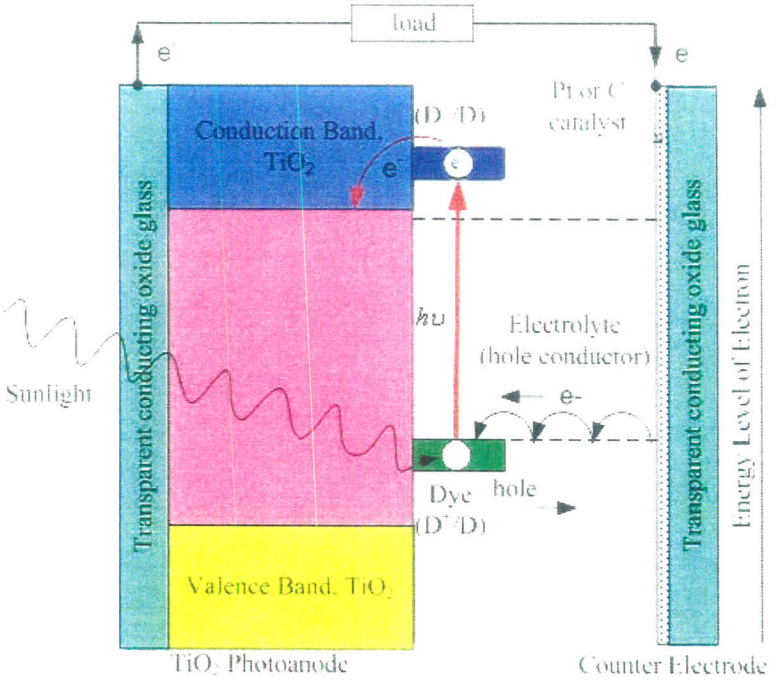
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง การพัฒนาสีย้อมไวแสง การพัฒนาระบบอิเล็กโตรไลท์ การพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ข้อดีและข้อที่ต้องปรับปรุงของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 การเตรียมฐานรองแก้ว การสังเคราะห์ฟิล์มบาง การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

นับตั้งแต่ B. O'regan และ M. Grätzel [17] ได้ค้นพบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงในปี ค.ศ. 1991 จากนั้นพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ได้ดำเนินการก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว การวิจัยได้มุ่งเน้นสู่ความเข้าใจต่อกลไกการทำงานของเซลล์ และพัฒนาการผลิตทางการค้าของเซลล์แสง อาทิตย์สีย้อมไวแสง เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีศักยภาพ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงผลิตด้วยวัสดุราคาต่ำ TiO_2 ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นพลังงานที่ยั่งยืนและผลิตง่ายโดยไม่ต้องใช้ห้อง clean room เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงประกอบด้วย electrode 2 ส่วน คือ working electrode ที่ประกอบด้วย แผ่นแก้วตัวนำ (conducting glass) 1 แผ่น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ และมี SnO_2 สังเคราะห์เป็นฟิล์มบางบนแผ่นแก้วตัวนำ และใช้ สีย้อม (dye) TiO_2 ส่วนที่ 2 คือ counter electrode ที่ประกอบด้วยแผ่นแก้วตัวนำ (conducting glass) 1 แผ่น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ และมี SnO_2 สังเคราะห์เป็นฟิล์มบาง บนแผ่นแก้วตัวนำ ซึ่งใช้ Pt/C catalyst เคลือบบนแผ่นแก้วตัวนำเพื่อสร้าง counter electrode และสาร electrolyte ที่เคลือบบน counter electrode จากนั้นต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับ working electrode และ counter electrode สำหรับการนำไฟฟ้าไปใช้งาน ดังภาพที่ 2.1 จวบจนปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 10 % [18] อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงส่วนใหญ่ใช้ liquid electrolyte [19] เสถียรภาพเซลล์มีเสถียรภาพน้อยเนื่องจากของเหลวอาจจะระเหยเป็นไอ



ภาพที่ 2.1 พลังงานและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงผลึกนาโน [19]

เมื่อเซลล์ไม่ถูกซีล (sealed) อย่างสมบูรณ์ การซึมผ่าน (permeation) ของโมเลกุลของออกซิเจนหรือน้ำ และการทำปฏิกิริยากับ electrolytes ทำให้การผลิตเป็น modules ยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนา solid, quasi solid – state electrolyte หรือ quasi solid – state hole conductor เพื่อใช้แทน liquid electrolytes เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงผลึกนาโน มีหลักการทำงานเลียนแบบการสังเคราะห์แสงในพืช [20] ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ทำหน้าที่ photosensitizer อิเล็กตรอนของโมเลกุลจะถูกทำให้ตื่นตัวและถูกฉีด (ejected) สู่แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของไททาเนียม อิเล็กตรอนเหล่านี้แพร่สู่แก้วตัวนำโปร่งแสงและไหลผ่านโหลด สีย้อมได้รับอิเล็กตรอนจากอิเล็กโตรไลท์ (I^-) สารอิเล็กโตรไลท์ (I_3^-) แพร่เข้าสู่คาร์บอน (C) หรือ พลาทินัม (Pt) ของ counter electrode จากนั้นอิเล็กโตรไลท์ จะถูกรีดิวซ์สู่ I^- (ได้รับอิเล็กตรอน) ในขณะที่โฮล (hole) จะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับอิเล็กตรอนในอิเล็กโตรไลท์ จึงเรียกสารอิเล็กโตรไลท์ว่าเป็น hole conductor ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ขบวนการเกิดตลอดเวลาเมื่อมีแสงตกกระทบ [19] ปฏิกิริยาการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วอาโนด

$$D + h\upsilon \rightarrow D^* \quad (2.1)$$

$$D^* \rightarrow D^+ + e^- \quad (2.2)$$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$D^+ + \text{อิเล็กโตรไลท์ } (I^-) \rightarrow D + \text{อิเล็กโตรไลท์ } (I_3^-) + e^- \quad (2.3)$$

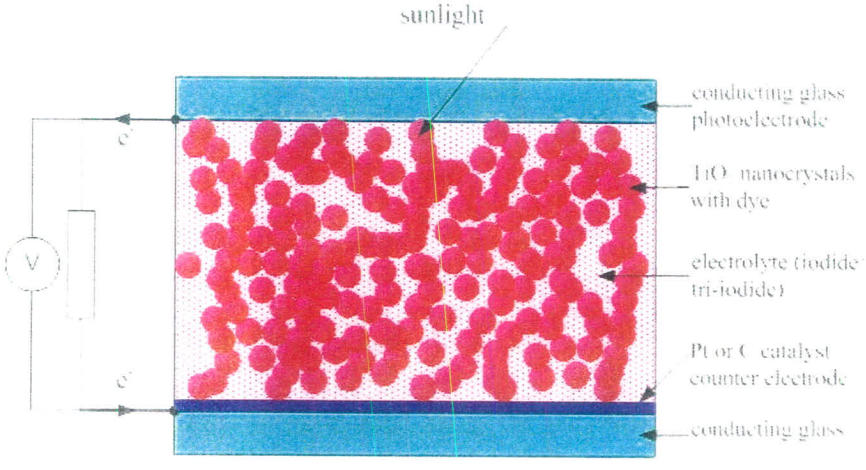
$$\text{อิเล็กโตรไลท์ } (I_3^-) + e^- \text{ (จากขั้วพลาทินัม)} \rightarrow \text{ อิเล็กโตรไลท์ } (I^-) \quad (2.4)$$

ปฏิกิริยารวม

$$e^- \text{ (จากขั้วพลาทินัม)} + h\upsilon \rightarrow e^- \text{ (ให้โลหะออกไซด์)} \quad (2.5)$$

2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงมีโครงสร้างที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคของ TiO_2 โครงผลึกนาโน และอิเล็กโตรไลท์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก ดังภาพที่ 2.2 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญ ดังนี้ [21-22]



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ TiO_2 และอิเล็กโตรไลท์ของเหลว [19]

2.2.1 สีย้อมไวแสง

ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับโลหะออกไซด์ ดังนั้นจะต้องมีสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตามองเห็น 400 – 700 นาโนเมตร และใกล้อินฟาเรด เพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจับแสงโฟตอนที่มาตกกระทบ มีคุณสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดซ์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี มีราคาถูกและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งปกติแล้วมักใช้โมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียม (Ru) กับลิแกนด์ในกลุ่มของโพลีไพริดีน (polypyridine) เนื่องจากว่าสารดังกล่าวมีราคาแพง

2.2.2 ชั้นของอนุภาคของโลหะออกไซด์

ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน ต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (wind band gap semiconductor) (มากกว่า 3 eV) และมักถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นรูพรุนสูง (high porous) สำหรับการยึดเกาะของโมเลกุลสีย้อมไวแสง ทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากต้องการให้โมเลกุลของสีย้อมมีการดูดกลืนแสงให้ได้มากที่สุด สารกึ่งตัวนำที่ใช้ควรจะไม่ดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น ทำให้ต้องเลือกแถบช่องว่างพลังงานกว้าง และระดับพลังงานของขอบล่างของแถบการนำ (conduction band edge) ควรจะมีค่าน้อยกว่าค่าระดับพลังงานที่สถานะถูกกระตุ้นของโมเลกุลของสีย้อม เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอน จากโมเลกุลของเม็ดสีมายังสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ได้แก่ TiO_2, SnO_2, ZnO, Fe_3O_4, NiO และ SiO_2 เป็นต้น

2.2.3 สารละลายอิเล็กโตรไลท์

สารละลายอิเล็กโตรไลท์หรือตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสง หรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด สารละลายอิเล็กโตรไลท์จะอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่ดีมีดังนี้ ไม่ดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน – ออกซิเดชันได้ง่าย เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่เม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็ว มีอายุการใช้งานยาวนานไม่ก่อ ให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นภายในเซลล์ สารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง คือ สารละลายอิเล็กโตรไลท์ในระบบที่ได้จากการแตกตัวของสารไอโอดีน (I_2) โดยจะมีประสิทธิภาพในการให้อิเล็กตรอนกับเม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้เป็นอย่างดี

2.2.4 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนด ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอน (electron transfer) ไปสู่วงจรภายนอก นิยมใช้ fluoride doped tin oxide (FTO) และขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กโตรไลท์ ต้องนำไฟฟ้าที่ดี มีความเป็นรูพรุนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา จะต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วย และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กโตรไลท์ต่ำ นิยมใช้โลหะแพททินัม (Pt) แต่เนื่องจากโลหะแพททินัมมีราคาแพงอาจจะใช้วัสดุอื่นแทน เช่น ผงคาร์บอน ท่อคาร์บอนนาโนหรือแกรไฟต์

2.3 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

สำหรับแนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ให้มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น อาจจะสรุปได้ 3 แนวทาง [23] ดังนี้

2.3.1 การพัฒนาสีย้อมไวแสง

การพัฒนาสีย้อมไวแสง สามารถแบ่งเป็น 3 แนวทางหลัก คือ ก) หาสีย้อมไวแสงชนิดใหม่ ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงกว้าง ตั้งแต่ช่วงแสงตาเห็นจนถึงแสงใกล้อินฟราเรด เพื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในสภาวะเร้าให้มากที่สุด ข) เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสีย้อมไวแสงกับพื้นผิวของโลหะออกไซด์ เพื่อเพิ่มปริมาณสีย้อมไวแสงให้เกาะกับโลหะออกไซด์ ในปริมาณมาก และ ค) เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ เพื่อไม่ให้มีการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอน จากแนวทางดังกล่าวสามารถจำแนกสีย้อมไวแสงออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

2.3.1.1 กลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวก สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียมกับลิแกนด์ โพลีไพริดีน สีย้อมกลุ่มไวแสงกลุ่มนี้ได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนามาอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก รูเทเนียมเป็นโลหะมีความต่างศักย์รีดอกซ์สูง เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคนาโน ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ออกไซด์ได้ดี Grätzel และคณะ เป็นกลุ่มวิจัยแรกที่ประสบความสำเร็จอย่างมากในการพัฒนาสีย้อมไวแสงประเภทนี้ โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของ โลหะรูเทเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีนหรือ อนุพันธ์ของโพลีไพริดีน โดยลิแกนด์โพลีไพริดีนจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH) เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลและมีความสามารถดูดซับบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ ได้แก่ N3 dye และ N719 dye พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมไวแสงกลุ่มนี้พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมสูงถึง 10.4 % มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนา

สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนโมเลกุลและที่มีหมู่ลิแกนด์ไพร์โรล และไธโอฟีนเพิ่มขึ้นมา แม้ว่าการใช้สารประกอบเชิงซ้อนกลุ่มโลหะรูเทเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีนจะให้ประสิทธิภาพรวมสูง แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอาทิตย์ที่แคบ การสังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์ยาก และยังมีราคาแพง จึงมีการศึกษาและทดลองใช้สีย้อมไวแสงชนิดอื่น ๆ แทน

2.3.1.2 กลุ่มสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ เป็นการนำสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติหรืออาจจะสังเคราะห์ขึ้นมาใช้เป็นสีย้อมไวแสงส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันยาว และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง ตัวอย่างสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ เช่น โมเลกุล เป็นอนุพันธ์ของเคามาริน (coumarin) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมประมาณ 7.7% นอกจากนี้ยังมีอีกกลุ่มหนึ่งที่น่าสนใจคือ สารกลุ่มเพอริลีน (perylene dye) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกันกับอนุพันธ์ของเคามาริน แม้ว่าสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ให้ประสิทธิภาพรวมต่ำกว่ากลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียม แต่ยังคงได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เพราะมีราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย และมีความเป็นพิษต่ำ

2.3.1.3 กลุ่มสีย้อมไวแสงพอร์ไพริน สีย้อมชนิดนี้พัฒนามาจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นโครโมฟอร์ที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยในปี ค.ศ. 1993 Grätzel [24] ได้สังเคราะห์อนุพันธ์พอร์ไพรินเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดกลืนแสงบนตัวดูดซับไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าสีย้อมไวแสง Cu-MP ให้ประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 2.6 % ในปี ค. ศ. 1996 Boschloo และ Goossens [25] ได้สังเคราะห์พอร์ไพริน Zn-TCPP พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมประมาณ 1.1% ต่อมาในปี ค. ศ. 2000 Cherian และ Wamser [26] ใช้ TCPP ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ Zn-TCPP แต่ปราศจากโลหะ Zn เป็นโมเลกุลสีย้อมไวแสง พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมเพิ่มเป็น 3.5% และในปี 2004 [27] สังเคราะห์พอร์ไพริน meso-linkes สาร Zn-1a, Zn-1b และ Zn-1c พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมของ Zn-1b สูงถึง 4.2 % แม้ว่าประสิทธิภาพรวมของสีย้อมกลุ่มพอร์ไพรินจะมีค่าต่ำกว่าของสีย้อมกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียมมากแต่การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงพอร์ไพริน สามารถปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลได้ง่าย และมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพไปในทางที่ดีขึ้น ทำให้ในปัจจุบันสีย้อมไวแสงพอร์ไพรินยังคงได้รับความสนใจศึกษาอยู่อย่างต่อเนื่อง

2.3.2 การพัฒนาระบบอิเล็กโตรไลท์

ระบบอิเล็กโตรไลท์เป็นส่วนสำคัญที่ต้องได้รับการพัฒนาเช่นกัน เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับผลิตในเชิงการค้า ในระยะเริ่มแรก ระบบอิเล็กโตรไลท์เป็นระบบที่เตรียมได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก คือ อิเล็กโตรไลท์ของเหลว มีส่วนประกอบของ คู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ของไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์ (I^-/I_3^-) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซีโตรไนไตร์ โพรพิโอไนไตร์ เมทรอกซีอะซีโตรไนไตร์ โพรพีลีนคาร์บอเนต เป็นต้น ในปัจจุบันอิเล็กโตรไลท์ชนิดนี้ สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงกว่า 10 % ทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขนส่งของไอออนที่รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาการหายไปหรือรั่วซึมของสารละลายออกจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวม อายุการใช้งานและความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงลดลง ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลท์ของเหลว และต้องได้รับการแก้ไขให้แล้วเสร็จก่อนที่จะผลักดันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงออกสู่การผลิตในเชิงพานิชย์ต่อไป จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่ระบบอิเล็กโตรไลท์ของเหลวไอออนิก ที่มีจุดเดือดสูงขึ้น มีการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อนที่ดี และไม่ติดไฟ ระบบอิเล็กโตรไลท์ของเหลวไอออนิกที่นิยมใช้คือสารประกอบของ imidazolium แม้ว่าระบบอิเล็กโตรไลท์นี้จะสามารถแก้ไขปัญหาการระเหยได้ แต่ยังมีปัญหาการรั่วซึมอยู่ และให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าระบบอิเล็กโตรไลท์ของเหลว เพราะมีความหนืดสูง ทำให้ไอออนไอโอไดด์แพร่ตัวได้ช้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ยังไม่สูงมากนัก (2 – 4 %) ต่อมาได้มีรายงานว่าระบบอิเล็กโตรไลท์ 1-methyl-3-propylimidazolium iodide, 1-methyl-3-ethylimidazolium dicyanamide และ lithium iodide สามารถให้ประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นเป็น 6.6 % เมื่อนำไปประกอบรวมกับเซลล์ที่ใช้สีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะรูเทเนียม การเติม lithium iodide สามารถเพิ่มประสิทธิภาพรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของ electron injection yield และ dye regeneration rate ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของ อิเล็กโตรไลท์เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าระบบอิเล็กโตรไลท์ของเหลวที่ไม่ระเหยส่วนใหญ่จะใช้ไอโอไดด์ แต่ประสิทธิภาพรวมที่ได้ก็ยังไม่สูงมากนัก ทำให้ยังมีการพัฒนาระบบอิเล็กโตรไลท์อย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบอิเล็กโตรไลท์ที่ปราศจากตัวทำละลายของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ $SeCN^-/(SeCN)^{3-}$ ซึ่งมีความหนืดที่ต่ำกว่าระบบอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้ imidazolium iodide มาก (ประมาณ 45 เท่า) สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงมากถึง 7.5–8.3 % ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5ระบบอิเล็กโตรไลท์อีกระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา คือ โพลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ มีจุดเด่นสำคัญในเรื่องการนำพาไอออนที่สูงกว่าของไหล และสามารถแข็งตัวได้ง่าย โดยโพลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์มีลักษณะเป็นเจล ที่มีโครงสร้างแบบโครงร่างแหสามมิติ เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโตรไลท์แบบแข็งและชั้นรูพรุนระดับนาโนของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์

นอกจากนี้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และไม่มีขั้นตอนซับซ้อน ในปัจจุบันนิยมใช้ poly (ethyleneglycol) (PEG) และ poly(ethylene oxide) (PEO) เป็นโพลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ และพบว่าการใช้ประโยชน์โพลิเมอร์ร่างแหแบบเจลของ PEO segments ในการทำโคโพลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์สามารถให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงสุดเท่ากับ 8.1 % ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ โดยการเพิ่มความหนาของชั้นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ การปรับปรุงสัดส่วน ความหนืด และค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย และสามารถเติม oligomers หรือ plasticizers อสัณฐานเข้าไปใน อิเล็กโตรไลต์โพลิเมอร์ เพื่อเพิ่มการนำพาไอออน และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคสีย้อม ไวแสงกับโพลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ นอกจากนั้นมีการพัฒนาอิเล็กโตรไลท์เจลแบบนาโนคอมพอสิท พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 7 % นอกจากระบบอิเล็กโตรไลท์ที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีระบบ อิเล็กโตรไลท์อีกระบบที่น่าสนใจ คือ ระบบอิเล็กโตรไลท์ฟิล์มบาง (thin-film solid-electrolytes) หรือตัวส่งผ่านประจุบวก (hole conductors) โดยจะเป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นตัวส่งผ่านประจุบวก เช่น โมเลกุลคาร์บาโซล (carbazole) อิเล็กโตรไลท์ระบบนี้ จะไม่มีปัญหาการรั่วซึมหรือการระเหยของอิเล็กโตรไลท์ และมีอายุการใช้งานนาน จากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบอิเล็กโตรไลท์ ยังคงต้องได้รับการพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อม ไวแสงให้สูงขึ้น ตัวอย่างประสิทธิภาพรวมอิเล็กโตรไลท์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ดังสรุป ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพรวมอิเล็กโตรไลท์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

สารกึ่งตัวนำ	อิเล็กโตรไลท์	η_{global} (%)	ความเข้มแสง (mW/cm^2)	เอกสารอ้างอิง (Ref)
TiO_2	P(VDF-HFP)	8.35	100 (AM 1.5)	[28]
TiO_2	P(MMA-co-MAA)/PEG	4.85	100 (AM 1.5)	[29]
TiO_2	PEO	0.77	100 (AM 1.5)	[30]
TiO_2	PVD-HFP	>6	100(AM 1.5)	[31]
TiO_2	EC+PC	4.79	100(AM 1.5)	[32]
	BL+EC	4.96	100(AM 1.5)	
	BL+PC	4.41	100(AM 1.5)	

2.3.3 การพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เพื่อให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงสุดชั้นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ จะต้องมีเสถียรภาพสูง มีพลังงานแถบช่องว่าง (E_g) ที่กว้าง มีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้โมเลกุลสีย้อมยึดเกาะได้ในปริมาณมาก มีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอเพื่อให้การแพร่ผ่านของไอออนอิเล็กโตรไลท์ได้ดี และแต่ละอนุภาคจะต้องเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถแพร่ผ่านได้ดี อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่กลุ่มของ Grätzel [25] เลือกใช้ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงครั้งแรก คือ อนุภาคผลึกนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างกว้าง ประมาณ 3.2 eV มีเสถียรภาพสูง ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จึงได้มีความพยายามที่จะเปลี่ยนอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องกว้างชนิดอื่น ๆ แทน เช่น ทินออกไซด์ (SnO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) และสตรอนเชียมไททาเนต ($SrTiO_3$) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้สารกึ่งตัวนำผสมระหว่าง ทินออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมชนิด N3 ให้ประสิทธิภาพรวม เท่ากับ 8 % ที่ความเข้มแสง 90 mW/cm^2 ในปัจจุบันอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ยังคงเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพรวมสูงสุด นอกจากการเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำ แล้วแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสง คือ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของสารกึ่งตัวนำ ทั้งเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้ปริมาณโมเลกุลสีย้อมไวแสงสามารถยึดเกาะได้มากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวของช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ และเพิ่มระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้น เพื่อลดการเกิดการรีคอมไบเนชันของประจุ โดยในปี ค.ศ. 2005 Law และคณะ [33] พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสง N719 ดูดซับบนเส้นลวด นาโนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจาก ลวดนาโนช่วยให้ส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น และลวด นาโนมีพื้นที่ผิวสูง และในปี ค.ศ. 2006 Baxter และ Aydil [34] สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมไวแสง N719 ดูดซับบนลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด 0.7 – 0.8 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 3 mA/cm^2 และมีประสิทธิภาพรวม 1.1 % ลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับความสนใจศึกษา เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีค่าพลังงานแถบช่องว่างใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีกระบวนเตรียมให้อยู่ในรูปของลวดนาโนง่ายกว่า

2.4 ข้อดีและข้อที่ต้องปรับปรุงของเซลล์แสงอาทิตย์ TiO_2

2.4.1 ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงผลึกนาโน

เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงผลึกนาโน มีประสิทธิภาพการผันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 11.18 % [35] ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดังเดิมที่ผลิตจาก amorphous (Si) กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงผลึกนาโน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม พบว่าผลิตได้ง่ายไม่จำเป็นต้องใช้ clean room เหมือน Si-based วัสดุที่ใช้ผลิตมีมาก ราคาถูก และใช้น้อยมาก ทั้งสีย้อมไวแสง (dye) และ TiO_2 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นแบบฟิล์มบาง ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสีต่าง ๆ ตามชนิดของสีย้อมไวแสง สามารถใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประดับอาคารได้ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมทั้งขบวนการผลิต เนื่องจากไม่มีการโดป และการ ใช้งาน ไม่มีการใช้เชื้อเพลิงที่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำมัน ถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เมื่อเซลล์หมดอายุการใช้งานสามารถนำมาใช้ได้อีก โดยการล้าง electrode ด้วยสารละลาย alkali แล้วนำแผ่นแก้ว electrode ไปใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ได้อีก

2.4.2 ข้อที่ต้องการปรับปรุงของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงสร้างนาโน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่ผลิตจาก GaAs พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO_2 โครงผลึกนาโนมีประสิทธิภาพต่ำกว่า และเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจะขึ้นอยู่กับชนิดของสาร electrolyte คือ เซลล์สีย้อมไวแสงที่ใช้ liquid electrolyte จะมีเสถียรภาพต่ำกว่าเซลล์สีย้อมไวแสงที่ใช้ solid-state electrolyte หรือ quasi solid-state electrolyte (polymer electrolyte)

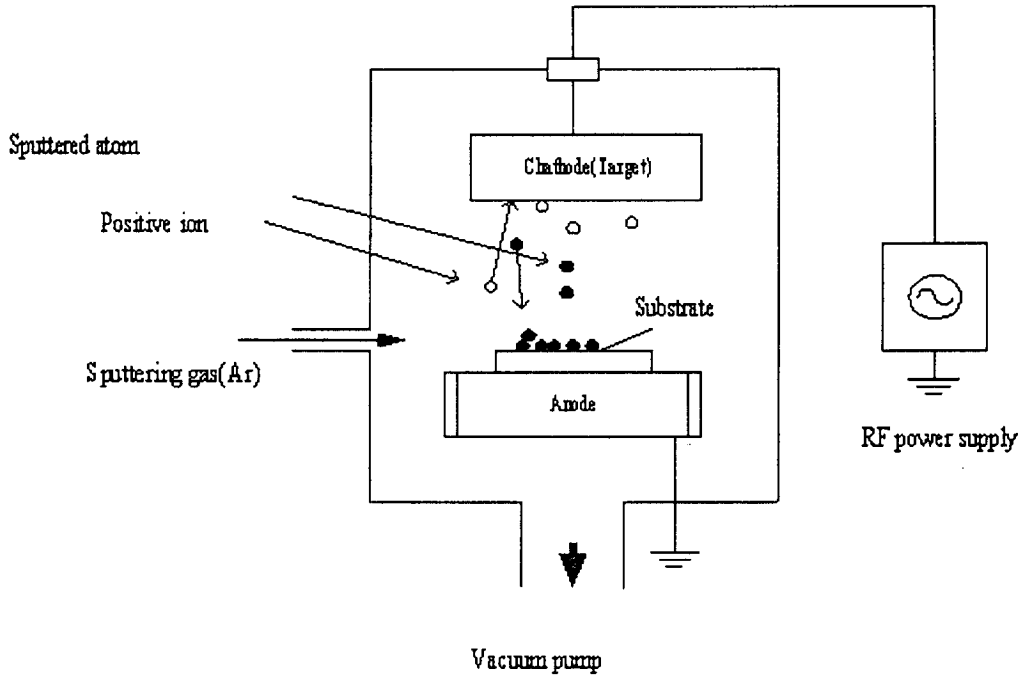
2.5 การเตรียมฐานรองแก้วและการสังเคราะห์ฟิล์มบาง TiO_2

แก้วที่ใช้เป็นฐานรอง (substrate) ในการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง คือ transparent conducting oxide glass (FTO หรือ TCO glass) ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี มีความต้านทานภายในต่ำและแสงสามารถทะลุผ่านได้ เป็นการเคลือบสารที่สามารถทำหน้าที่ electrode ได้ดีให้เป็นฟิล์มบาง (thin film) บนฐานรอง sodalime glass กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางมีหลายกระบวนการ เช่น sputtering techniques, spray pyrolysis process, chemical vapor deposition (CVD) เป็นต้น ซึ่งวิธี CVD นี้เป็นการสังเคราะห์อนุภาคนาโน TiO_2 โดยการทำให้อะตอม

ของไททาเนียมหลุดออกโดยใช้ความร้อนหรือพลาสมา จากนั้นอะตอมของไททาเนียมจะระเหยเป็นไอ แล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ก่อนที่จะไปกระทบที่แผ่นฐานรอง วิธี CVD นี้มีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการทำให้อะตอมของไททาเนียมหลุด และขั้นตอนที่สองเป็นการสังเคราะห์อนุภาคนาโน TiO_2 โดยทั่วไปเมื่อตกกระทบที่ผิวของแผ่นฐานรองจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบาง ในงานวิจัยนี้จะขอยกตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางพอสังเขป ดังนี้

2.5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ In-Sn-O ด้วยวิธี sputtering

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ In-Sn-O ระบบ คือ planar magnetron sputtering เป้าที่ใช้ คือ InO_2 : SnO ด้วยสัดส่วน 90 : 10 บดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตามด้วยการอบร้อน (annealing) ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นอัดเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว ขั้นตอนสุดท้ายนำไปผ่านการอบร้อน ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อทำให้เย็นลงจะได้เป้า (target) เพื่อใช้เป็นเป้าสำหรับกระบวนการ sputtering ระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ vacuum chamber, Edward 350 เริ่มต้นโดยการทำความสะอาดภายใน chamber ใส่เป้าใน sputtering gun ตามด้วยการใส่แก้วฐานรอง ที่ได้ผ่านการทำความสะอาดแล้ว start vacuum system เพื่อสร้างสุญญากาศใน chamber เมื่อความดันถึง 5.5×10^{-5} mbar ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบเพื่อสร้าง plasma process ปรับก๊าซอาร์กอนเพื่อให้ได้ความดัน 4.2×10^{-2} mbar เปิดระบบ RF-Power ที่ 270 W ปล่อยให้มีการสปัตเตอร์เพื่อให้เกิดการเคลือบที่สม่ำเสมอ กด shutter เพื่อทำการเคลือบจับเวลาที่ทำการเคลือบ เสร็จปิดระบบ RF-Power ปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนเพื่อไม่ให้ก๊าซอาร์กอนไหลเข้าสู่ระบบ vent ให้อากาศเข้าเพื่อให้ความดันภายใน chamber เท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก นำตัวอย่างออกจาก chamber



ภาพที่ 2.3 sputtering system สำหรับการเคลือบฟิล์มบาง In-Sn-O [19]

2.5.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบางแบบ dip coating

การเตรียมฟิล์มบางโดยการใช้เทคนิคการ dip coating ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น วัสดุที่เป็นฐานรอง ลักษณะของพื้นผิวฟิล์มในการเคลือบ รูปแบบของฟิล์มที่ต้องการและปัจจัยหลายอย่างอีก เช่น ความหนาของฟิล์มและอุณหภูมิในขณะเคลือบ กระบวนการ dip coating นั้นเป็นวิธีการเคลือบที่จุ่มแผ่นฐานรองลงไปอย่างช้า ๆ ในของเหลว แล้วค่อย ๆ ดึงขึ้นอย่างช้า ๆ จากภาชนะที่บรรจุของเหลว อัตราเร็วในการเคลือบขึ้นอยู่กับที่จะกำหนดรูปแบบการเคลือบฟิล์มนั้น ๆ กระบวนการเคลือบเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์โดยการคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ [36]

2.6 การเตรียมอนุภาคนาโนและฟิล์มบางของ TiO_2

2.6.1 การเตรียมอนุภาคนาโนของ TiO_2 ด้วยวิธี sol-gel

กระบวนการเตรียมทั้งหมดอยู่ภายในไนโตรเจน glove box เริ่มต้นด้วยการใช้สารละลาย $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$ เติมลงใน propanal ครั้งละหยด แล้วเติม DI water (deionized water) กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนนาน 10 นาที จะเห็นตะกอนสีขาวเกิดขึ้น จากนั้นเติม HNO_3 ความเข้มข้น 65 % ปริมาตร 1 ml ลงไปแล้วกวนต่ออีกนาน 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยใน

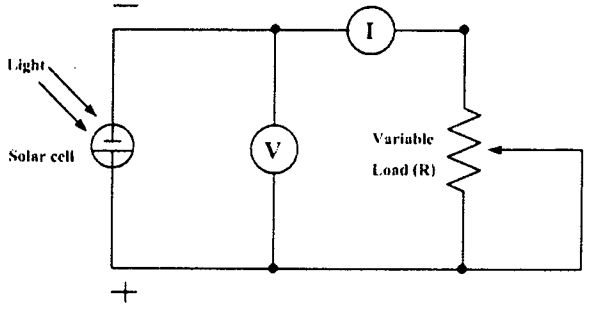
ขั้นตอนนี้น้ำและ propanal จะระเหยออกไปจะได้สารละลายคอลลอยด์ของ TiO_2 แล้วนำสารละลาย TiO_2 ไปทำให้เข้มข้นโดยการระเหยของน้ำในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องจนได้ของเหลวหนืดของ TiO_2 แล้วเติม Carbowax M-20000 ประมาณ 40 % โดยน้ำหนักของ TiO_2 จะได้ sol-gel ของ TiO_2 [19]

2.6.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ TiO_2 ด้วยวิธี screen printing

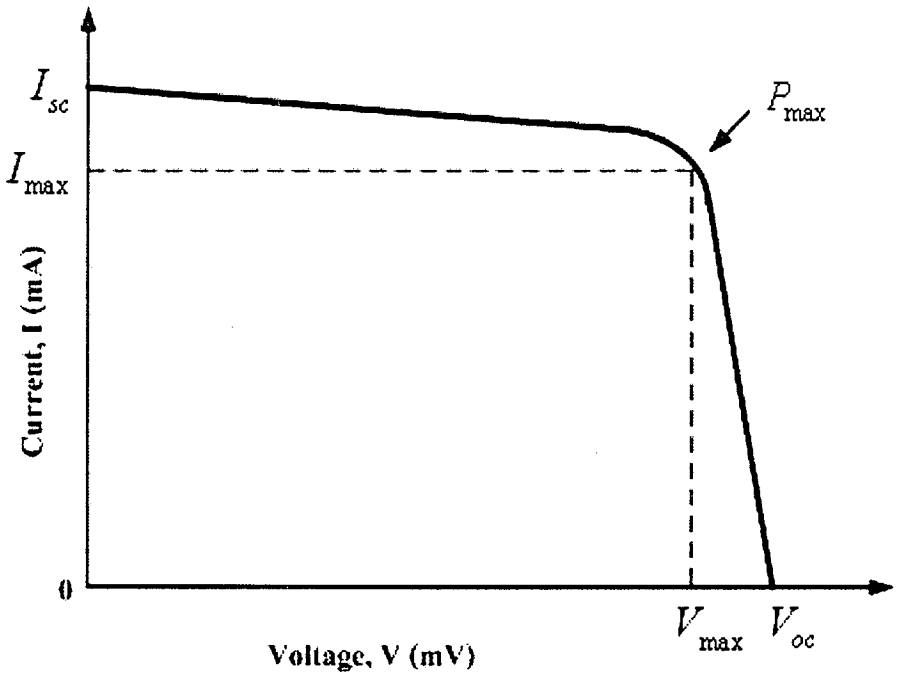
เติมสารละลายกรดไนตริก (pH 3-4 ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน) ปริมาณ 9 ml ลงใน TiO_2 ปริมาณ 6 g บดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 30 นาที แล้วเติมสาร surfactant (such as clear dish detergent or Triton X 100) บดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันต่อไปอีกใช้เวลา 30 นาที จะได้สารแขวนลอยของ TiO_2 หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยของ TiO_2 เก็บไว้ในขวดเก็บสารที่ปิดฝาให้แน่นใช้เวลา 15 นาที จึงนำสารแขวนลอยของ TiO_2 วางบนแก้ว TCO ที่เตรียมไว้แล้วกลิ้ง rod coaterไปมาเพื่อกระจาย TiO_2 ให้สม่ำเสมอปล่อยให้ฟิล์มแห้งใช้เวลา 45 นาที นำฟิล์มไปบำบัดความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 °C ใช้เวลา 30 นาที เมื่อฟิล์มเย็นตัวลงจะได้ฟิล์มบางของ TiO_2 [19]

2.7 การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

การทดสอบและหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปนิยมวัด I-V characteristic หรือ I-V curve เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหา ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor; FF) และประสิทธิภาพการผันพลังงาน (energy conversion efficiency, η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve มี 2 แบบ ดังนี้ การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve แบบที่ 1 ดังภาพที่ 2.4 อุปกรณ์ประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำการวัด แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ (Agilent 34401A Digital Multimeter) และตัวต้านทานปรับค่าได้ เมื่อต่อวงจรให้สมบูรณ์สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า (current, I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage, V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ฟ้าไปเขียนกราฟจะได้กราฟ I-V curve ดังภาพที่ 2.5

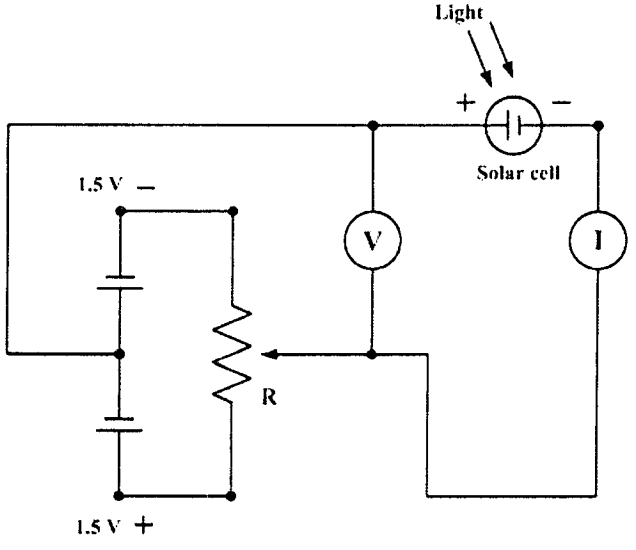


ภาพที่ 2.4 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบที่ 1 [19]



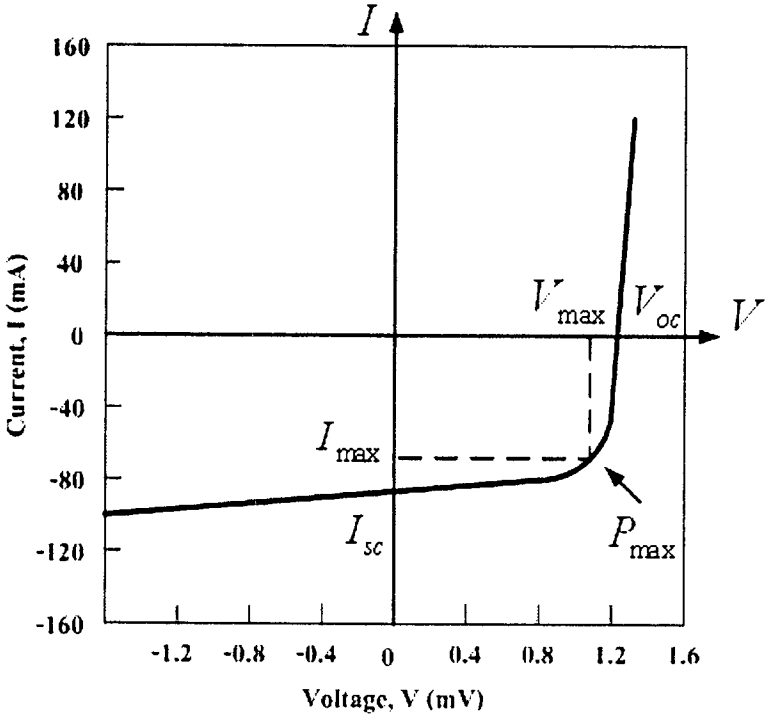
ภาพที่ 2.5 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการต่อวงจรแบบที่ 1 [19]

การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve แบบที่ 2 ดังภาพที่ 2.6 เป็นวงจรที่ใช้ bias เซลล์เกินกว่ากำลังที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ เป็นวงจรที่มีอยู่ในเครื่องมือที่ใช้ทดสอบและหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มาตรฐาน เช่น เครื่อง IV- test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เป็นต้น เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไปเขียนกราฟจะได้กราฟ I-V curve ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.6 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบที่ 2 [19]

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงด้วยค่าต่าง ๆ [19] ดังนี้ จากภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.7 จุดที่กราฟตัดแกนแรงดันไฟฟ้า คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage, V_{oc}) เป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานของวงจรสูงสุดและกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้า คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit current, I_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้า เมื่อความต้านทานของวงจรต่ำสุดหรือเท่ากับศูนย์และแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์กำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power, P_{max}) ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟนี้ แสดงด้วยเส้นไข่ปลา ดังภาพที่ 2.5 และ 2.7



ภาพที่ 2.7 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการต่อวงจรแบบที่ 2 [19]

ถ้าให้ V_{max} (maximum voltage) และ I_{max} (maximum current) คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุด ตามลำดับ ที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{max} = (V \times I)_{max} \tag{2.6}$$

2.7.1 ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor, FF)

เป็นอัตราส่วนของพื้นที่ของ $V_{\max} \times I_{\max}$ ต่อพื้นที่ของ $V_{oc} \times I_{sc}$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{(V \times I)_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \tag{2.7}$$

2.7.2 ประสิทธิภาพการผันพลังงาน (energy conversion efficiency, η)

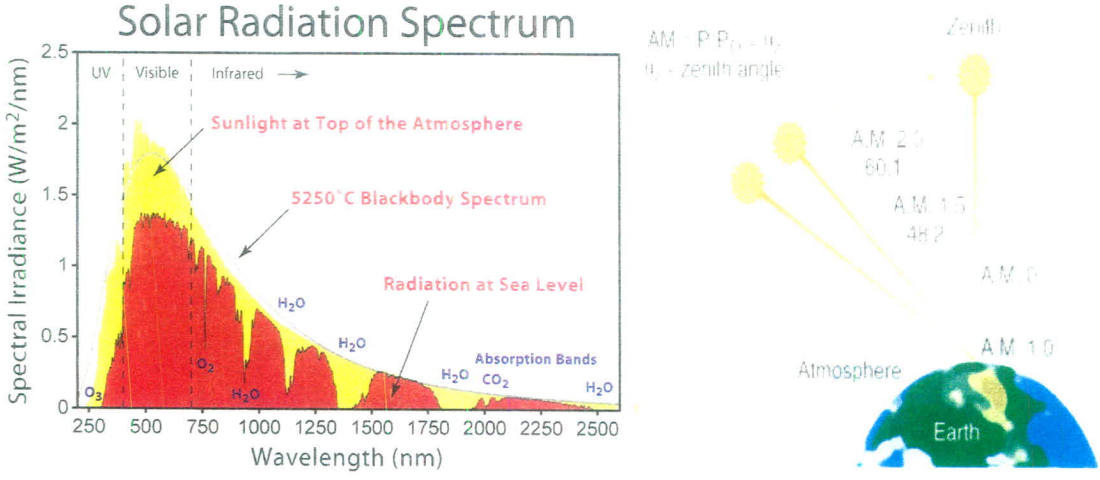
ประสิทธิภาพการผันพลังงานแสง ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{light}} \times 100\% = \frac{(V \times I)_{\max}}{P_{light}} \times 100\% = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{light}} \times 100\% \tag{2.8}$$

เมื่อ P_{light} คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วย วัตต์ (W)

2.8 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

เราสามารถอธิบายความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงผิวโลก ได้ในรูปของมวลอากาศ (Air Mass, AM) โดยค่า $AM = \frac{1}{\cos\theta_z}$ เมื่อ θ_z คือ มุม zenith เช่น เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี มีค่า $\theta_z = 0^o$ ดังนั้นมี AM เท่ากับ 1.0 สำหรับความเข้มแสงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศกำหนดเป็น AM 0.0 สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จะนิยมศึกษาภายใต้ความเข้มแสงตกกระทบ ที่ AM 1.5 ความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2 หรือ 1,000 W/cm^2 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ที่ AM 1.0 และ 1.5 แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ณ AM 1.0 และ 1.5 [37]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์เยื่อบางที่ทำด้วยวิธี ultra-thin poly(vinylidenefluoride-co-hexafluoro propylene) P(VDF–HFP) ได้ถูกเตรียมโดยกระบวนการ phase inversion เคลือบอิเล็กโทรดด้วย TiO_2 หลังจากนั้นนำไปแช่ด้วยสีย้อมไวแสง Ru N-719 เยื่อบางนี้ถูกแช่ในของเหลวอิเล็กโตรไลท์อินทรีย์ ซึ่งนักวิจัย [38] ได้รายงานผลการวิจัย พบว่าอิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์เยื่อบาง ultra-thin P(VDF–HFP) เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSCs) ที่ใช้อิเล็กโตรไลท์เยื่อบางได้ค่า V_{oc} = 0.751V, J_{sc} = 16.260 mA/cm^2 และ FF = 0.684 ภายใต้แสงตกกระทบ 1000 W/m^2 ประสิทธิภาพการผันพลังงาน (η) = 8.35 %, Voc, FF และ η ที่ใช้อิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์เยื่อบางเพิ่มขึ้นราว ๆ ประมาณ 5.8 %, 2.2 % และ 5.7 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสัดส่วนที่ใช้กับอิเล็กโตรไลท์ของเหลว อย่างไรก็ตาม J_{sc} จะลดลงประมาณ 2.1 % จากรายงานผลการศึกษาวิจัยของ P. J. Li and et al. (2007) [39] โดยใช้ poly(methyl methacrylate-*co*-methacrylate acid)/poly(ethyleneglycol) [P(MMA-*co*-MAA)/PEG] ที่ได้ถูกนำมาผสมกันเป็นของเหลวหนืด ประกอบด้วยปฏิกิริยาร่วมระหว่างโพลิเมอร์ methyl methacrylate (MMA) และ methacrylate acid (MAA) โดยใช้ azobisisobutyronitrile (AIBN) เป็นสารตั้งต้น ละลาย poly(ethylene glycol) (PEG) ในเมทานอล ของผสมเจลอิเล็กโตรไลท์ได้ถูกเตรียมโดยเติม KI และ I_2 กับ P(MMA-*co*-MAA)/PEG พบว่าผลของการทำเจลอิเล็กโตรไลท์นำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าของไอออนที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอภิปรายผลของการทำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ซึ่งพิสัยการนำไฟฟ้าได้สูง 2.70 mS/cm^2 ที่ 30 °C สำหรับของผสมเจลอิเล็กโตรไลท์กึ่งของแข็ง เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (QS-DSSCs) มี

ประสิทธิภาพการผันพลังงาน 4.85 % ภายใต้แสงตกกระทบ AM 1.5 ที่ 60 °C จากการรายงานผลการวิจัย [40] โดยใช้อิเล็กโตรไลท์ของแข็ง ได้แก่ พอลิอะนีลีน, พอลิพิโรล, คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต, คอปเปอร์ไอโอไดด์ และสารผสม PEO โดยทำการศึกษาสี 2 ชนิด คือสีสังเคราะห์จากสารเชิงซ้อนรูเทเนียม และสีการสกัดดอกกระเจี๊ยบ ซึ่งพบว่าเซลล์ที่ใช้สารผสม PEO เป็นอิเล็กโตรไลท์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ประกอบด้วยอิเล็กโตรไลท์ของแข็งชนิดอื่น ๆ และเมื่อนำเซลล์ผสม PEO มาศึกษาต่อโดยทำการเปรียบเทียบชนิดของโลหะที่เคลือบบนเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดได้แก่ Ag, Cu, C และ Pt ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วย พบว่าเซลล์ Pt เคลือบบนเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้โลหะอื่น ๆ โดยเซลล์ที่ใช้สีสังเคราะห์จากสารเชิงซ้อน รูเทเนียม และสีสกัดดอกกระเจี๊ยบมีค่ากระแสสูงสุด 3.65 และ 0.46 $mAcm^{-2}$ ค่าความต่างศักย์สูงสุด 700 และ 530 mV และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า 0.77 และ 0.19 % ตามลำดับ ที่ 100 mW/cm^2 (AM 1.5)

นอกจากนี้ X. Shen and et al. (2008) [41] ได้เตรียม อิเล็กโตรไลท์ โดยการเติมเกลือโลหะอัลคาไลด์ RI (R^+ =Li^+, Na^+, K^+, Rb^+ หรือ Cs^+) และละลาย I_2 ด้วย acetonitrile ลงใน poly (ethylene-oxide) (PEO). KI, RbI และ CsI ละลายไม่ดีในสารละลายอิเล็กโตรไลท์ แต่มันสามารถละลายได้หมดจดย่างสมบูรณ์ใน PEO เจลอิเล็กโตรไลท์ เนื่องจากอัตรกิริยาที่แข็งแรงของแคทไอออนกับสายโซ่ PEO เจลอิเล็กโตรไลท์ทุกชนิดแสดงสภาพการนำไฟฟ้าได้สูงในพิสัย 10^{-3} S/cm และมีส่วน ประกอบ I^- ที่ความเข้มข้น 0.3 M ผลของ R^+ ใน PEO เจลอิเล็กโตรไลท์ นำมาศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSCs) อิเล็กโตรไลท์กึ่งของแข็ง ผลแสดงให้เห็นว่า V_{oc} เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มรัศมีแคทไอออนของโลหะอัลคาไลด์ กรณีของ TiO_2 นี้อธิบายด้วย electron fermi level (E_F) โดยลดการแพร่ของ I_3^- และเพิ่มรัศมีของ R^+ และนอกจากนี้อิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์ [42] ได้ศึกษาถูกเตรียมโดย poly (acrylo nitrile -co-styrene)/NaI+I_2 และส่วนผสมตัวทำละลายทั้งสองเมื่อระบบประกอบด้วยโซเดียมไอโอไดน์ 0.5 M ไอโอดีน 0.05 M และ 4-tert-butylpyridine 0.5 M สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงสุด (ที่ 30 °C) 2.37 mS/cm เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อม ไวแสงอิเล็กโตรไลท์กึ่งของแข็งถูกสร้างขึ้นและมีประสิทธิภาพในการผันพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 2.75 % ภายใต้แสงตกกระทบ 60 mW/cm^2 อิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์ ที่ถูกได้เตรียมโดยการใช้ poly (acrylonitrile-co-styrene) เป็นโพลิเมอร์ [41] มี 1,2-propanediol carbonate, dimethyl carbonate และ ethylene carbonate เป็นตัวทำละลาย และ *N*-methyl-quinoline iodide และ iodine เป็นแหล่งที่ให้ I^-/I_3^- มีสภาพนำไฟฟ้า 5.12×10^{-3} S/m (ที่ 25 °C) เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงบนพื้นฐาน อิเล็กโตรไลท์ถูกสร้างขึ้นมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพในการผันพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 4.04 % ภายใต้แสงตกกระทบ 100 mW/cm^2

M. Grätzel and et al. (2003) [42] ได้พัฒนา quasi solid – state electrolyte โดยใช้ polymer gel เป็น electrolyte ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง กลุ่มนี้ใช้ fluorine polymer, poly (vinylidenefluoride – co – hexafluoropropylene, (PVDF – HFP) เพื่อทำให้ liquid electrolytes 3 – methoxypropionitrile (MPN) กลายเป็น quasi solid – state gel electrolyte พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพมากกว่า 6 % นอกจากนี้เซลล์ยังมีเสถียรภาพภายใต้ความร้อนสูง กล่าวคือ เมื่อเซลล์ถูกทำให้ร้อนที่ 80 °C เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง เซลล์รักษาประสิทธิภาพได้ 94 % ของประสิทธิภาพเริ่มต้น และเสถียรภาพดีเยี่ยมที่อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่ solar simulator 100 mW/cm^2 นอกจากนั้น gelator ซึ่งเป็นส่วนผสมของ 1 – methyl – 3 – propylimidazolium, I_2, and 1,2,4,5 – tetrakisbromomethylbenzene. [43] เพื่อทำให้ electrolyte มีสภาพเป็น polymerization พบว่า ได้ประสิทธิภาพ 73 % เมื่อเทียบกับ liquid electrolyte ที่มีประสิทธิภาพ 7.8 % สรุปว่าการทำให้ liquid electrolyte กลายเป็น quasi solid – state electrolyte ด้วยวิธีนี้ (วิธี gelation) ไม่ทำให้เกิดการ suppress ต่อการ diffusion ของ I^- และ I_3^- ไอออนใน electrolyte F.S. Chang and et al. (2007) [44] รายงานผลการเตรียมเจลที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเตรียมจาก $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$ สารละลายกรดไนตริก 0.1 M. คนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นเติมโพลีเอทิลีนไกคลอล (PEG, มวลโมเลกุล 20,000) จากนั้นนำไปเคลือบโดยวิธี dip-coating หรือ spin-coating บนแผ่นแก้วตัวนำ จาก F : SnO_2 ฟลูออรีน หรือ ดีบุกออกไซด์ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 30 นาที นำไปย้อมสีในสารละลาย เอทานอล รูเทเนียม (cis – bis (isothiocyanato)) bis (2,2-bipyridyl – 4,4 – dicarboxylato) – Ru สำหรับการเตรียมโพลิเมอร์จะใช้เอทิลีนคาร์บอเนต (EC)โพรพิลีนคาร์บอเนต (PC) บิวทิโรแลคโตน (BL) และเติมไอโอไดด์ (I_2) ที่อุณหภูมิห้องเพื่อป้องกันสารละลายระเหย พบว่าความแตกต่างของการนำไฟฟ้าที่มีพลาสติกเป็นส่วนประกอบ คือ (EC+PC) (BL+EC) และ (BL+PC) จะได้ 4.79 % 4.96 % และ 4.41 % ตามลำดับ

ดังนั้นการพัฒนา solid – state electrolyte ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง จึงมีความสำคัญต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพระยะยาวของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง อย่างไรก็ตามอาจมีความลำบากที่จะต้องทำให้เกิด solid – state interface ที่ดีที่จะได้ high solar cell performance

จรัชญา บุญเสริม, สุธัญญา วงศ์กาศ (2556) [45] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์โดยใช้กระบวนการเคลือบแอโนด เพื่อหาสภาวะที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเปรียบเทียบรูปแบบการจัดเรียงเซลล์แบบแคโทดขนานกับแอโนดและแบบแคโทดโค้งงอรอบแอโนด ซึ่งใช้สารละลายอิเล็กโตรไลท์เอทีลีนไกลคอล ที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมฟลูออไรด์ 0.38 % โดยน้ำหนัก และน้ำ 1.79 % โดยน้ำหนัก สังเคราะห์ภายใต้ศักย์ไฟฟ้า 40, 50 และ 60 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปเผาที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ การสังเคราะห์ ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการจัดเรียงเซลล์แบบแคโทดขนานกับแอโนดจะให้ฟิล์มที่ลอกหลุดออก แต่การสังเคราะห์โดยจัดเรียงเซลล์แบบแคโทดโค้งงอรอบแอโนดที่ ศักย์ไฟฟ้า 40 โวลต์ จะให้ฟิล์มที่ยึดติดกับแผ่นไททาเนียม จากการวัดประสิทธิภาพเซลล์ย้อมสีไวแสงที่มีพื้นที่ 0.5 x 0.5 ตารางเซนติเมตร ภายใต้แสง (AM 1.5, P_{in} 100 mW/cm^2) เมื่อนำไปวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็น พลังงานไฟฟ้า พบว่าชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้และผ่านการเผามีประสิทธิภาพสูงถึง 1.1198 % ซึ่งมีความหนาแน่นของ กระแส 2.871 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันวงจรเปิด 0.794 โวลต์ และค่าฟิลแฟคเตอร์ 0.526 โดย ประสิทธิภาพที่ได้นี้มีค่าสูงเป็นเจ็ดเท่าของ P25 (ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีตามท้องตลาด)

จำนงค์ บุญลอย, สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ (2554) [46] ฟิล์มอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ถูกปลูกบน กระจกนำไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการสกรีนเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ความหนาของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เมื่อผ่านการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ AM 1.5 พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ความหนาของฟิล์มดีที่สุดคือ (15.72 μm) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ได้คือ 3.28 % (J_{sc}=7.31 mA/cm^2, V_{oc}= 0.73 V, FF = 0.61)

ชวิศร์ กรัณย์เมธากุล. (2554) [47] ไททาเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ในรูปผลึกอนาเทสสามารถสลายสารมลพิษในน้ำและอากาศโดยใช้แสงได้แต่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงของแสงยูวีจึงสามารถนำมาปรับช่วงของการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วงวิสิเบิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแสงอาทิตย์ได้โดย การปรับแต่งพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีdoping ด้วยอะตอมของธาตุซัลเฟอร์จากไทโอยูเรีย โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์กับไทโอยูเรียเป็น 1 : 4 และเผาภายใต้บรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำ มาพัฒนาประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์คะตะลิสต์โดยใช้การดูดซับด้วยไอออนของโลหะทรานซิชัน ได้แก่ Fe^{3+}, Cr^{3+} และ V^{3+} หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มา

วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer - Emmett-Teller (BET), X-ray Powder Diffraction (XRD) และ UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis) พบว่า อะตอมของธาตุซัลเฟอร์สามารถเลื่อนแถบการดูดกลืนแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ให้เข้ามาอยู่ในช่วงวิสิเบิลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่สูงขึ้นทำให้การดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ชลดา ธีรการุณวงศ์ (2555) [48] วัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและเซลล์เชื้อเพลิง ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถขึ้นรูปเกิดเป็นวัสดุ นาโนที่มีโครงสร้างแบบต่างๆ เช่น อนุภาคนาโน ท่อนาโน เส้นใยนาโน แผ่นนาโน นาโนริบบอน และลวดนาโน ซึ่งขนาดอนุภาคและโครงสร้างของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับวิธีและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ นอกจากนี้ การเจือวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยไอออนของโลหะ ออกไซด์ของโลหะ และธาตุกลุ่มอัลคาไลน์เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทบทวนเอกสารเรื่องวิธีการสังเคราะห์ ไททาเนียมไดออกไซด์และโครงสร้างที่ได้จากวิธีการสังเคราะห์นั้น พร้อมทั้งการประยุกต์ใช้งานไททาเนียมไดออกไซด์ ในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์

ธีรวัฒน์ พลายแสง ,ทนิวัฒน์ ผาจิระวัฒนชาติ (2555) [49] เทคนิคการเคลือบแอโนด 3 ขั้นตอน โดยมีสารเอทธิลีนไกลคอล กรดแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (0.38 wt%) และน้ำ (1.79 wt%) ภาวะที่เกิดรูพรุนในระดับนาโน อย่างเป็นระเบียบก็คือ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 50 โวลต์ ซึ่งพบว่าเวลาและศักย์ไฟฟ้าส่งผลต่อขนาดของรูพรุน

พึ่งบุญ ปานศิลา, ทองใส จำนงการ, ปรียาวัลย์ คูหา, รุ่งอรุณโรจน์ สุจจิตจูล (2555) [50] ฟิล์มบาง ไททาเนียมไดออกไซด์เตรียมด้วยระบบ ดีซี รีแอกตีฟ สปัตเตอริงบนกระจกสไลด์และซิลิกอนในขั้นตอนเดียว โดยไม่ให้ความร้อนกับวัสดุรองรับขณะเตรียม ภายใต้บรรยากาศของแก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจน เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งวางวัสดุรองรับที่ต่างกันต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์ม โดยควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนในระบบสปัตเตอร์ให้คงที่เท่ากับ 40% ของปริมาณแก๊สทั้งหมด วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ส่วนลักษณะสัณฐานและ ความหนาศึกษาด้วยเทคนิค AFM สำหรับสมบัติทางแสงของฟิล์มศึกษาจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งวางวัสดุรองรับมีผลอย่างยิ่งต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียม ได้ ฟิล์มที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (101) / รูไทล์ (110) และอนาเทส (101) ระนาบผลึกเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดเกรนความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มลดลง เมื่อวางวัสดุรองรับที่ตำแหน่งในแนวรัศมี (d_x) เพิ่มขึ้นสำหรับสมบัติทางแสงพบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้มีความใสสามารถส่งผ่านแสงในย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ดี

วัชรินกร เมฆา. (2550) [51] ได้สังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโนด้วยวิธีโซล-เจล พร้อมกับทำฟิล์มบางนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยเคลือบลงบนฐานรองแก้วด้วยเทคนิค dip-coating พบว่านาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นเฟสอนาเทสเป็นส่วนใหญ่

สุรศักดิ์ แสนทวีสุข. (2553) [52] เตรียมอิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์ โดยเติมเกลือไดโอไดด์ XI (X = potassium, lithium หรือ tetrapropylammonium (TPA)) และ I_2 ลงใน γ-butyrolactone แล้วนำมาผสม 1-methyl-3-propylimidazoliumiodide และ 1, 2, 4, 5 tetrakisbromomethylbenzene จนเป็นเจล อัตราส่วนของ XI : I_2 เป็น 10 : 1 KiI และ TPA ละลายได้ไม่ดีในของเหลวอิเล็กโตรไลท์ แต่สามารถละลายได้ดีใน ของเหลวอิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์ ค่านำสภาพไฟฟ้าสูงสุดของ KI อิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 30 °C เท่ากับ 2.37 mS/cm ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีไวยอมแสงด้วยอิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์พบว่าประสิทธิภาพการผัน พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์ที่เติม LiI KI และ TPA ภายใต้แสงตกกระทบ 100 mW/cm^2 คือ 1.90 % 2.16 % และ 2.05 % ตามลำดับ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงด้วยอิเล็กโตรไลท์โพลิเมอร์มีเสถียรภาพดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงด้วยอิเล็กโตรไลท์ของเหลว

รัฐพงษ์ นาคาไชย และคณะ (2554) [53] ศึกษากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่ต่างกันเป็นชั้นๆ จึงสามารถเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าได้ ซึ่งประกอบด้วยกระจกใสสองแผ่นที่นำไฟฟ้าได้ โดยกระจกแผ่นแรกจะนำมาเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และแผ่นที่สองจะเคลือบด้วยแพลททินัม ซึ่งทั้งสองแผ่นจะถูกเคลือบลงบนกระจกด้านที่นำไฟฟ้า จากนั้นนำด้าน ที่ถูกเคลือบมาประกบกันโดยให้ด้านที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์เป็นด้านที่สัมผัสแสง ในการทดลองครั้งนี้ใช้สารละลายอิเล็กโตรไลท์ คือ ไอโอดีน และได้ศึกษาการนำสารเคมีตระกูลอีโอซินวายมาเป็นสีย้อมไวแสง