียกว่า "near - ultraviolet region" ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm อากาศจะดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ จึงต้องวัดสเปกตรัมภายใต้สุญญากาศ เราจึงเรียกความยาวคลื่นของ UV ในช่วงนี้ว่า "vacuum-ultraviolet region" ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือเรียกว่า "visible region" จะเป็นสเปกตรัมในช่วงประมาณ 380-780 nm ซึ่งจะปรากฏเป็นสีต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดง electromagnetic spectrum [22]

2.6.1 ส่วนประกอบของ UV-vis spectrophotometer

UV-vis spectrophotometer มีอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอยู่หลายอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของเครื่อง Cary 50 UV-vis spectrophotometer [23]

2.6.1.1 แหล่งกำเนิดรังสี (Source)

แหล่งกำเนิดรังสีใน UV-vis spectrophotometer ที่นิยมใช้กันแพร่หลายได้แก่

1. หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุด ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360 nm มีทั้งประเภทใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 volts) และประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 volts) หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูงจนถึงความยาวคลื่นประมาณ 360 nm หลังจากนั้นความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว
2. หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสุญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง UV ใกล้ ช่วงแสงที่แลเห็นได้จนถึงช่วง IR

2.6.1.2 โมโนโครเมเตอร์ (monochromator)

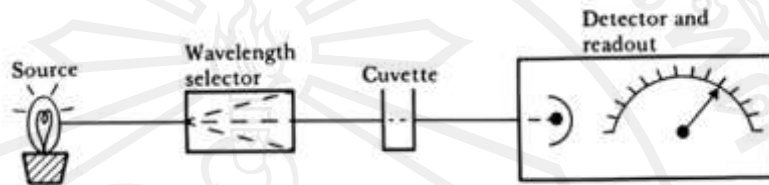
เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของ UV-vis spectrophotometer ซึ่งทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องให้ออกมาเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียว ในช่วงแสงที่ตามองเห็นอาจใช้ปริซึมแก้ว ส่วนในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์ สำหรับ UV-vis spectrophotometer ที่มีราคาแพง มักใช้ monochromator แบบ diffraction grating ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีร่องเป็นจำนวนมากและความกว้างของร่องใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี

2.6.1.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (recorder)

หลังจากที่ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารที่ต้องการวัดการดูดกลืนแล้ว ลำรังสีจะไปที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งจะให้ข้อมูลการดูดกลืนออกมา สำหรับ UV-vis spectrophotometer ที่มีราคาถูก ข้อมูลนี้จะปรากฏออกมาในรูปการบ่ายเบนของเข็มบนหน้าปัดมิเตอร์ หรือปรากฏเป็นตัวเลขก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้สำหรับแต่ละความยาวคลื่นในกระดาษกราฟเส้นที่เชื่อมจุดต่าง ๆ ก็คือสเปกตรัมนั่นเอง สำหรับ UV-vis spectrophotometer ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นเองโดยอัตโนมัติ จะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอยู่ด้วย สามารถบันทึกออกมาเป็นสเปกตรัมได้โดยตรงซึ่ง UV-vis spectrophotometer ชนิดนี้มีราคาแพง

2.6.1.4 เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง

เนื่องจากแก้วธรรมดาดูดกลืนรังสีในช่วง UV จึงจำเป็นต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยควอตซ์แทน เพื่อลดการดูดกลืนรังสีในช่วงดังกล่าว ซึ่งแผนผังทางเดินของรังสีเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.22

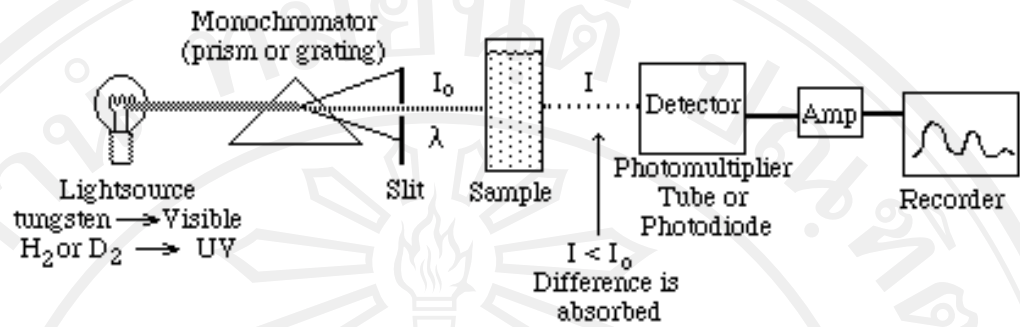


รูปที่ 2.22 แสดง block diagram of a spectrophotometer [21]

2.6.2 ประเภทของ UV-vis spectrophotometer

2.6.2.1 single-beam spectrophotometer

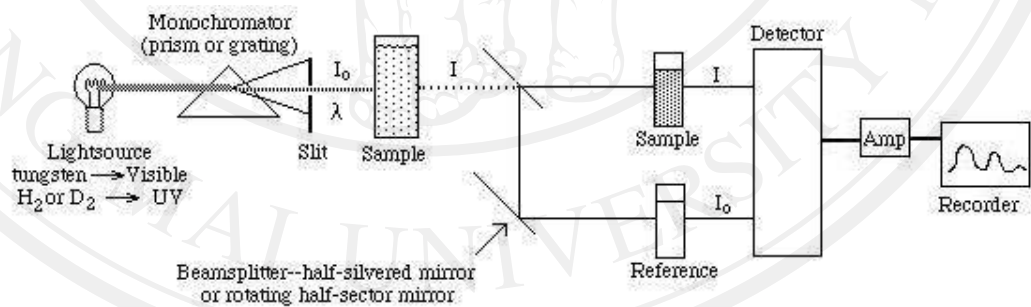
รูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นถึงทางเดินของรังสีใน spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว สามารถวัดสเปกตรัมทั้งในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตาเรามองเห็น เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสี ซึ่งอาจจะเป็นหลอดควิที่เรียมหรือหลอดทังสเตน จะถูกคัดเลือกค่าความยาวคลื่นโดยผ่านปริซึมหรือเกรตติง monochromator จากนั้นลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จะผ่านเข้าสู่สารตัวอย่างแล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ ตลอดเส้นทางของลำรังสีนี้มีลำรังสีเพียงลำเดียว จึงเรียก spectrophotometer ประเภทนี้ว่าแบบลำรังสีเดี่ยว เนื่องจาก spectrophotometer ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจาก monochromator ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะไปสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน เซลล์แรกจะบรรจุตัวทำละลายบริสุทธิ์ ส่วนเซลล์หลังบรรจุสารละลายที่ต้องการวัด ทุกครั้งที่วัดต้องให้รังสีผ่านเซลล์แรก เพื่อปรับค่าการดูดกลืนให้เท่ากับศูนย์แล้วจึงให้ลำรังสีผ่านเซลล์ ข้อมูลความแตกต่างระหว่างการดูดกลืนรังสีของทั้ง 2 จะถูกนำไปวิเคราะห์และบันทึกเป็นสเปกตรัม



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพแสดงทางเดินของรังสีใน spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว [21]

2.6.2.2 Double-Beam Spectrophotometer

spectrophotometer แบบลำแสงคู่ซึ่งใช้ monochromator แบบ doublepass ลำรังสีจากแหล่งกำเนิด (light source) จะถูกแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากับลำรังสีหนึ่งผ่านลงไปในเซลล์ที่บรรจุสารละลายของสารอินทรีย์ที่เรียกว่าเซลล์ตัวอย่าง (sample cell) อีกลำรังสีหนึ่งจะผ่านลงไปเซลล์ที่บรรจุตัวทำละลายบริสุทธิ์ไว้ที่เรียกว่าเซลล์อ้างอิง (reference cell) ความเข้มของลำรังสีทั้งสองที่ผ่านออกจากเซลล์จะถูกเปรียบเทียบเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องบันทึกจะเปลี่ยนสัญญาณออกมาเป็นสเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพแสดงทางเดินของรังสีใน spectrophotometer แบบลำแสงคู่ [21]

2.7 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่ออิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกเคลื่อนที่กลับคืนสู่เซลล์ผ่านทาง counterelectrode ซึ่งเชื่อมกับวงจรภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลรวมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของสองขั้วไฟฟ้า

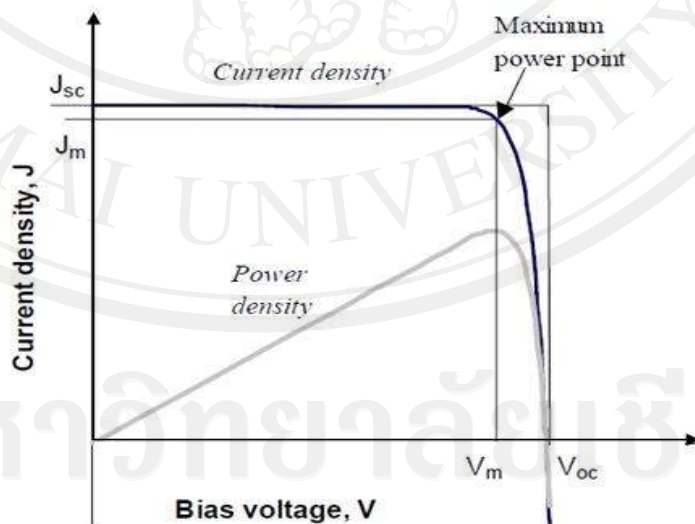
$$J_{sc} = J_P + J_D \quad (2.18)$$

เมื่อ J_P คือ photo-generated current density (mA/cm^2)

J_D คือ dark current density (mA/cm^2)

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเป็น J_{sc} เป็นค่าที่ได้มาจากเงื่อนไขของ short circuit ซึ่ง $\Delta E = V = 0$ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ J - V (current-voltage) ภายใต้แสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.25 ค่า V_{oc} เป็นค่าปฏิภาคกับพลังงานที่แตกต่างระหว่างระดับพลังงาน Fermi ของสารกึ่งตัวนำและระดับพลังงานของ electrolyte redox couple ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ค่า $J_{max} \cdot V_{max}$ มาจากจุดที่ทำให้เกิด P สูงที่สุด ค่ากำลังสูงสุดที่สามารถคำนวณได้คือ $P_{max} = J_{max} \times V_{max}$ ซึ่งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.25 จากจุดที่มีกำลังสูงสุด ค่า fill factor (FF) สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.19

$$FF = \frac{J_{max} \cdot V_{max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.19)$$



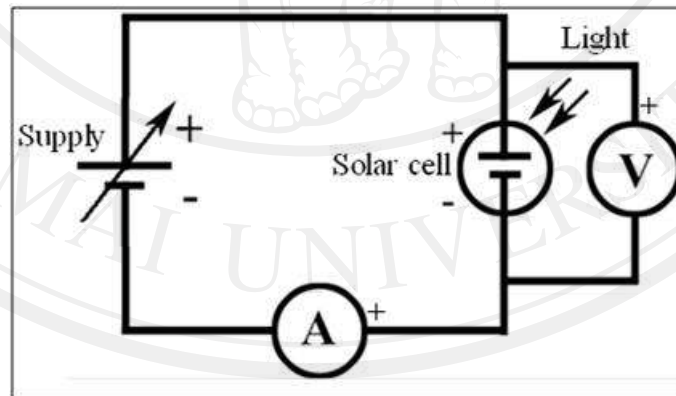
รูปที่ 2.25 กราฟ J - V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง [25]

ประสิทธิภาพ (η) ของการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20 ดังนี้

$$\eta(\%) = \frac{J_{\max} V_{\max}}{P_{in}} \times 100 = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100 \quad (2.20)$$

โดย P_{in} คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์
 J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
 V_{oc} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
 J_{\max} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
 V_{\max} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
 FF คือ ค่า fill factor ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ขั้วอมไวแสง

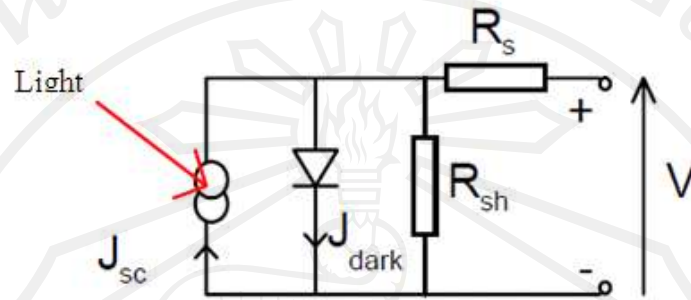
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ขั้วอมไวแสงภายใต้เงื่อนไข air mass 1.5 (AM 1.5) โดยมีความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2 หรือ 1000 W/m^2 ตกกระทบบนตั้งฉากกับระนาบของเซลล์ ซึ่งสามารถวัดค่า J และ V ตามวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรการวัดการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ขั้วอมไวแสง [25]

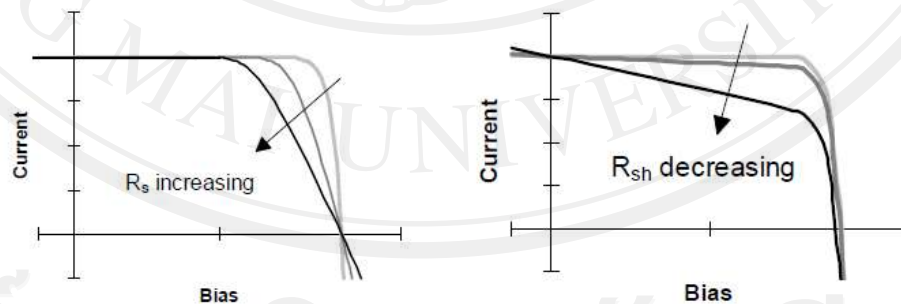
ในความเป็นจริงแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ขั้วอมไวแสงจะมีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสี่ขั้วอมไวแสงและการสูญเสียของกระแสอิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ [25] เป็นต้น ดังนั้นเราควรพิจารณาความ

ต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนัณฑ์ (R_{sh}) ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังวงจรในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [25]

สำหรับ R_s นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากสารแต่ละชนิดมีค่าสภาพการนำกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยเฉพาะที่ผิวของสารนั้นและเกิดขึ้นเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของสาร โดยความต้านทานนี้จะมีผลกระทบอย่างมากต่อเซลล์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูง สำหรับ R_{sh} นั้นเกิดจากการสูญเสียกระแสให้แก่ขั้วไฟฟ้าและบริเวณรอยต่อของสารที่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นทั้ง R_s และ R_{sh} มีผลทำให้ค่า FF ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.28 สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียค่า R_s น้อยๆ และมีค่า R_{sh} มากๆ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า FF มาก



รูปที่ 2.28 แสดงผลของ R_s และ R_{sh} ต่อ J-V characteristic [25]

2.8 เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซียมไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy : EIS) [26]

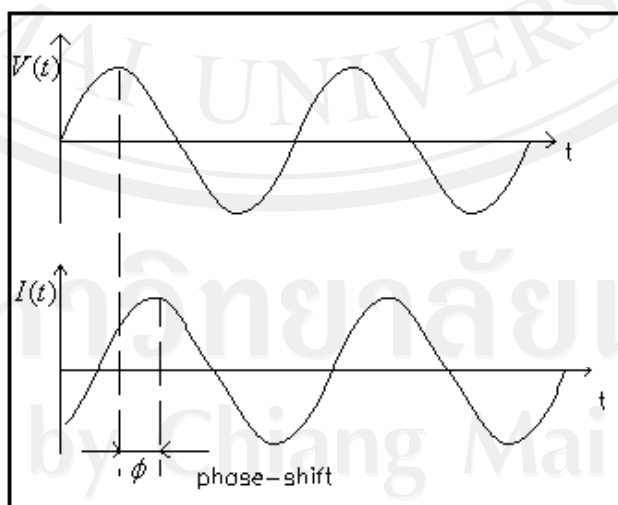
Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) หรือวิธีการวัดความต้านทานในไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เริ่มแรกจะใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า แต่ต่อมาใช้วิเคราะห์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และรอยต่อของผิวต่างๆ การวัด EIS จะวัดภายใต้การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแอมพลิจูดน้อยๆ เข้าไป การวัดจะวัดออกมาที่ความถี่ต่างๆของไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal potential) มากระทำกับสารหนึ่ง จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเป็นฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal current) แต่จะมีเฟสที่ต่างกับศักย์ไฟฟ้า ดังสมการ (2.21) และสมการ (2.22) รูปที่ 2.29

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t) \quad (2.21)$$

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (2.22)$$

เมื่อ	$V(t)$	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เวลา t ใดๆ
	V_0	คือ แอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า
	$I(t)$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t ใดๆ
	I_0	คือ แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้า
	ω	คือ อัตราเร็วเชิงมุม
	ϕ	คือ ความต่างเฟส
	t	คือ เวลาใดๆ



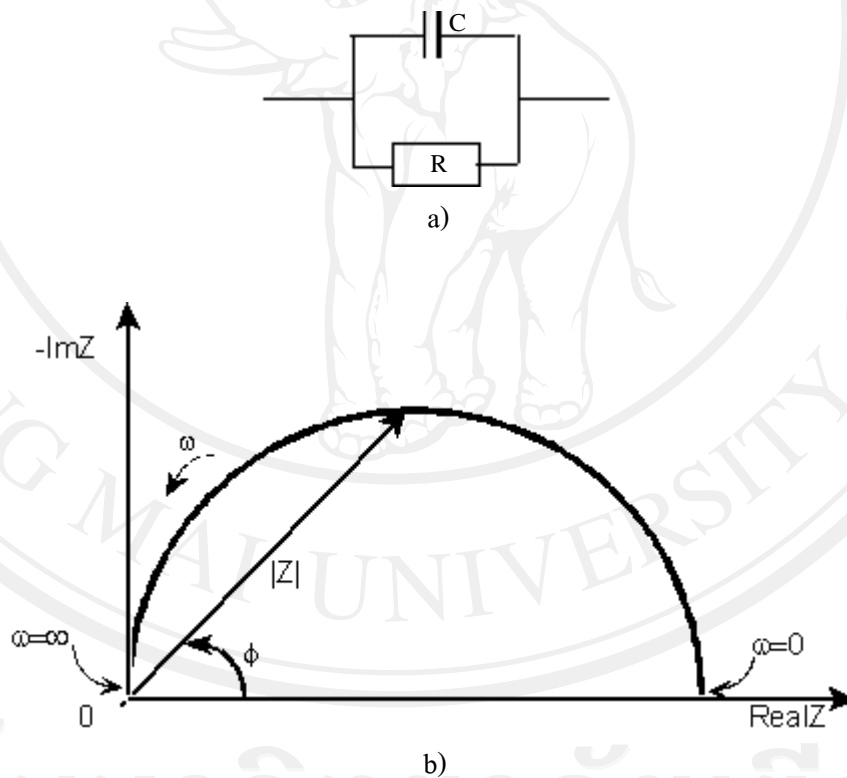
รูปที่ 2.29 แสดงศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าฟังก์ชันไซน์ในวงจรกระแสสลับที่มีความต่างเฟส ϕ [17]

จากกฎของโอห์ม Z สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.22)

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_0 \cos(\omega t)}{I_0 \cos(\omega t - \phi)} = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t - \phi)} = Z_0 \exp(i\phi) = Z_0 (\cos \phi + i \sin \phi) \quad (2.23)$$

เมื่อ Z_0 คือ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

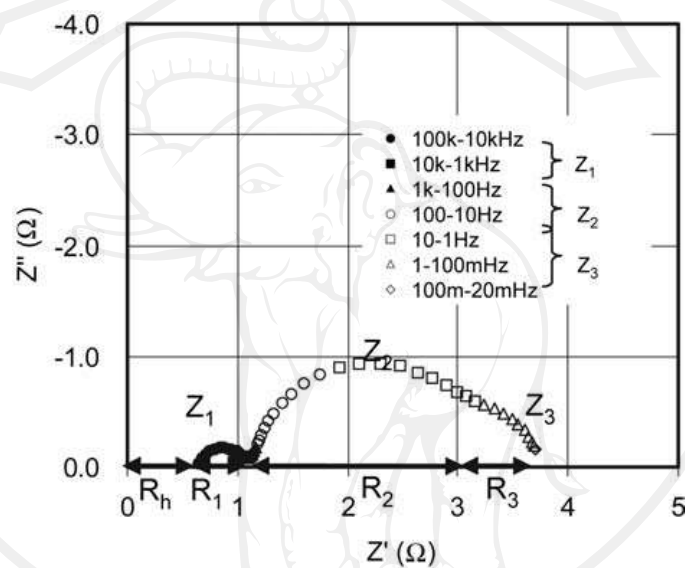
จะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อน Z จะขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า อัตราเร็วเชิงมุม และความต่างเฟส ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน สำหรับค่า Z ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้น เมื่อนำส่วนจริง (real part) มาพล็อตในแกน x และส่วนจินตภาพ (imaginary part) มาพล็อตในแกน y จะได้กราฟที่เรียกว่า Nyquist plot โดยที่แกน y จะเป็นค่าลบและแต่ละจุดของกราฟจะแทนค่า Z ที่ความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 a) วงจรตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ และ b) Nyquist plot ของวงจร a) [26]

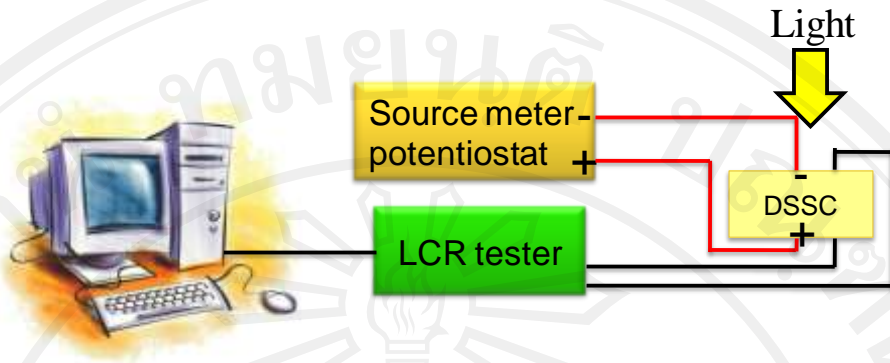
สำหรับการประยุกต์ใช้ EIS ในการศึกษาความต้านทานภายในของ DSSCs นั้น ได้มีการใช้กันอย่างมากเพื่อช่วยในการศึกษารายต่อของสารกึ่งตัวนำ สีข้อม อิเล็กโทรไลต์ และความต้านทานของรอยต่อของแพลทินัมกับอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าแอมพลิจูดต่างๆ ซึ่งตามทฤษฎีจะทำให้ได้ Nyquist plot ที่ประกอบไปด้วยครึ่งวงกลมสามวงซ้อนทับ

กันอยู่ แต่ละครึ่งวงกลมแสดงถึงการถ่ายเทประจุในแต่ละส่วนของเซลล์ ในช่วงความถี่สูงแสดงถึงการถ่ายเทประจุบริเวณแคโทดอิเล็กโทรไลต์ โพรด ช่วงความถี่ปานกลางแสดงถึงการถ่ายเทประจุบริเวณสารกึ่งตัวนำ และช่วงความถี่ต่ำแสดงถึงการถ่ายเทประจุภายในอิเล็กโทรไลต์ แต่ในบางครั้งครึ่งวงกลมที่ความถี่ต่ำอาจถูกกลืนไปด้วยครึ่งวงกลมความถี่ปานกลาง [26] กราฟ Nyquist ประกอบด้วยความต้านทานในแนวแกน x และความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุในแนวแกน y ซึ่งความต้านทานในแกน x นั้นแต่ละช่วงความถี่เป็นความต้านทานในแต่ละส่วนของรอยต่อในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดง Nyquist plot ทัวไปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [26]

ค่าความต้านทานในแต่ละช่วงความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสามารถเขียนออกมาได้ 4 ค่า กล่าวคือ R_h หมายถึงความต้านทานเริ่มต้นของกระจกที่เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้าที่สูงประมาณ 1 MHz R_1 หมายถึงค่าความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ณ บริเวณรอยต่อระหว่างแพลทินัมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ช่วงความถี่สูงระดับ 1-100 kHz R_2 หมายถึงความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ สีย้อมไวแสง และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่วงความถี่ 1-100 Hz และ R_3 หมายถึง ความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่วงความถี่ต่ำ ระดับ mHz การวัดอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าสเปกโทรสโคปีมีวงจรการวัด ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงวงจรวัดอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าสเปกโทรสโคปี