

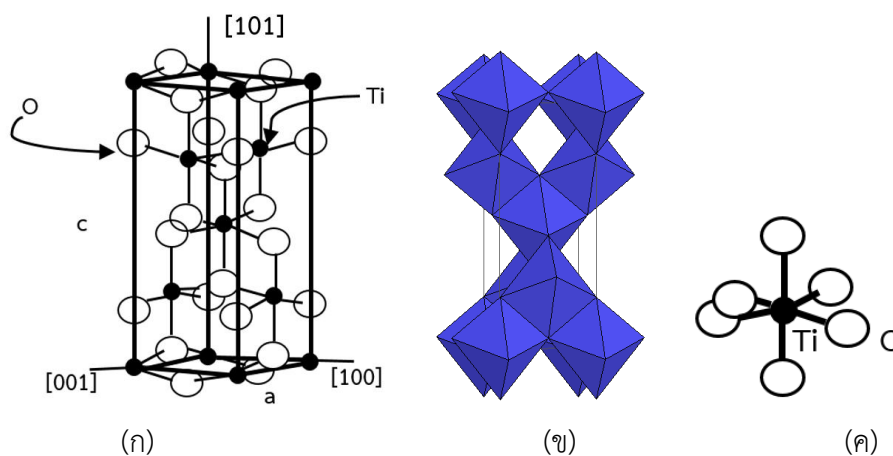
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคคิโดพ่น ภายใต้สนามไฟฟ้า สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจึงขอเสนอองค์ความรู้ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็นต่อไปนี้

2.1 สมบัติของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV โดยแถบช่องว่างนี้จะขยายกว้างมากขึ้นเมื่อมีอนุภาคแสง (photons) ตกกระทบ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ดังรูปที่ 2.1 ด้วยลักษณะโครงสร้างของผลึกทำให้มีลักษณะความเป็นรูพรุนสูง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์ โดยมีคุณสมบัติและลักษณะโครงสร้างดังนี้ (ธรรมบุญศรีทะวงค์, 2555)



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของ TiO_2

(ก) โครงสร้างแบบเตตระโกนอล

(ข) โครงสร้างแบบสามมิติ

(ค) การเกาะตัวกันระหว่างธาตุไทเทเนียมกับออกซิเจน

ที่มา (มหาวิทยาลัยโคโลราโด, 2555)

คุณสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ในแต่ละรูปแบบคูดึงจาก ตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปริมาณต่างๆ	ค่าปริมาณ
Lattice constant	a, b = 3.74 Å ⁰ c = 9.39 Å ⁰
Structure	Tetragonal
Resistivity (25°C)	10 ¹² ohm.cm
Refractive Index	2.49 (anatase)
Density	3.84 g.cm ⁻³
Orientation plane	(101)

ที่มา (จิราภรณ์ คำจันทร์, 2551)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละรูปแบบโครงสร้าง

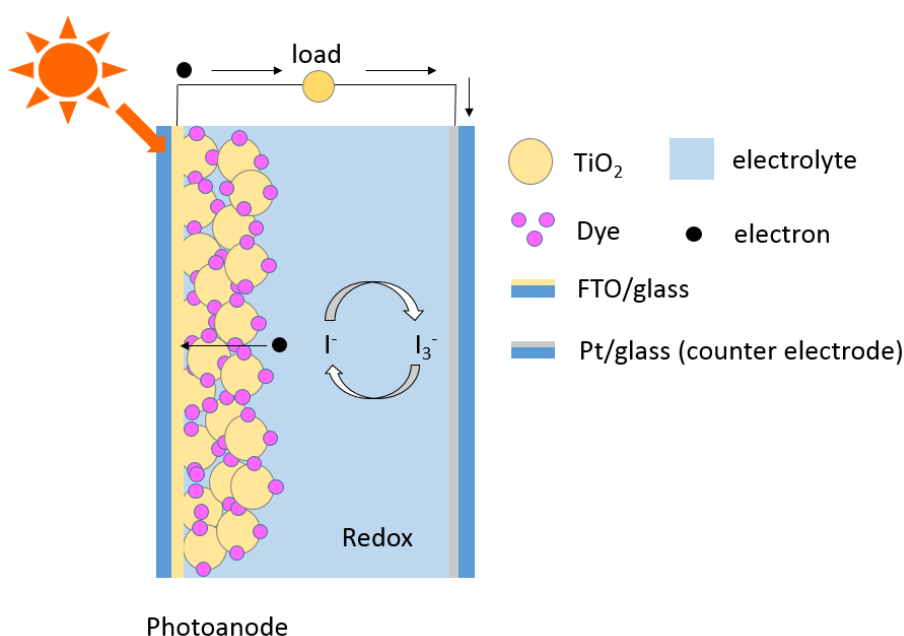
รูปแบบโครงสร้าง	สภาพเคลื่อนที่ได้ (cm ² / V · s)	ช่วงแถบพลังงาน (eV)
Anatase	~10	3.2 (indirect)
Rutile	~1	3.0 (indirect)
Brookite	-	-

ที่มา (จิราภรณ์ คำจันทร์, 2551)

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye – sensitized Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยศาสตราจารย์ Michael Gratzel ที่ Laboratory for Photonics and Interfaces, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ในปี ค.ศ. 1991 โดยเป็นเซลล์ไฟฟ้าจากพลังงาน

แสง (photovoltaic cell) ที่เลียนแบบกระบวนการสังเคราะห์แสงในธรรมชาติ มีการใช้สีย้อมเป็นตัวดูดกลืนพลังงานโฟตอนจากแสงอาทิตย์ เพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นส่งอิเล็กตรอนไปอยู่ในสถานะกระตุ้นที่พร้อมจะเคลื่อนที่ต่อไปยังสารกึ่งตัวนำกลุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดระดับนาโนที่โมเลกุลสีย้อมเกาะอยู่ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนไปยังขั้วอิเล็กโทรด (electrode) โปร่งแสงสู่วงจรมานอก (load หรือ storage) ขณะเดียวกันจะเกิดกระบวนการรับอิเล็กตรอนคืนของสีย้อมจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์กลุ่ม I^-/I_3^- ที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วอิเล็กโทรดอีกด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน หรือ รีดอกซ์ (redox) ดังรูปที่ 2.2



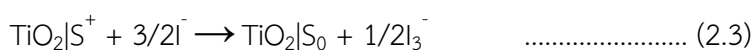
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ที่มา (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล : เว็บไซต์)

1. องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงประกอบด้วยเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (counter-electrode) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้กับอิเล็กตรอน ที่มาจากภายนอกให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) โดยที่เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดต้องมีสมบัติคือ มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยามาก และจะต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วยวัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดคือ แพลทตินัม (Pt) ชั้นเวิร์คกิ้ง (working) ซึ่งประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้า ชั้นสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในที่นี้คือ ไททาเนียม (TiO₂) โมเลกุลสีย้อม (Dye) สีย้อมไวแสงที่เหมาะสมในการใช้งานควรมีคุณสมบัติเบื้องต้นคือ เป็นโมเลกุลที่ดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงได้มากเป็นช่วงกว้าง ในช่วงความยาวคลื่นที่มีแสงตกลงมามาก ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในที่นี้คือ

(สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม), N3 dicarboxylic acid หรือ สีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดอกอัญชัน ดอกดาวเรือง เปลือกมังคุด แต่คุณภาพต่ำกว่า N719 และ N3 สารอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าทีในการรับและให้อิเล็กตรอนจากแคโทดอิเล็กโทรดโมเลกุลสีย้อมที่ทำงานภายในวงจร โดยในที่นี้ใช้สารไอโอดีน (I⁻) เป็นสารอิเล็กทรอนิกส์ และกระจกนำไฟฟ้า (transparent conductive oxide) ทำจากดีบุกออกไซด์ผสมสารฟลูออไรด์ (SnO₂ : F) หรือ FTO มีความโปร่งใสและนำไฟฟ้าที่ดี

2. หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ (ตัวอย่างเช่น TiO₂) จะดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสง ($h\nu$) แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state, S₀) จะถูกเร้าให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state, S*) ดังสมการดูดกลืนแสง (2.1) จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปที่แถบการนำไฟฟ้า (conduction band, cb) ของอนุภาคโลหะออกไซด์ดังสมการส่งผ่านอิเล็กตรอน (2.2) แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรภายนอกเซลล์จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วแคโทดที่ขั้วนี้สารอิเล็กทรอนิกส์ (ตัวอย่างเช่น ไอโอดีน/ไตรไอโอดีน) จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S⁺) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S₀) ดังสมการ (2.3) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กทรอนิกส์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (ตัวอย่างเช่น โลหะแพลทตินัม Pt) ดังสมการ (2.4) แต่ในกระบวนการก็อาจมีปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบประกอบด้วยการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สถานะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการ (2.5) และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กทรอนิกส์ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ดังสมการ (2.6)





3. การวิจัยและพัฒนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ใน DSSC ที่ใช้ออนูภาคนาโนเป็นขั้วรับแสงนั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับการกระตุ้นจากแสงจะวิ่งไปยังอนูภาคนาโนอื่นๆ เพื่อเคลื่อนไปยังขั้วไฟฟ้าของเซลล์แต่ระหว่างเคลื่อนที่นั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียของอิเล็กตรอนขึ้นที่รอยต่อระหว่างผลึกของอนูภาคนาโนการใช้วัสดุนาโนที่เติบโตใน 1 มิติมาแทนอนูภาคนาโนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านวัสดุนาโนได้ดีและง่ายขึ้นซึ่งคาดว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของ DSSC นั้นดีขึ้น

นอกจากนั้นยังมีแนวทางวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความทนทานและอายุการใช้งานของ DSSC ในหลายด้าน เช่น การพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่ราคาไม่แพงการพัฒนาอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีและมีพื้นที่ผิวมากการพัฒนาสีย้อมไวแสงที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากขึ้นในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้นการพัฒนาสารอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ใช่ของเหลวเพื่อให้มีความเสถียรต่อการใช้งานและการพัฒนาระบบการประกบเซลล์ (sealing) เพื่อยืดอายุการใช้งานของเซลล์เป็นต้น

4. ข้อดีและข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (photo electrochemical system) สามารถพัฒนาประสิทธิภาพได้หลายชั้น เช่น ชั้น counter electrode และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) อีกทั้งวัสดุที่ใช้ในการเคลือบมีราคาถูก และกระบวนการสร้างไม่ซับซ้อน ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในขณะที่มีความเข้มแสงต่ำแต่ข้อเสียคือ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ายังต่ำมีการเสื่อมประสิทธิภาพเร็ว แต่อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ก็ยังคงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาหรือวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพต่อไป

2.3 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

จากวงจรการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงอาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แสดงให้เห็นว่าหากมีการสร้างอิเล็กตรอนบนขั้วเวิร์คก็งอิเล็กโทรดจำนวนมากก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า จะแปรผันตามจำนวนอิเล็กตรอนหรือจำนวนโมเลกุลของเม็ดสีย้อมไวแสงนั่นเอง เราจึงสามารถทดสอบประสิทธิภาพของ DSSC ได้ด้วยวิธีการหาความเข้มของโมเลกุลสีย้อมได้เช่นกัน

1. การวัดค่าความเข้มของสารสีย้อมไวแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer ใช้หลักการดูดกลืนแสงของสารประกอบในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร หรือครอบคลุมสเปกตรัมในช่วง UV และ Visible อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนระดับพลังงาน การรับ

พลังงานของธาตุหรือโมเลกุลแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะเคมี ทำให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบมีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งใช้เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์

2. การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่อง IV Tester การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากค่า Air Mass, AM ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\cos(\theta_z)$ โดยที่ θ_z หรือมุม zenith คือมุมที่กระทำกับเส้นตั้งฉากจากดวงอาทิตย์มายังโลก ค่า AM จะมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 0 องศา กับพื้นโลกและเนื่องจากการสร้างกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะขึ้นความเข้มรังสีของแสงที่นำมาทดสอบ ดังนั้น American Society for Testing and Materials (ASTM) จึงได้กำหนดค่า AM ขึ้นเพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คือ AM 1.5 ที่มุม zenith ดังรูปที่ 2.3 แผนภาพแสดง Calibration Curve = 48.2° ซึ่งเทียบได้กับค่าความเข้มรังสีของแสงหรือไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ $1,000 \text{ W/cm}^2$ หรือ 100 mW/cm^2 มาตรฐานในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เรียกว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) โดยคิดเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ นิยามจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับวงจรภายนอก (P_{\max}) ต่อกำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{in}) คูณด้วย 100 เปอร์เซ็นต์

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\eta = \frac{I_{\max} V_{\max}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

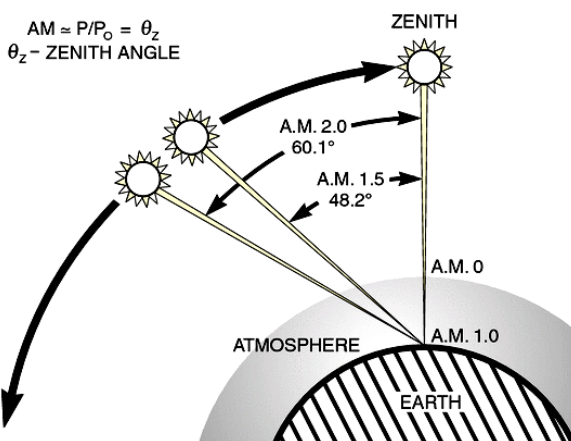
เมื่อ I_{\max} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด V_{\max} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดสำหรับในโปรแกรมการคำนวณจะมีการกำหนดค่าฟิลด์แฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) โดยนิยามจากพื้นที่ใต้กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์โดย $I_{\max}V_{\max}$ คือ พื้นที่ใต้กราฟที่มากที่สุดที่พลอตระหว่าง $I_{sc}V_{oc}$ ที่มากที่สุด

$$FF = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

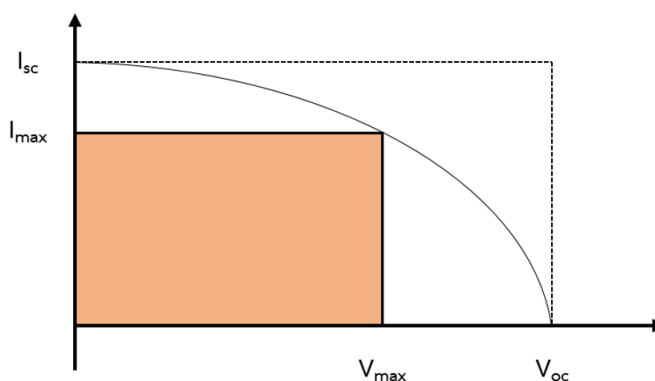
เมื่อ I_{sc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมัด และ V_{oc} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมัด ดังสมการประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.10)$$

ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติ คือ เซลล์ที่ไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะมีประสิทธิภาพของเซลล์เป็น 100% กล่าวคือกำลังไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เซลล์หรือเซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน (กมลพรรณ ชุมพล, 2555)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงอาทิตย์กระทำกับเส้นตั้งฉากที่ผิวโลกกับค่ามวลอากาศที่มา (กมลพรรณ ชุมพล, 2555)



รูปที่ 2.4 กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มา (กมลพรรณ ชุมพล, 2555)

2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากัน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



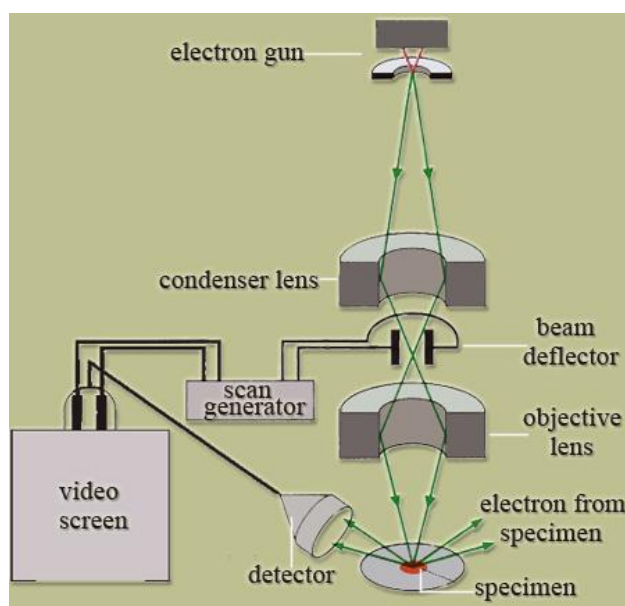
รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2555)

ส่วนประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทั่วไปประกอบด้วย โครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โครงสร้างง่ายๆที่เห็นได้ชัดแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ รูปที่ 2.6 คือส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่อง ภายในกลวงเรียกว่า column และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า console unit ทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัดเพราะเป็นลักษณะภายนอกทั่วไปของ SEM จะขาดอย่างใดอย่างหนึ่งเสียมิได้เพราะ column ยังประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ column อุปกรณ์ซึ่งรับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่างถูกจัดวางไว้อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกันส่วนภายใน console unit ซึ่งแผงควบคุมระบบควบคุมไฟฟ้าระบบสุญญากาศและระบบถ่ายภาพนั้นประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบเช่นการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน column จำเป็นต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ console unit นอกเหนือจาก column

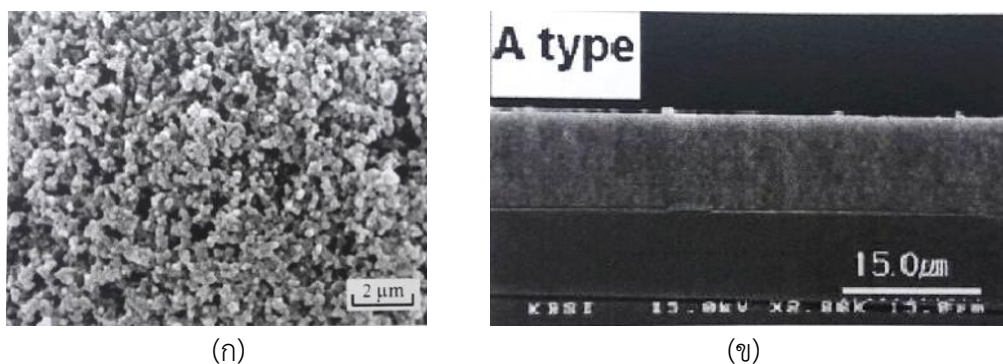
และ console unit ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นยิ่งสำหรับ SEM แล้ว SEM ยังมีส่วนประกอบที่จำเป็น เช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) คือระบบทำสุญญากาศ (vacuum system) ระบบทำไฟฟ้าแรงสูง (high voltage generator) และระบบทำความเย็นโดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (water cooling system) ซึ่งระบบต่างๆเหล่านี้สามารถหารายละเอียดได้จากตำราหรือหนังสือที่เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั่วไปเพื่อจะให้เข้าใจถึงระบบการทำงาน SEM รวมทั้งการใช้และการบำรุง SEM ได้อย่างถูกต้องผู้ใช้หรือผู้ที่สนใจ SEM จำต้องศึกษาส่วนประกอบพื้นฐานต่างๆของ SEM ในรายละเอียดเพื่อให้ได้ทราบถึงทฤษฎีหรือเหตุผลของแต่ละส่วนที่จำเป็นสำหรับการใช้ SEM ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
 ที่มา (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล, 2555)

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) พื้นผิวของอนุภาค TiO_2 ที่ได้จากเครื่อง SEM

(ข) อนุภาคของ TiO_2 ภาคตัดขวางที่ได้จากเครื่อง SEM

ที่มา (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2555)

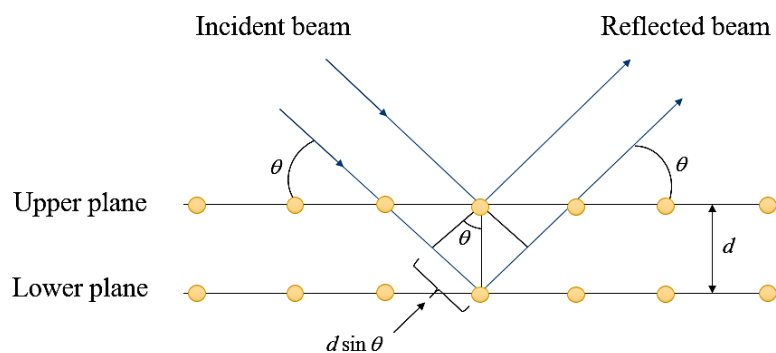
2.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุรายละเอียดองค์ประกอบของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.8 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
ที่มา (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์, 2555)

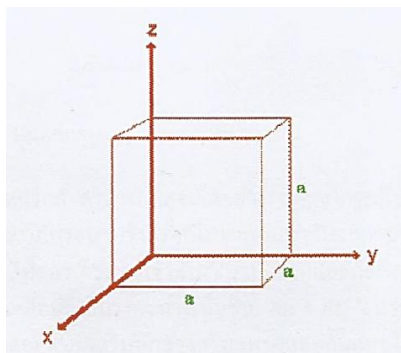
หลักการและวิธีการวิเคราะห์ คือ วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึก



รูปที่ 2.9 แสดงระยะห่างระหว่างระนาบ d
ที่มา (จรัส บุญยธรรม, 2555)

ระนาบ คือ แนวที่อะตอมเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงใน 2 มิติ หรือเป็นแผ่นตรงใน 3 มิติ ระนาบไม่จำเป็นจะต้องอยู่ในแนวขนานกับแลตทิซถ้ามีแสงหรือรังสีตกกระทบกับผลึกที่เอียงอยู่ระนาบที่สะท้อนรังสีออกไปก็จะไม่ใช่ระนาบที่ขนานกับด้านยาวของแลตทิซถ้าความยาวของด้าน แลตทิซลูกบาศก์(cubic lattice)เท่ากับ a ระยะห่างระหว่างระนาบสองเส้นแรกในรูปข้างล่างนี้ (คู่ซ้ายสุด) ก็คือ a ระยะห่างระหว่างระนาบนี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย XRD เนื่องจากกราฟที่ได้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างระนาบ อันเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด เนื่องจากวัสดุมีความยาวของแลตทิซไม่เท่ากันและอะตอมเรียงตัวต่างๆ กันไปทำให้มีระยะห่างระหว่างระนาบไม่เท่ากัน การใช้ดัชนีระนาบ miller indices นั้นเป็นการเรียกชื่อระนาบเพื่อความง่ายและสามารถนำไปใช้คำนวณหาระยะทางระหว่างระนาบได้ด้วย โดยดัชนี miller indices นั้นจะเขียนเป็น (hkl) โดย h, k, l นั้นเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม การหา Miller indices ทำได้ดังนี้

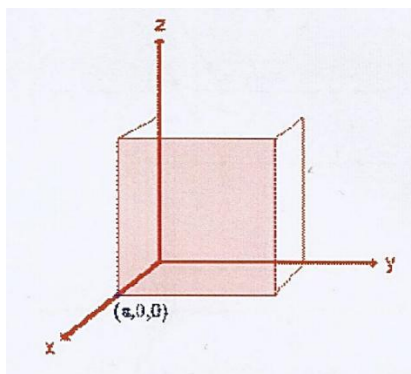
1. หาจุดกำเนิด (origin) ของแกน x, y, z



รูปที่ 2.10 จุดกำเนิด (origin) ของแกน x, y, z

ที่มา (จรัส บุญยธรรม, 2555)

2. หาจุดตัดของระนาบกับแกน x, y, z โดยระนาบนี้จะต้องไม่ผ่านจุดกำเนิด (origin) ระนาบนี้จะตัดกับแกน x ที่ a และเนื่องจากขนานกับแกน y และ z จึงตัดกับแกน y, z ที่ ∞



รูปที่ 2.11 จุดตัดของระนาบแกน x, y, z
ที่มา (จรัส บุญยธรรม, 2555)

3. กำหนดเศษส่วนของความยาวของหน่วยเซลล์ (unit cell) ในรูปข้างบนนี้ หน่วยเซลล์มีความยาว a ทุกด้าน เพราะเป็นคิวบิก (cubic) จุดที่ตัดแกน x จึงเป็น 1 เท่าของ a และ y, z ก็ยังคงเป็น ∞
4. กลับเศษเป็นส่วน (เอาไปหารหนึ่ง) $1/1 = 1$ และ $1/\infty = 0$
5. ทำให้เลขเป็นจำนวนเต็มน้อยที่สุดได้ 1, 0, 0 จากจุดตัดแกน x, y, z เขียนในรูป (hkl) ระนาบนี้จึงเรียกว่าเป็นระนาบ (100)

ในปี ค.ศ. 1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบบน (θ) รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (หรือเลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบบน แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปแบบสมการ ซึ่งสมการดังกล่าวเรียกว่า "Bragg's Law"

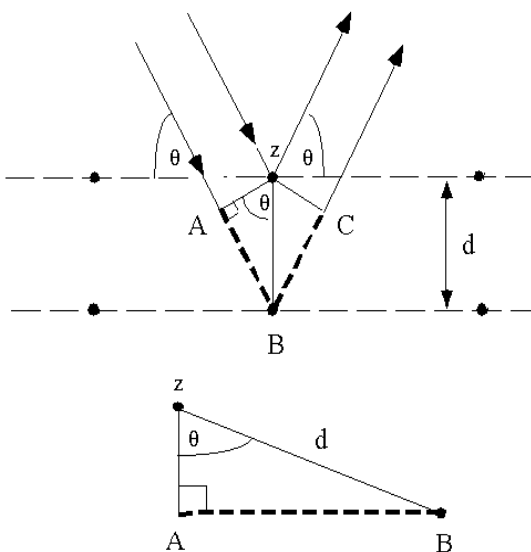
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

เมื่อ n = เลขจำนวนเต็ม, θ = มุมตกกระทบบน, λ = ความยาวคลื่น

การพิสูจน์กฎของแบรกก์ สามารถพิสูจน์ได้อย่างง่ายๆ จากรูปที่ 2.12 ให้รังสีตกกระทบบนทั้ง 2 ลำมีเฟสตรงกันทำมุม θ กับระนาบรังสีที่หนึ่งตกกระทบบนเข้ากับระนาบบนและสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบส่วนรังสีที่สอง ตกกระทบบนเข้ากับระนาบถัดไปและสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบที่สองโดยรังสีที่สองจะเคลื่อนที่เป็นระยะทางเพิ่มขึ้น $AB + BC$ แทรกสอดกับคลื่นลำที่หนึ่ง

ซึ่งคลื่นทั้งสองลำอาจจะแทรกสอดแบบเสริมหักล้างหรือแทรกสอดกันแบบไม่ตรงเฟสกันก็ได้ แต่ถ้า จะให้มีการแทรกสอดแบบเสริมกันระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นมาขึ้นนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเต็ม (n) คูณกับความยาวคลื่นดังสมการต่อไปนี้

$$n\lambda = AB + BC \quad \dots\dots\dots (2.12)$$



รูปที่ 2.12 พิสูจน์กฎของแบรกก์
ที่มา (จรัส บุญยธรรมา, 2555)

พิจารณาสามเหลี่ยมมุมฉาก ABzจะได้

$$AB = d \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

เพราะว่า AB = BC ดังนั้นสมการที่ (2.12) จะเปลี่ยนเป็น

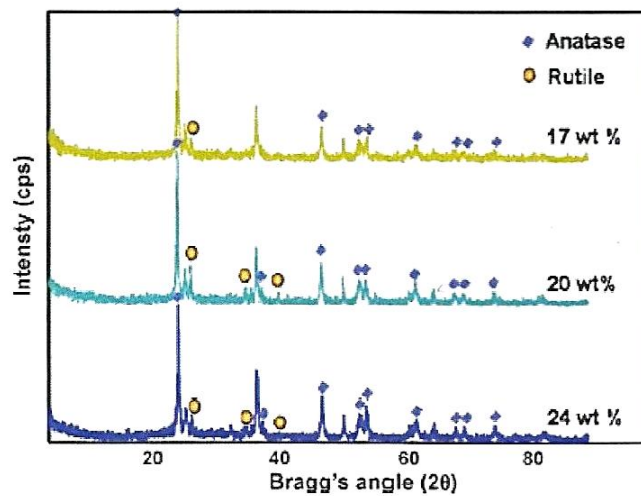
$$n\lambda = 2AB \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.14) ลงในสมการที่ (2.13) จะได้

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

สอดคล้องกับสมการที่ (2.11) ซึ่งก็คือกฎของแบรกก์นั่นเอง

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุที่เป็นผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึก ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยวัสดุที่เป็นผลึกชนิดใดบ้าง ความกว้างของพีค (peak) การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นผลเนื่องมาจากเครื่องมือและลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่าง ได้แก่ ความเครียดจุลภาค ข้อบกพร่องของผลึก และขนาดของตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาขนาดของผลึกและความเครียดจุลภาคจากความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ที่ได้จากการวัดแผ่นฟิล์มบางด้วย XRD
ที่มา (nabond, 2555)

การหาขนาดของผลึกและปริมาณเฟส นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาขนาดของผลึกตามสมการของเชียร์ (Scherer) ดังแสดงในสมการที่ 2.16 พร้อมทั้งคำนวณหาค่าปริมาณเฟสดังสมการ 2.17 ถึง 2.19(วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา, 2555)

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta_B} \dots\dots\dots (2.16)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของผลึก

λ คือ Wavelength of the x-ray radiation (CuK α = 0.15406 nm)

β คือ Angle width at half maximum height

θ_B คือ diffraction angle of the centroid of the peak in degree

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \dots\dots\dots (2.17)$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \dots\dots\dots (2.18)$$

$$W_b = k_b A_b / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \dots\dots\dots (2.19)$$

เมื่อ W_a , W_r และ W_b คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟสอานาเทส รูไทล์และบลูโคด์ ตามลำดับ A_a , A_r และ A_b คือ ความเข้มของฟิโคนาเทส (101) ฟิครูไทล์ (110) และฟิคบลูโคด์ (121) ตามลำดับ ส่วนสัมประสิทธิ์ k_a และ k_b มีค่าเท่ากับ 0.886 และ 2.721 ตามลำดับ

2.6 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดผลึกผงจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อขนาดเม็ดผลึกน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะพบว่า เมื่อมุมตกกระทบมีค่าใกล้ๆมุมแบรกก์ $2\theta_B$ เพราะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างไม่สมบูรณ์ของรังสีเอกซ์ที่กระเจิง ผลที่ตามมาก็คือทำให้ฟิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่ง $2\theta_B$ นั้นกว้างขึ้น (broaden) เมื่อเทียบกับกรณีที่มีเม็ดผลึกมีขนาดใหญ่ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ผลขนาดเกรน (Grain size effect)

เมื่อรวมผลของผลขนาดเกรน และความเค้นที่มีต่อฟิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ขนาดของเม็ดผลึก (D) จะสัมพันธ์กับความกว้างของฟิคตามสมการ Bull

$$\frac{B \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{D} + 4(\Delta \epsilon) \frac{\sin \theta}{\lambda} \dots\dots\dots (2.20)$$

เมื่อ β เป็นความกว้างของฟิค (FWHM) λ เป็นความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และ $\Delta \epsilon$ เป็นขนาดความเครียดเฉลี่ย ซึ่งต้องนำมาคิดในกรณีที่มีผลของความเค้นไม่สม่ำเสมอต่อความกว้างของฟิคด้วย โดยทั่วไปค่า β สามารถหาได้จาก Cullity (คู่มือการจัดการเรียนรู้การสอนฟิสิกส์สถานะของแข็ง ระดับบัณฑิตศึกษา, 2556)

$$\beta = (\beta_m^2 - \beta_0^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2.21)$$

สมการที่ใช้ในการหาขนาดของผลึก

$$B = \frac{0.9\lambda}{FWHM \cos \theta} \dots\dots\dots (2.22)$$

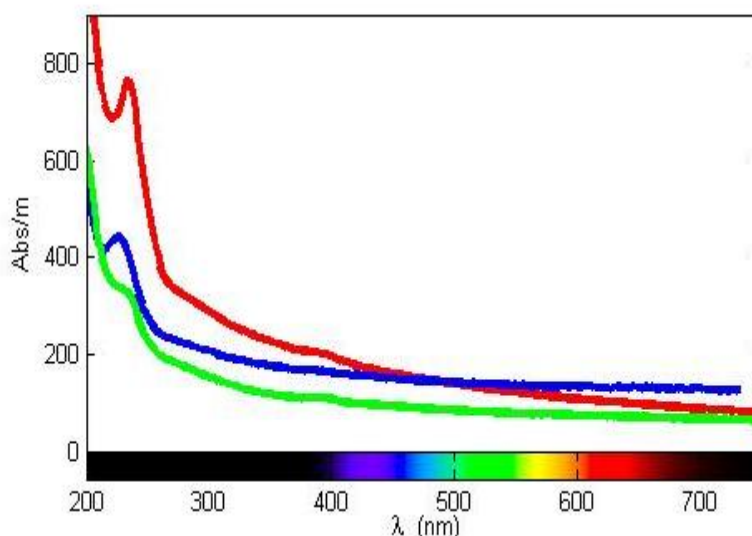
โดยที่ β_m เป็น full width at half maximum (FWHM) ของพีคที่วัดได้ β_0 เป็น Full Width at Half Maximum (FWHM) ของพีคเนื่องจากเครื่องมือวัดซึ่งมักใช้ค่าจาก FWHM จากพีคที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่ได้จากสารตัวอย่างที่มีขนาดเม็ดผลึกใหญ่กว่า $1 \mu\text{m}$ ขึ้นไปให้สังเกตว่ากรณีที่ขนาดของเม็ดผลึก (D) มีค่ามากๆ สมการ 2.20 จะลดรูปเป็นสมการ $\beta = 4 \tan \frac{2\theta}{2} (\Delta\varepsilon)$ หมายความว่า ไม่มีผลของผลขนาดเกรนนั่นเอง

2.7 เครื่อง UV-vis spectrophotometer



รูปที่ 2.14 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer
ที่มา (จินดาพร บุญวัฒนา, 2558: เว็บไซต์)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ซึ่งเรียกว่า สเปกตรัม (spectrum) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น (wavelength)

ที่มา (จินดาพร บุญวัฒนา, 2558: เว็บไซต์)

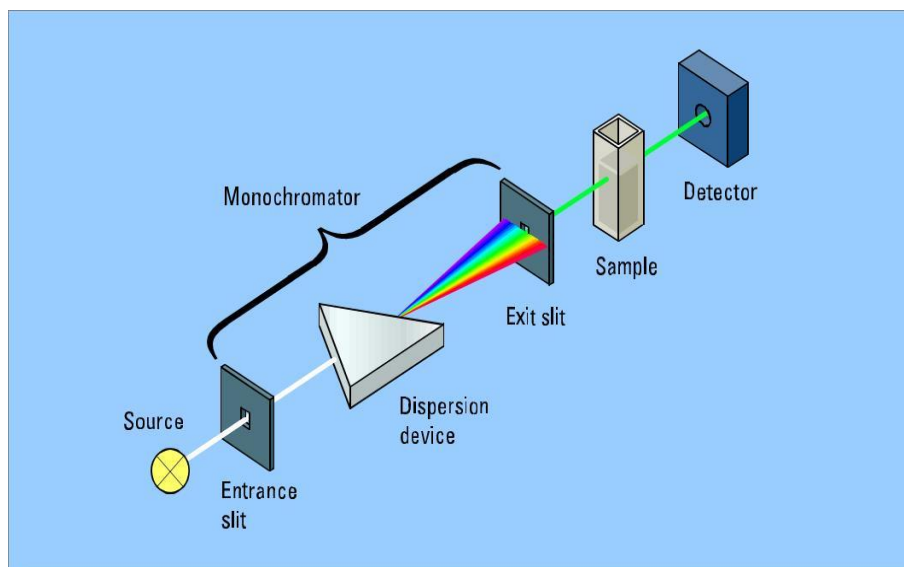
2.8 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-vis spectrophotometer

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดรังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H2 and D2 lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง visible ใช้หลอด tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น

2. โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติกให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือเกรตติง

3. ภาชนะใส่สารตัวอย่าง (cell sample) เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ เซลล์ที่ทำด้วยซิลิกาและควอร์ต ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. ตัวตรวจจับสัญญาณ (detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ photomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

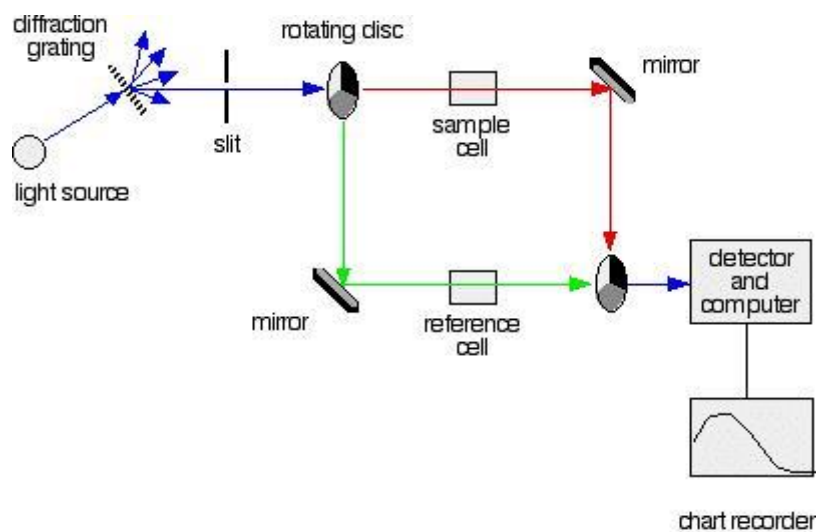


รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer
 ที่มา (จินดาพร บุญวัฒนา, 2558: เว็บไซต์)

2.9 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไป

1. Single-Beam Spectrophotometer เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่างแล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2. Double-Beam Spectrophotometer ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ (จินดาพรบุญวัฒนา, 2558: เว็บไซต์)

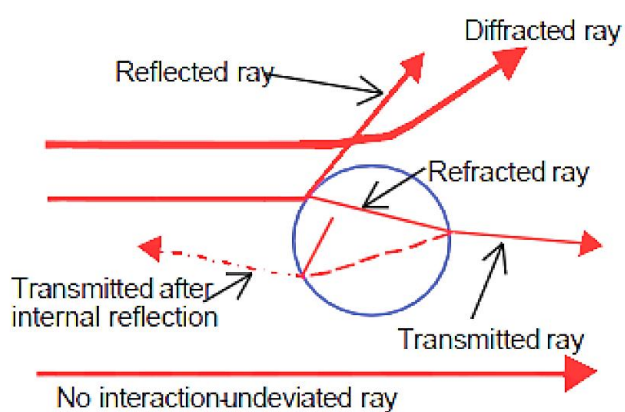


รูปที่ 2.17 Double beam spectrophotometer

ที่มา (จินดาพร บุญวัฒนา, 2558: เว็บไซต์)

2.10 หลักการกระเจิงแสง

พิจารณาเฉพาะอนุภาคใดๆ โดยใช้หลักการกระเจิงแสงจะเห็นว่าเมื่อแสงตกกระทบบนอนุภาคจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสง ซึ่งจะประกอบด้วย การสะท้อนของแสง, การหักเหของแสง และการเลี้ยวเบนของแสง ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ปรากฏการณ์การกระเจิงแสงเมื่อตกกระทบบนอนุภาค

ที่มา (มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, สำนักหอสมุด : เว็บไซต์)

จากกฎการสูญเสียพลังงานสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.23)

$$\text{Extinction} = \text{scattering} + \text{absorption} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

โดยที่ Scattering คือ การกระเจิงของแสง
Absorption คือ การดูดกลืนของแสง

$$\text{เมื่อ Scattering} = \text{reflection} + \text{refraction} + \text{diffraction} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

โดยที่ Reflection คือ การสะท้อนของแสง
Refraction คือ การหักเหของแสง
Diffraction คือ การเลี้ยวเบนของแสง

กรณีการดูดกลืนของลำแสงมีประสิทธิภาพไม่เป็น 100% โฟตอนในลำแสงบางตัวอาจจะไม่ถูกสะท้อนหรือส่งผ่านออกมาจากวัตถุ ในบางกรณีการดูดกลืนอาจจะเข้าใกล้ 100% และมีโฟตอนบางส่วนถูกสะท้อนออกหลังกระทบวัตถุ และมีบางส่วนที่ส่งผ่านวัตถุออกมาหลังการหักเหของแสง ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดนี้จัดอยู่ภายใต้รูปแบบการกระเจิงแสงแบบเรย์ไลและไมย์ โดยมีค่า α เป็นตัวเลือกรูปแบบการกระเจิงแสงซึ่งมีขนาดของอนุภาคเป็นตัวกำหนดและผูกพันกับค่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ ตามสมการ (2.25)

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} : D = 2r \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของอนุภาค หน่วยไมโครเมตร
r คือ รัศมีของอนุภาค หน่วยไมโครเมตร
 λ คือ ค่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ หน่วยไมโครเมตร

โดยที่ $\alpha \ll 1$ คือ รูปแบบของ Rayleigh Scattering Theory
 $\alpha \approx 1$ คือ รูปแบบของ Mie Scattering Theory
 $\alpha \gg 1$ คือ รูปแบบของ Geometric Scattering Theory

ตารางที่ 2.3 การหาค่า α แสดงความสัมพันธ์ของอนุภาค (D) ที่ขนาด 0.1 ถึง 0.6 ไมโครเมตรกับ ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 0.488 และ 0.6328 ไมโครเมตร

$\alpha = \pi D/\lambda = 2\pi r/\lambda$				
Dimeter (D)	Radius (r)	Parameter (α)	Wavelength ($\lambda = 0.488 \mu\text{m}$)	Wavelength ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)
0.001 μm	0.0005 μm	$(\alpha \ll 1)$	0.006	0.005
0.002 μm	0.001 μm		0.013	0.010
0.003 μm	0.0015 μm		0.019	0.015
0.004 μm	0.002 μm		0.026	0.020
0.005 μm	0.0025 μm		0.032	0.025
0.007 μm	0.0035 μm		0.045	0.035
0.01 μm	0.005 μm		0.064	0.050
0.02 μm	0.01 μm		0.129	0.099
0.03 μm	0.015 μm		0.193	0.149
0.1 μm	0.05 μm		0.643	0.496
0.2 μm	0.1 μm	$(\alpha \gg 1)$	1.287	1.000
0.3 μm	0.15 μm		1.930	1.489
0.4 μm	0.2 μm		2.574	1.985
0.5 μm	0.25 μm		3.217	2.481
0.6 μm	0.3 μm		3.861	2.977

จากตารางที่ 2.3 เป็นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ (α) ที่ขนาดอนุภาค D ตั้งแต่ 1 ถึง 0.6 ไมโครเมตร ใช้ λ เท่ากับ 0.488 และ 0.6328 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณค่า $\alpha = (3.14)(0.007 \times 10^{-6}) / (0.488 \times 10^{-6}) = 0.045$ ซึ่งตกอยู่ในช่วง $\alpha \ll 1$ ที่เป็นการกระเจิงแสงรูปแบบเรย์ไล และค่า $\alpha = (3.14)(0.4 \times 10^{-6}) / (0.6328 \times 10^{-6}) = 2.574$ ซึ่งตกอยู่ในช่วง $\alpha \gg 1$ ที่เป็นการกระเจิงแสงรูปแบบไมย์ จากการคำนวณดังกล่าวจึงสามารถอธิบายรูปแบบการกระเจิงแสงเพื่อนำไปสู่การเลือกความยาวคลื่นของแสงและเลือกรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อใช้กับระบบในงานวิจัยต่อไป

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Guan-Jun Yang (2007) การเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเคลือบด้วยวิธีฉีดพ่นอย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้ผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทส และซินิทรูไทล์ ใช้ความเข้มข้นสารละลายของอนาเทส 55% ถึง 65% และใช้ซินิทรูไทล์ 35% ผลจากการปลูกไทเทเนียมไดออกไซด์นำไปวิเคราะห์ด้วยพื้นผิว ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสจะให้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดซินิทรูไทล์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เป็นกระบวนการสร้างเครื่องมือในการปลูกชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ต้นทุน ในการสร้างไม่สูงเหมาะสมสำหรับการปรับวิธีการเพื่อประยุกต์ทำงานวิจัยต่อไป

Ji-Tae Hong (2010) การสร้างเครื่องมือเคลื่อนแบบฉีดยุติขั้นโทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโวลตีอ้อม เป็นระบบสเปร์ยไฟฟ้าสถิต (ESS) และทำการทดลองด้วยวิธีการเคลื่อนด้วยระบบ ESS ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบ (ESS) ตั้งแต่ 5-10 kV ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนแต่ละตัวอย่างคือ 2, 4, 6 และ 8 นาที อัตราการฉีดยุติของหัวฉีดยุติมีค่า 5 มิลลิเมตร/ ชั่วโมง และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่เคลื่อนด้วยกล้อง (CCD) นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเซลล์จะสามารถพิจารณาได้จากกราฟ I-V curve พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้จากวิธีสเปร์ยไฟฟ้าสถิต คือ 3.9 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีสเปร์ยธรรมดา ซึ่งได้เพียง 3.5 เปอร์เซ็นต์

Xue-Long He (2014) ได้ทำการเตรียมชั้นกระจังแสงโทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยวิธีการฉีดยุติด้วยความเย็นที่อุณหภูมิห้อง (RTCS) บนแผ่นรองรับพลาสติกที่โค้งงอได้ เขาทำการเปรียบเทียบกับวิธีการฉีดยุติแบบธรรมดาที่ไม่มีระบบสุญญากาศ ระบบฉีดยุติด้วยความเย็น พบว่าชั้นโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีความคงทน สามารถกระจังแสงในชั้นดังกล่าวได้สูง ส่งผลให้โมเลกุลของสารโวลตีอ้อมไวแสงดูดกลืนแสงได้มากกว่าแบบฉีดยุติธรรมดา และสามารถเคลื่อนตามความหนาที่ต้องการได้ด้วยวิธี RTCS โดยช่วงความหนาที่เหมาะสมคือ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร สามารถเปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 5.24 เปอร์เซ็นต์ มีการทดสอบบิต โค้งงอของเซลล์พบว่าประสิทธิภาพยังคงสูงคงที่เนื่องจากความคงทนของการยึดเกาะชั้นกระจังแสงโทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นวิธี RTCS จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโวลตีอ้อมไวแสง

Bing Hu. และ Baoshun Liu (2015) ได้ศึกษาทำการเตรียมอนุภาคทรงกลมโทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีรูพรุนสูงด้วยวิธีฉีดยุติแบบไฟฟ้าและอบไอน้ำหลังการเคลื่อนขั้นโทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโวลตีอ้อมไวแสง พบว่าอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 600 นาโนเมตร มีลักษณะการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นชั้นกระจังแสงในเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสามารถดูดกลืนแสงได้มาก ทำให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงถึง 7.2 เปอร์เซ็นต์ สามารถดูดกลืนแสงมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงในช่วงความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์

Slamet Widodo, Goib Wirantia และ Mirza Nur Hidayat (2015) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนท่อคาร์บอน (CNT) เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโวลตีอ้อมไวแสงด้วยวิธีการฉีดยุติ โดยทำการฉีดยุติจำนวนรอบการฉีดยุติที่แตกต่างกัน 5 15 25 และ 55 รอบ

พบว่าชั้นนาโนคาร์บอนที่ได้มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กระดับนาโน ซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุนหรือพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้จำนวนมาก ส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 1.98 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการฉีดพ่น 55 รอบ

Shuqing Huang, และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการเคลือบท่อนาโนคาร์บอน (CNT) เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยวิธีการฉีดพ่น เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำมาจากแพลทินัม พบว่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เคลือบด้วยวิธีฉีดพ่นนาโนคาร์บอน มีค่าต่ำได้ถึง 16 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร เทียบกับแพลทินัมซึ่งมีความต้านทานเท่ากับ 3 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งถือได้ว่าใกล้เคียงมาก และนอกจากนี้ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เคลือบด้วยวิธีฉีดพ่นนาโนคาร์บอนมีประสิทธิภาพสูงถึง 4.18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกือบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ 5.05 เปอร์เซ็นต์