



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงประสิทธิภาพสูง
Fabrication of High Efficient Dye Sensitized Solar Cells

ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงประสิทธิภาพสูง

Fabrication of High Efficient Dye Sensitized Solar Cells

ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

RCH
ร424ก
2560

b. 12870043
i.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **149076**
วันเดือนปี..... - 4 ต.ค. 2561

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)// การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงประสิทธิภาพสูง.....
 แหล่งเงิน// โครงการวิจัยเงินรายได้ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง.....
 ประจำปีงบประมาณ 2560..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 75,000..... บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560.....
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด.....
 นายราชศักดิ์ ตักดานุภาพ (หัวหน้าโครงการ) สังกัดวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell; DSSCs) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีกระบวนการที่ประดิษฐ์ง่าย มีราคาถูกและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการประดิษฐ์ DSSCs ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนด (Photoanode) ที่เตรียมจากไททาเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO₂) นำมาเคลือบลงบนกระจกที่นำไฟฟ้าได้ ได้แก่ Fluorine-doped tin oxide (FTO) และเลือกใช้สีย้อมไวแสงประเภทสารประกอบเชิงซ้อนของรูทีเนียม (N719) และใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด (Counter electrode) เป็นแพลทินัม (Pt) เคลือบลงบนกระจก FTO เช่นกัน และช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I-/I₃⁻) เพื่อให้เป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการเตรียม TiO₂ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาถึงโครงสร้างและสัณฐานวิทยา (Morphology) ของผง TiO₂ ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่าผง TiO₂ ที่เตรียมได้เป็นอะนาเทส (Anatase phase) ที่บริสุทธิ์ มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20 – 30 nm ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม มีพื้นผิวเป็นรูพรุนเล็กน้อย จากนั้นศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของ TiO₂ โดยวิธีการเคลือบด้วยมือ (Doctor blade) จากนั้นศึกษาถึงวิธีการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์และวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, ไททาเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน, ไฮโดรเทอร์มอล

Research Title: Fabrication of High Efficient Dye Sensitized Solar Cells.....
Researcher: Mr.Rachsak Sakdanuphab College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) has been interested due to their simple fabrication, low cost, and environmental friendly. In this work, the fabrication of DSSCs was studied. The structure of DSSC consists of anode electrode (FTO on glass), titanium dioxide nanoparticle (nano-particle TiO_2), N719 dye and cathode electrode (Pt on FTO glass). An electrolyte (I^-/I_3^-) is used for redox reaction in DSSC structure. In this work, synthesis of nano-particle TiO_2 by hydrothermal method was investigated. Microstructure and pore size were analyzed by X-ray diffraction technique and scanning electron microscope (SEM), respectively. The influence of screen printing process on thickness of TiO_2 films was studied by cross sectional images. In addition, DSSC fabrication and solar cell performance were considered.

Keywords : Dye Sensitized Solar Cell, Nano-particle TiO_2 and hydrothermal



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง ที่สนับสนุนทุนวิจัย จนทำให้รายงานฉบับนี้สมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ได้อ่านและผู้ที่เกี่ยวข้องโดยทั่วไป หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เขียนขอน้อมรับเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไข ต่อไป

นายราชศักดิ์ ศักดานุภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	7
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	
2.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของ DSSCs.....	8
2.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของ DSSCs.....	8
2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	9
2.1.3 แนวทางและทฤษฎีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	10
2.2 โทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ทำเป็นโฟโตอานอดสำหรับ DSSC.....	16
2.2.1 คุณสมบัติของโทเทเนียมไดออกไซด์.....	17
2.2.2 ประโยชน์ของโทเทเนียมไดออกไซด์.....	18
2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของโทเทเนียมไดออกไซด์.....	19
2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	19
2.3.2 X-ray Diffraction.....	22
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs.....	24
2.4.1 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve).....	24
2.4.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	25

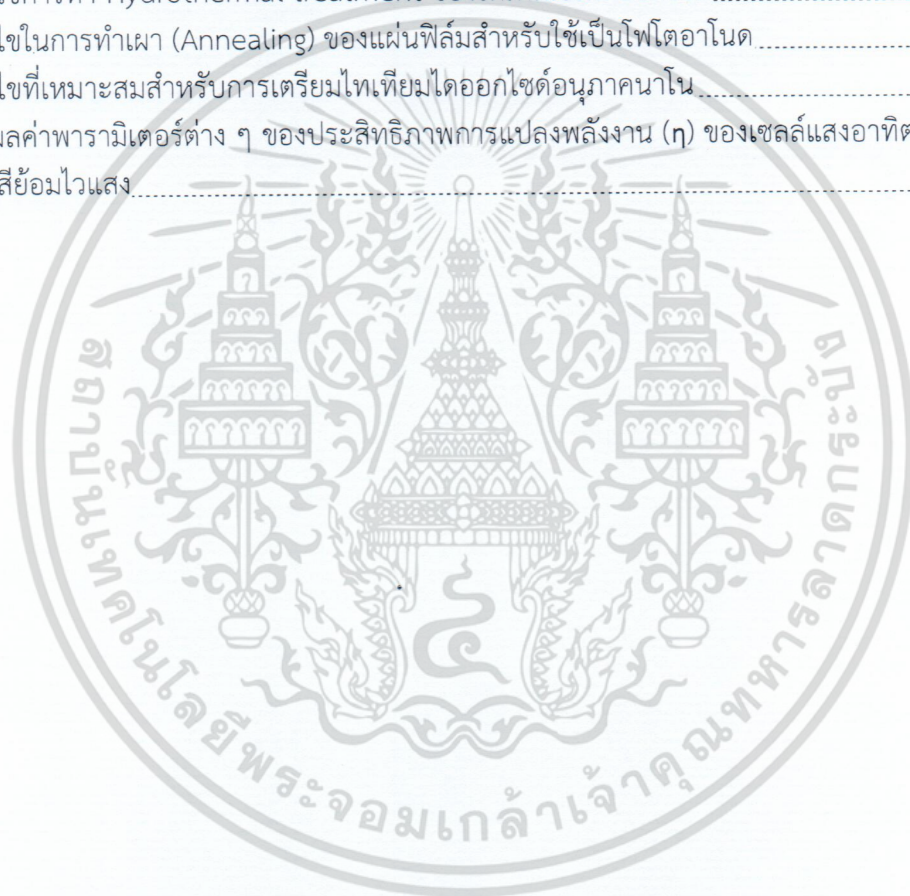
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1	สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ	28
3.2	การเตรียมอะนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์	30
3.3	การเตรียมพื้นผิว (Substrate) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	34
3.4	การเตรียมฟิล์มบาง TiO ₂ สำหรับใช้เป็นโฟโตอานอด	34
3.5	การเตรียมฟิล์มสำหรับใช้เป็นแคโทดอิเล็กโทรด	36
3.6	การเตรียมสารละลายสีย้อมและการแช่สีย้อม	36
3.7	การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์	38
3.8	การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	38
3.9	การหาลักษณะเฉพาะของวัสดุและการวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน	40
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1	ผลของการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน	42
4.2	การหาลักษณะเฉพาะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน	43
4.3	การวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้	45
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลการวิจัย	49
5.2	ปัญหาและอุปสรรค	50
5.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	50
	เอกสารอ้างอิง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมไวแสง.....	17
3.1 สารเคมีและวัสดุ.....	28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	29
3.3 เงื่อนไขการทำ Hydrothermal treatment ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	31
3.4 เงื่อนไขในการทำเผา (Annealing) ของแผ่นฟิล์มสำหรับใช้เป็นโฟโตแอโนด.....	36
4.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน.....	42
4.3 สรุปผลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมไวแสง.....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
2.1 แผนภาพแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของ DSSCs	9
2.2 แผนภาพแสดงหลักการทำงานและระดับพลังงานของ DSSCs	10
2.3 สีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน	11
2.4 สีย้อมไวแสง coumarin based NKX-2677 (5), flavonoid anthocyanin dye (6), xanthene dye (7), perylene dye (8) และ perylene dye (9)	12
2.5 Chlorophyll (9) และสีย้อมไวแสงพอร์ไพรีน Cu-MP (10)	13
2.6 สีย้อมไวแสงพอร์ไพรีน Zn-TCPP (11), TCPP (12), Zn-1a (13), Zn-1b (14) และ Zn-1c (15)	13
2.7 โครงสร้างแต่ละแบบของ TiO ₂ ได้แก่ anatase, rutile และ brookite ตามลำดับ	18
2.8 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง Scanning electron microscopy	21
2.9 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM เมื่อใช้งานร่วมกับจอภาพ	22
2.10 แสดงพฤติกรรมของรังสี X-Ray ที่ฉายไปยังโครงสร้างทำให้รังสีเกิดการการแทรกสอด	23
2.11 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD	24
2.12 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	24
2.13 แสดงค่า Fill Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์	25
2.14 ภาพแสดงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ณ AM 0.0 และ 1.5	26
3.1 การคน TnB ในกรดแอสติกโดยใช้ Magnetic stirrer	30
3.2 ชุดอุปกรณ์ Teflon-lined autoclave treatment	31
3.3 เครื่อง Ultra-centrifuge สำหรับการปั่นเหวี่ยงเร่งการตกตะกอน	32
3.4 เครื่อง Rotary evaporator สำหรับการระเหยเอทานอล	33
3.5 แผนผังการเตรียมอะนาไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน	33
3.6 ลักษณะของการเขียนชื่อลงบนกระจก FTO ด้านที่ไม่นำไฟฟ้า	35
3.7 แสดงบล็อกสกรีนขนาด 0.4 x 0.4 cm ² ที่ทำจากสก็อตเทปใส	35
3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสีย้อมไวแสง N719	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสีย้อมไวแสง N719	37
3.9 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงหลังการประกอบเสร็จ	39
3.10 แสดงขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงทั้งหมด	40
4.1 แสดงลักษณะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน	43
4.2 แบบ XRD ของ TiO_2 ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	43
4.3 ภาพถ่าย SEM ของ $\alpha\text{-TiO}_2$ อนุภาคนาโน ที่เตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (ก) ที่กำลังขยาย $\times 100,000$ และ (ข) ที่กำลังขยาย $\times 150,000$	44
4.4 ภาพตัดขวางของภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม TiO_2 ตามจำนวนชั้นของการเคลือบต่าง ๆ	45
4.5 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการ เคลือบ 1 ชั้น	46
4.6 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 2 ชั้น	46
4.7 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 3 ชั้น	47
4.8 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 4 ชั้น	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในบทแรกนี้จะเริ่มต้นด้วยการกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของโครงการปัญหาพิเศษ อันเป็นแรงจูงใจในการดำเนินการทำงานวิจัยในครั้งนี้ จากนั้นจะเป็นการนำเสนองานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSSCs) ที่ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานสำหรับองค์ความรู้เพื่อการต่อยอดที่สำคัญในงานของผู้วิจัย จากนั้นจะเป็นการระบุถึงจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการทำงานวิจัย สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย ตลอดจนวิธีการดำเนินงานวิจัยอันจะเป็นการกำหนดทิศทางของการทำงานวิจัยที่ชัดเจนยิ่งขึ้น และในที่สุดท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในพัฒนา DSSCs ได้ต่อไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานจากถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาตินั้นถือได้ว่าปัจจัยขั้นพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ แต่การใช้พลังงานเหล่านี้เป็นปัญหาของคนทั่วโลก ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเรา ในยุคปัจจุบัน จึงได้มีการค้นหาแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง พลังงานจากธรรมชาติที่เป็นพลังงานสะอาดและยั่งยืนไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และพลังงานที่เราสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงนั้นคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดและพลังแสงอาทิตย์ นอกจากจะใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนได้แล้วยังสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงอีกด้วย.[1, 2] เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cells) เป็นแหล่งพลังงานที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งได้มีการพัฒนาเป็นเซลล์พลังแสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอน ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดย Chapin และคณะ ณ ห้องปฏิบัติการเบลล์ ประเทศสหรัฐอเมริกา แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและต้องการธาตุซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูง ในปัจจุบันเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ยังใช้สนองความต้องการของสังคมได้น้อย เพราะปัญหาหลักคือค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระบวนการผลิต ค่าวัสดุ มีราคาที่สูงมาก ซึ่งหลายคนคิดว่าไม่คุ้มค่าในการลงทุนและยังถูกมองอีกว่าเป็นแหล่งพลังงานที่ตอบสนองต่อความต้องการของสังคมได้น้อย ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาแพงเกินไปที่จะซื้อไปใช้ภายในบ้านเรือนทั่วไป [3]

ปัญหาเหล่านี้ทำให้นักวิจัยสนใจที่จะพัฒนาและออกแบบการประดิษฐ์เซลล์ที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาและออกแบบเซลล์ DSSCs ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนโครงสร้างรูพรุน (Porous nanocrystalline TiO_2) นำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับขั้วแอโนดถูกรายงานในครั้งแรกโดย M. Grätzel และเพื่อนร่วมงาน ในช่วงปี ค.ศ. 1990 [4] DSSCs ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำ กระบวนการผลิตที่ง่ายกว่าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ค่อนข้างสูงในช่วงแสงกระจาย จึงเป็นแรงบันดาลใจให้กับผู้วิจัยในการที่จะเลือกทำงานวิจัยขั้นนี้ขึ้น โดยมีจุดมุ่งหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เป็นต้นแบบ จากการเตรียมวัสดุทั้งในส่วนที่เป็นโฟโตอานอด ในส่วนที่เป็นแคโทดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สำหรับสีย้อมไวแสงเราใช้สีย้อมไวแสงทางการค้า (N719 dye) เพื่อวัดค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้ เพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน มีรายงานการวิจัยหลายชิ้นที่ทำงานเกี่ยวกับ DSSCs ซึ่งผู้วิจัยขอแนะนำเพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

รัฐพงษ์ นาคาไชย และคณะ (2554) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่ต่างกันสองส่วน ส่วนแรกเป็นกระจกใสที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งย้อมด้วยสีย้อมไวแสงตระกูลอีโอซิน และส่วนที่สองจะถูกเคลือบด้วยแพลททินัม (Pt) ซึ่งทั้งสองแผ่นจะถูกเคลือบลงบนกระจกด้านที่นำไฟฟ้า จากนั้นนำด้านที่ถูกเคลือบมาประกบกันโดยให้ด้านที่เคลือบ TiO_2 เป็นด้านที่สัมผัสแสง ในงานนี้ได้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ประเภทไอโอดีน [5]

วินิช พรหมอารักษ์ และเพื่อนร่วมงาน (2550) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงทั้งสามส่วน คือ โมเลกุลสีย้อม ระบบอิเล็กโทรไลต์ และสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อนุภาคนาโนที่มีประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพโดยรวมในการแปลงพลังงานแสงของเซลล์อยู่ในช่วง 10 – 15% [6]

วรรณิ์ เหล็กเพชร และคณะ (2016) ได้รายงานการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างอนุภาคขนาดใหญ่ (TiO_2 microstructure) ซึ่งมีลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) แตกต่างกันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process) โดยการใช้เทระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) โดยได้ศึกษาถึงผลของการควบคุมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น สารลดแรงตึงผิว เอทานอล น้ำ รวมทั้งระยะเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากการวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง TiO_2 พบว่า เงื่อนไขต่างๆ ของการเตรียมมีบทบาทสำคัญต่อขนาดอนุภาค ลักษณะของสัณฐานวิทยาและผลึกของ TiO_2 microstructure จากนั้นนำผง TiO_2 ที่เตรียมได้ประยุกต์ใช้เป็นชั้นกระเจิงแสง (Scattering light layers) สำหรับโฟโตอานอด พบว่า Star- TiO_2 photoanode แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 9.56% เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระเจิงแสง ($\alpha\text{-TiO}_2$, 8.38%) [7]

Dongshe Zhang และผู้ร่วมงาน (2006) ได้พัฒนารูปแบบการเตรียมฟิล์ม TiO_2 ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบใหม่ ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับใช้เป็นโฟโตอานอดที่มีประสิทธิภาพ โดยการเติม TTIP ปริมาณเล็กน้อยลงไป ในเอทานอล พบว่าในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคนาโนของ TiO_2 เพื่อให้เป็นรูปแบบฟิล์มที่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความหนาประมาณ 10 μm โดยไม่มีรอยแตก สารอินทรีย์ที่เหลือที่เกิดจาก TTIP สามารถกำจัดออกด้วยวิธี UV-Ozone ที่ผิวของฟิล์ม จากค่า IMPS/IMVS แสดงให้เห็นว่าการใช้ UV-Ozone มีผลต่อการป้องกันการรวมตัวของ photogenerated electrons ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นของเซลล์ ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเป็น 4.00% (เซลล์ที่เป็นแก้ว) และ 3.27% (เซลล์ที่เป็นพลาสติก) ภายใต้การส่องสว่างที่ AM1.5 (100 mW) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Antonio Tricoli และคณะ (2012) ได้เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่มีโครงสร้างรูพรุนสูงเพื่อใช้เป็นฟิล์มสำหรับโฟโตอานอด ด้วยวิธีการสังเคราะห์ด้วยเปลวไฟและการทับถม (Deposition method) ของละอองอนุภาค TiO_2 โดยตรง จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าฟิล์มเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) การสะสมไอที่อุณหภูมิพื้นผิวต่ำ ($\sim 100^\circ\text{C}$) สามารถทำให้ฟิล์มมีความพรุนสูงมาก ($\varepsilon = 98\%$) แต่สมบัติการยึดติดฟิล์มมีค่าต่ำโดยเฉพาะเมื่อแช่อยู่ในสีย้อมหรืออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ค่า η เท่ากับ 0.08% แต่เมื่อนำไปเผา (Annealing) ที่อุณหภูมิ $\sim 400^\circ\text{C}$ ความพรุนของฟิล์มปรับตัวลดลงเหลือ 95% แต่เสถียรภาพเชิงกลดีขึ้น และบางส่วนมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อม ส่งผลให้ค่า J_{SC} สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ($12.2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) และมีค่า η เท่ากับ 5% นอกจากนี้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานยังลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มที่ $128 \mu\text{m}$ แสดงให้เห็นว่าความหนาของฟิล์มรูพรุนสามารถลดการสูญเสียโครงสร้างโดยรวม มีผลทำให้สมบัติดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น [9]

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO_2 nano-particle) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับเป็นตัวดูดซับโมเลกุลของสีย้อมไวแสง

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่เตรียมได้ เช่น ขนาดอนุภาค รูปร่างอนุภาค และเฟส (Phase)

1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมชั้นผิวบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 film) ด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยมีด (Doctor blade) สำหรับเป็นชั้นโฟโตอานอด (Photoanode layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.2.4 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน สามารถเตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นของสารไทเทเนียมตั้งต้น ตัวทำละลาย ตลอดจนอุณหภูมิและเวลาในการเตรียม

1.3.2 ชั้นผิวบางของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่เตรียมได้ สามารถดูดซับและเก็บกักโมเลกุลของสีย้อมไวแสงไว้ได้บนวัตถุพื้นผิวที่จำเพาะ ส่งผลให้มีความสามารถเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้

1.3.3 ความหนาของการเคลือบชั้นผิวบางของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 เตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO_2 nano-particle) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นของสารไทเทเนียมตั้งต้น ตัวทำละลาย ตลอดจนอุณหภูมิและเวลาในการเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 ศึกษากระบวนการเตรียมชั้นผิวบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ film) ด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยมือ (Doctor blade) สำหรับเป็นชั้นเคลือบโฟโตอานอด (Photoanode layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.4.3 ทาลักษณะเฉพาะและวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างและสัณฐานวิทยา (Morphology) ของผงและชั้นผิวบางของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่เตรียมได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

1.4.4 ศึกษากระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

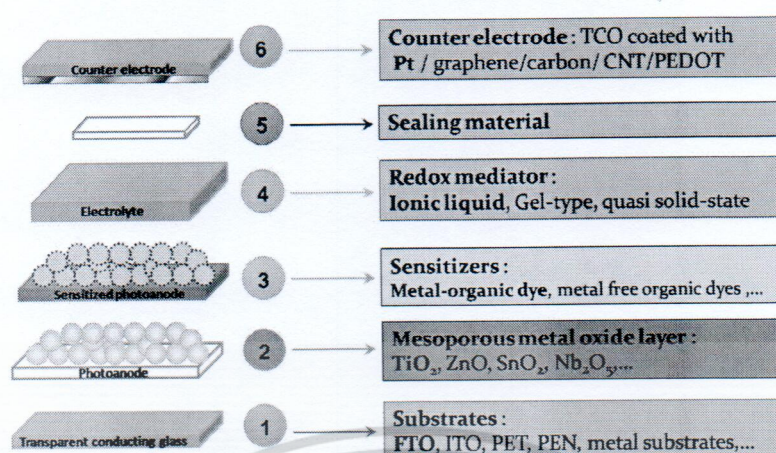
1.4.5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

1.5 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells technology) โดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cells; DSSCs) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในด้านพลังงานทดแทน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- 1) พื้นผิว (Substrates) ที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะของชั้นผิวบางสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้า เช่น FTO, ITO, PET เป็นต้น
- 2) ขั้วไฟฟ้าอานอด (Photoanode) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นชั้นผิวบางของสารประกอบโลหะออกไซด์มีโครงสร้างรูพรุน (Meso-porous metal oxide layer) เช่น ZnO, TiO₂, Nb₂O₅ เป็นต้น
- 3) สีย้อมไวแสง (Sensitizers) ซึ่งนิยมใช้สีย้อมไวแสงชนิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะอินทรีย์ (Metal-organic dye) ซึ่งจะให้ค่าการแปลงพลังงานที่สูงกว่าสีย้อมประเภทอินทรีย์ เช่น N719, N3 หรือ Black dye เป็นต้น
- 4) ตัวกลางสำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox mediator) จัดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่มีหน้าที่ขจัดเขยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด เช่น I⁻/I₃⁻ และ Co²⁺/Co³⁺ เป็นต้น
- 5) วัสดุยึดติด (Sealing materials) เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับยึดติด หรือเป็นกาวพลาสติก เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละส่วนติดประกอบกันเป็นเซลล์ได้อย่างสมบูรณ์
- 6) ขั้วไฟฟ้าแคโทด (Counter electrode) สารที่ใช้เป็นขั้วแคโทด มีดังนี้ โลหะแพททินัม กราฟีน ผงคาร์บอน เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ คือ โลหะแพททินัม องค์ประกอบที่สำคัญทั้ง 6 ที่กล่าวมา แสดงให้เห็นในรูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้เขียนมีแนวความคิดที่จะศึกษา และประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยจะมุ่งเน้นไปที่การเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าอานอด (Photoanode materials) ซึ่ง TiO_2 จัดเป็นโลหะออกไซด์ประเภทไบนารี (Binary metal oxide) [10] โดยมีข้อกำหนดที่สำคัญที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุโฟโตอานอดสำหรับ DSSCs ต้องมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) ควรจะแสดงเสถียรภาพทางเคมีที่ดีต่อการสังเคราะห์ ไม่เป็นพิษง่ายต่อการเตรียม มีราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 2) ควรมีพื้นที่ผิวสูง ขรุขระ และมีความพรุนมาก ซึ่งจะช่วยให้การดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้มากขึ้น ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหลของอิเล็กโทรไลต์ได้สะดวกและยังสามารถเชื่อมต่อกับพื้นผิวหน้าของวัสดุที่ใช้ทำเป็นพื้นผิว (Substrate) เช่น แก้ว หรือพลาสติกได้ดี
- 3) มีช่องว่างพลังงานของวัสดุโฟโตอานอดควรจะตรงกับระดับพลังงานของโมเลกุลของสีย้อมเพื่อการเคลื่อนไหลของโฟโตอิเล็กตรอนจากสีย้อมไปยังแถบตัวนำของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์
- 4) ขนาดของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ต้องมีสัญญาณวิทยา และมีความเป็นผลึก (Crystalline phase) ที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
- 5) วัสดุโฟโตอานอด ควรจะโปร่งใสเพื่อหลีกเลี่ยงการดูดซับแสงที่มองเห็น เพื่อเพิ่มปริมาณการเก็บเกี่ยวแสงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

ตัวอย่างของโลหะออกไซด์ประเภทไบนารี (Binary metal oxide) เช่น TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , Nb_2O_5 , และ Al_2O_3 เป็นต้น และสารประกอบประเภทเทอร์นารีออกไซด์ (Ternary metal oxide) เช่น SrTiO_2 และ ZnSnO_4 ได้รับการตรวจสอบให้เป็นวัสดุสำหรับทำเป็นวัสดุโฟโตอานอดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [11] ในบรรดาโลหะออกไซด์ทั้งหลาย TiO_2 ถูกนำมาใช้ทำเป็น Photoanode materials กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมันมีอิเล็กตรอนในแถบตัวนำและแถบวาเลนซ์ค่อนข้างกว้าง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนจากแถบตัวนำไปยังวงวาเลนซ์จึงมีน้อย ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณอิเล็กตรอนหรือลดการรวมตัวกันของโฮล อย่างไรก็ตามแสงที่มองเห็น (Visible light) ไม่สามารถดูดกลืนพลังงานได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับโมเลกุลของสีย้อมโดยตรง เนื่องจากผลของการกระเจิงแสงมีน้อยเมื่อยึดติดกับอนุภาคขนาดนาโนของ TiO_2 และขนาดที่เล็กนี่ยังเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการดูดซับสีย้อมอีกด้วย [12, 13]

ดังนั้น ผู้เขียนจึงมีแนวความคิดที่จะเตรียมผง TiO_2 ที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เหมาะสม เช่น โครงสร้างที่เป็นชั้น (Shell structure) หรือโครงสร้างที่เป็นรูพรุน (Meso-porous structure) อนุภาค TiO_2 ที่มีพื้นที่ผิวมากและมีความพรุนสูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการดูดซับและกักเก็บสีย้อมได้ในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังสามารถแพร่กระจายสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย จึงส่งเสริมให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพของ Photocurrent density (J_{SC}) ได้มากขึ้น [14] ซึ่งปัจจัยสำคัญเหล่านี้จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อ Photocurrent, Photovoltage และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) กระบวนการทั้งหมดจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งต้น ปริมาณของตัวทำละลาย สารเติมแต่งชนิดต่างๆ อุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method)

จากนั้นนำผงที่สังเคราะห์ได้มาเตรียมเป็นแป้งเปียก (Paste) เพื่อให้ง่ายและเหมาะสมกับการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม นอกจากนี้ยังศึกษากระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ (Module) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยผงและฟิล์มที่เตรียมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

- โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาขนาดอนุภาคของ TiO_2 และความหนาของฟิล์ม TiO_2 จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
- โครงสร้างผลึกและเฟสของอนุภาค TiO_2 จะถูกหาลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD)

1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษาค้นคว้า เพื่อจัดหาหัวข้อรายงาน

1.6.2 เสนอหัวข้อรายงานที่จะศึกษาศึกษาโครงสร้างส่วนประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.6.3 กำหนดหัวข้อของปัญหา (Define Phase) ที่ชัดเจน เพื่อวางแผนการวิเคราะห์ที่เหมาะสม

1.6.4 ทำการทดลองเก็บบันทึกข้อมูล พร้อมทั้งสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.6.5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในส่วนอื่นต่อไปในอนาคต

1.6.6 จัดพิมพ์ และนำเสนอรายงาน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เกิดองค์ความรู้ที่เกี่ยวกับโครงสร้าง ส่วนประกอบ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.7.2 มีทักษะในการเตรียมวัสดุโฟโตอานอด (Photoanode materials) สำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต้นแบบ (Prototype) ตลอดจนเทคนิคการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ทั้งด้านเชิงโครงสร้าง เชิงกายภาพและเชิงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7.3 องค์ความรู้และต้นแบบที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงหรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ ต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) เริ่มต้นด้วยหลักการงานและส่วนประกอบที่สำคัญของ DSSCs จากนั้นจะเป็นการนำเสนอถึงคุณลักษณะและการวิเคราะห์วัสดุโฟโตอานอด (Photoanode materials) ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญสำหรับเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs

2.1 ส่วนประกอบและหลักการการทำงานของ DSSCs

2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคของโลหะออกไซด์ และอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้

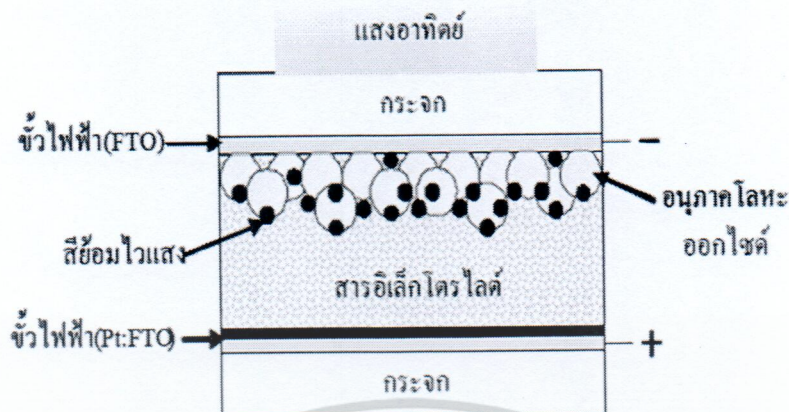
1. สีย้อมไวแสง (Dye) ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นสีย้อมไวแสงจะต้องสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตาเห็นและใกล้อินฟราเรดเพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับแสงโฟตอนที่ตกกระทบ มีคุณสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

2. ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน และเป็นพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสง และต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (>3 eV) และมีพื้นที่ผิวมาก

3. สารอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ไม่ดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล และมีอายุการใช้งานนาน

4. ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนด ที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก นิยมใช้ fluoride doped tin oxide (FTO) และขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กโทรไลต์ ต้องนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กโทรไลต์ต่ำ

5. ขั้วไฟฟ้าแคโทด (Counter electrode) ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต้องนำไฟฟ้าได้ดี มีพื้นที่ผิวมากและมีศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของอิเล็กโทรไลต์ต่ำ นิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์

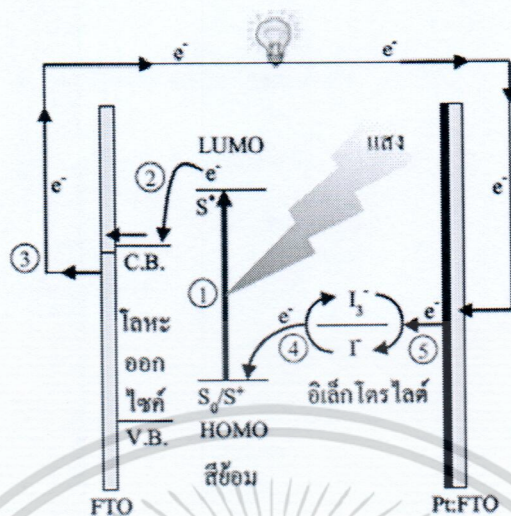


รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของ DSSCs [6]

2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมไวแสง
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีกลไกการทำงานเป็นขั้นตอน [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

1. เมื่อแสงตกกระทบโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ถูกยึดบนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะถูกดูดกลืนแสง แล้วอิเล็กตรอนในสถานะพื้น (S_0) จะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า (S^*)
2. อิเล็กตรอนในสถานะเร้า (S^*) จะถูกส่งผ่านไปสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
3. อิเล็กตรอนเหล่านั้นจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนด (FTO) แล้วออกสู่วงจรภายนอก
4. ที่ขั้วแคโทด สารอิเล็กโตรไลต์เกิดกระบวนการรีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^-) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) ในขณะที่เดียวกันสารอิเล็กโตรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วแคโทด (โลหะแพลทินัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงหลักการทำงานและระดับพลังงานของ DSSCs [6]

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในการทำงานของ DSSCs

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด: $S_0 + h\nu \rightarrow S^*$: การดูดกลืนแสง

$S^* \rightarrow S^+ + e^-$ (ให้โลหะออกไซด์) : การส่งผ่านอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด: $S^+ + \text{อิเล็กโตรไลต์ (I}^-) \rightarrow S_0 + \text{อิเล็กโตรไลต์ (I}_3)$: การสร้างใหม่ของสีย้อม

$\text{อิเล็กโตรไลต์ (I}_3) + e^- \text{ (จากขั้วแพลทินัม)} \rightarrow \text{อิเล็กโตรไลต์ (I}^-)$

ปฏิกิริยารวม: $e^- \text{ (จากขั้วแพลทินัม)} + h\nu \rightarrow e^- \text{ (ให้โลหะออกไซด์)}$

2.1.3 แนวทางและทฤษฎีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมไวแสง

2.1.3.1 การพัฒนาสีย้อมไวแสง

การพัฒนาสีย้อมไวแสงสามารถแบ่งเป็น 3 แนวทางหลัก คือ

- หาสีย้อมไวแสงชนิดใหม่ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงกว้างตั้งแต่ช่วงแสงตาเห็นจนถึงแสงใกล้อินฟราเรด เพื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในสถานะเร้าให้มากที่สุด

- เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสีย้อมไวแสงกับพื้นผิวของโลหะออกไซด์ เพื่อเพิ่มปริมาณสีย้อมไวแสงให้เกาะกับโลหะออกไซด์ในปริมาณมาก

- เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ เพื่อไม่ให้มีการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอน

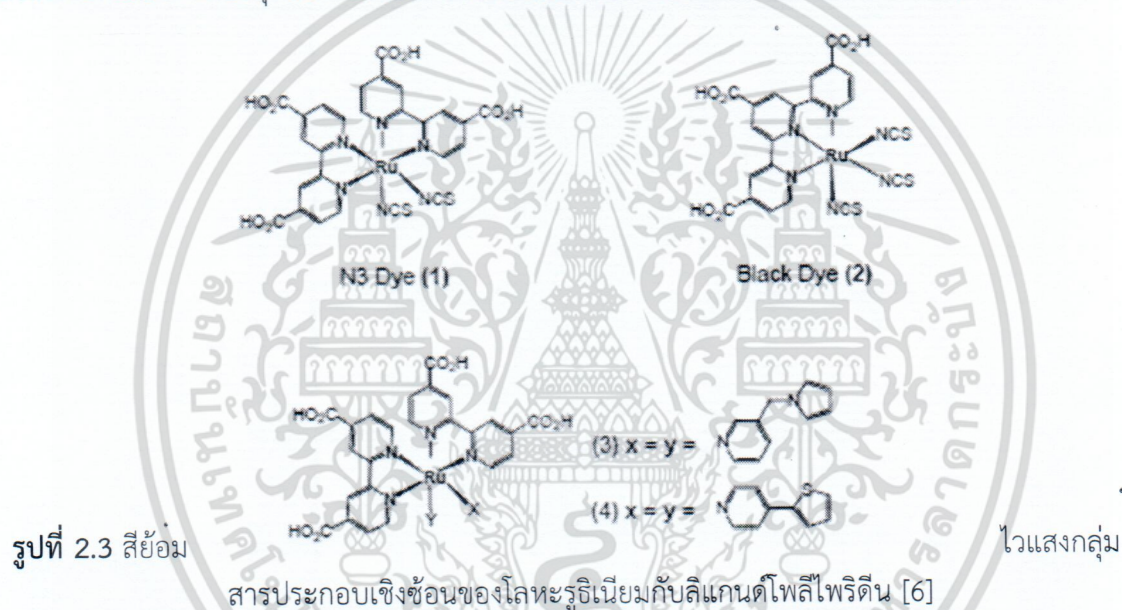
จากแนวทางดังกล่าวสามารถจำแนกสีย้อมไวแสงออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1. กลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน

สีย้อมกลุ่มไวแสงกลุ่มนี้ได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากรูทีเนียมเป็นโลหะมีความต่างศักย์รีดอกซ์สูง เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคนาโนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

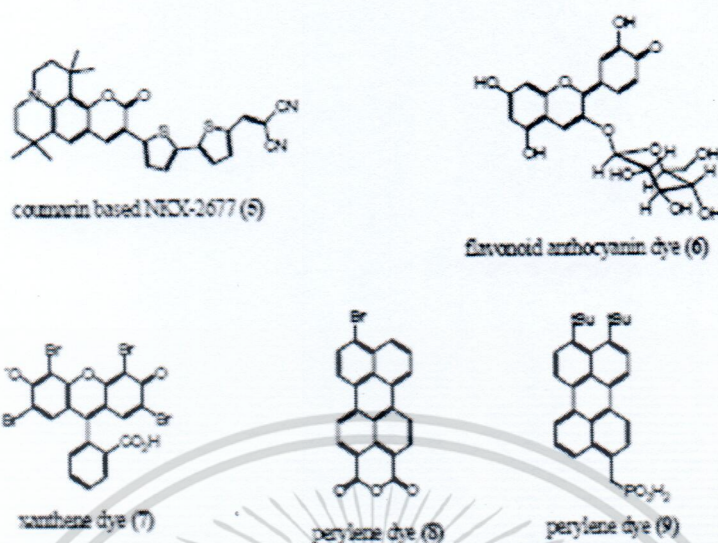
สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้ตี M. Grätze และคณะ[4] เป็นกลุ่มวิจัยแรกที่ประสบความสำเร็จอย่างมาก ในการพัฒนาสีย้อมไวแสงประเภทนี้ โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลี ไพริดีนหรืออนุพันธ์ของโพลีไพริดีน โดยลิแกนด์โพลีไพริดีนจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH) เป็น ส่วนประกอบของโมเลกุลและมีความสามารถดูดซับบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่างสีย้อมไวแสง กลุ่มนี้ ได้แก่ N3 Dye (1) และ Black Dye (2) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมไวแสงกลุ่มนี้พบว่าให้ ประสิทธิภาพรวมสูงถึง 10.4% นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนโมเลกุล (3) และ (4) ที่มีหมู่ลิแกนด์ไพโรโรลและไฮ โอฟินเพิ่มขึ้นมา ดังรูปที่ 2.3 แม้ว่าการใช้สารประกอบเชิงซ้อนกลุ่มโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน จะให้ประสิทธิภาพรวมสูงแต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอาทิตย์ที่แคบ สังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์ยากและมีราคาแพงจึงมีการทดลองใช้สีย้อมไวแสงชนิดอื่นๆ แทน



2. กลุ่มสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์

เป็นการนำสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมาใช้เป็นสีย้อมไวแสงส่วนใหญ่เป็น โมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันยาว และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง ตัวอย่างสีย้อมไวแสง สารอินทรีย์ เช่น โมเลกุล (5-7) เป็นอนุพันธ์ของเคมาริน (Coumarin) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวม ประมาณ 7.7% นอกจากนี้ยังมีอีกกลุ่มหนึ่งที่น่าสนใจ คือ สารกลุ่มเพอริลีน (Perylene dye) (8-9) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกันกับอนุพันธ์ของเคมาริน แม้ว่าสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ให้ ประสิทธิภาพรวมต่ำกว่ากลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม แต่ยังคงได้รับความสนใจและศึกษา พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะมี ราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย และมีความเป็นพิษต่ำ

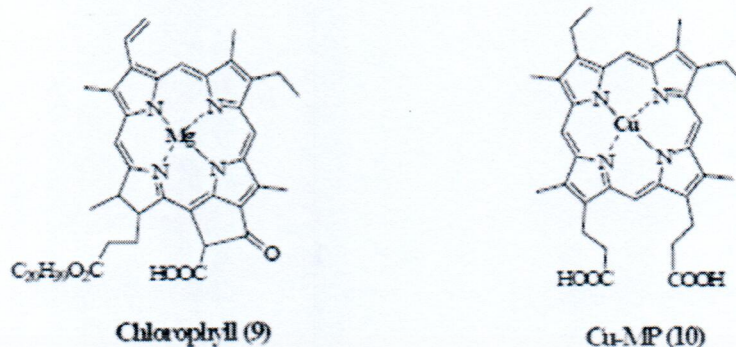
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



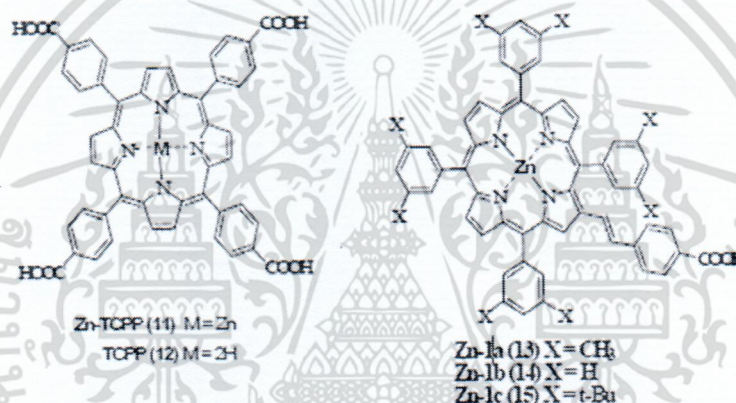
รูปที่ 2.4 สีย้อมไวแสง Coumarin based NKX-2677 (5), Flavonoid anthocyanin dye (6), Xanthene dye (7), Perylene dye (8) และ Perylene dye (9) [6]

3. กลุ่มสีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน (porphyrin)

สีย้อมชนิดนี้พัฒนามาจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ (9) ซึ่งเป็นโครโมฟอร์ที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยในปี ค.ศ. 1993 Kay และ M. Grätze ได้สังเคราะห์อนุพันธ์พอร์ไฟรินเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดกลืนแสงบนตัวดูดซับ TiO_2 พบว่าสีย้อมไวแสง Cu-MP (10) ให้ประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 2.6% ในปี ค.ศ. 1996 Boschloo และคณะ ได้สังเคราะห์พอร์ไฟริน Zn-TCPP (11) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมประมาณ 1.1% ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 Cherian และ Wamser ใช้ TCPP (12) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ Zn-TCPP (11) แต่ปราศจากโลหะ Zn เป็นโมเลกุลสีย้อมไวแสง พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมเพิ่มขึ้นเป็น 3.5% และในปี ค.ศ. 2004 Campbell และเพื่อนร่วมงาน สังเคราะห์พอร์ไฟริน meso-linkesสาร Zn-1a (13), Zn-1b (14) และ Zn-1c (15) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมของ Zn-1b (14) สูงถึง 4.2% แม้ว่าประสิทธิภาพรวมของสีย้อมกลุ่มพอร์ไฟริน จะมีค่าต่ำกว่าของสีย้อมกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมมากแต่การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงพอร์ไฟรินสามารถปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลได้ง่ายและมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพไปในทางที่ดีขึ้น ทำให้ในปัจจุบันสีย้อมไวแสงพอร์ไฟรินยังคงได้รับความสนใจศึกษาอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.5 Chlorophyll (9) และสีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Cu-MP (10) [6]



รูปที่ 2.6 สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Zn-TCPP (11), TCPP (12), Zn-1a (13), Zn-1b (14) และ Zn-1c (15) M. Grätze [6]

2.1.3.2 การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์

ระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนสำคัญที่ต้องได้รับการพัฒนาเช่นกัน เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับผลิตในเชิงการค้า ในระยะเริ่มแรกระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบที่เตรียมได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก คือ อิเล็กทรอนิกส์ของเหลว มีส่วนประกอบของคู่อิทธิกริยารีดอกซ์ของไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I/I_3^-) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซิโตนไนไตร โพรพิโอนไนไตร เมทริกซ์ของอะซิโตนไนไตร โพรพิลีนคาร์บอนเนต เป็นต้น ในปัจจุบันอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงกว่า 10% เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขนส่งของไอออนที่รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาการหายไปหรือรั่วซึมของสารละลายออกจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวม อายุการใช้งาน และความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงลดลง ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลว และต้องได้รับการแก้ไขให้แล้วเสร็จก่อนที่จะผลิตต้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงออกสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก ที่มีจุดเดือดสูงขึ้น มีการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อนที่ดี และไม่ติดไฟ ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกที่นิยมใช้คือสารประกอบของ Imidazolium แม้ว่าระบบอิเล็กโทรไลต์นี้จะสามารถแก้ไขปัญหาการระเหยได้ แต่ยังมีปัญหาการรั่วซึมอยู่ และให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว เพราะมีความหนืดสูง ทำให้ไอออนไอโอดีนแพร่ตัวได้ช้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ยังไม่สูงมากนัก (2 - 4%) ต่อมาได้มีรายงานว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ 1-methyl-3-propylimidazolium iodide, 1-methyl-3-ethylimidazolium dicyanamide และ lithium iodide สามารถให้ประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นเป็น 6.6% เมื่อนำไปประกอบรวมกับเซลล์ที่ใช้สีย้อมไวแสงในกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะรูธีนียม การเติม lithium iodide สามารถเพิ่มประสิทธิภาพรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ electron injection yield และ dye regeneration rate ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวที่ไม่ระเหยส่วนใหญ่จะใช้ไอโอดีน แต่ประสิทธิภาพรวมที่ได้ก็ยังไม่สูงมากนัก ทำให้ยังมีการพัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์อย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ปราศจากตัวทำละลายของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ $\text{SeCN}^-/(\text{SeCN})^{3-}$ ซึ่งมีความหนืดที่ต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ imidazolium iodide มาก (ประมาณ 45 เท่า) สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงมากถึง 7.5-8.3% ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5

ระบบอิเล็กโทรไลต์อีกระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา คือ พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ มีจุดเด่นสำคัญในเรื่องการนำพาไอออนที่สูงกว่าของไหลและสามารถแข็งตัวได้ง่าย โดยพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นเจลที่มีโครงสร้างแบบโครงร่างแหสามมิติ เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรไลต์แบบแข็งและชั้นรพุนระดับนาโนของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์นอกจากนี้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และไม่มีขั้นตอนซับซ้อนในปัจจุบันนิยมใช้ Poly(ethylene glycol) (PEG) และ poly(ethylene oxide) (PEO) เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และพบว่าการใช้ประโยชน์พอลิเมอร์ร่างแหแบบเจลของ PEO segments ในการทำโคพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์สามารถให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงสุดเท่ากับ 8.1% ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์โดยการเพิ่มความหนาของชั้นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ การปรับปรุงสัดส่วน ความหนืด และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย และสามารถเติม oligomers หรือ plasticizers อัดแน่นเข้าไปในอิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์เพื่อเพิ่มการนำพาไอออน และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคสีย้อมไวแสงกับพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์นอกจากนี้มีการพัฒนาอิเล็กโทรไลต์เจลแบบนาโนคอมพอสิต พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 7%

นอกจากระบบอิเล็กโทรไลต์ที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีระบบอิเล็กโทรไลต์อีกระบบที่น่าสนใจคือระบบอิเล็กโทรไลต์ฟิล์มบาง (thin-film solid-electrolytes) หรือตัวส่งผ่านประจุบวก (Hole conductors) โดยจะเป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นตัวส่งผ่านประจุบวก เช่น โมเลกุลคาร์บาโซล (carbazole) อิเล็กโทรไลต์ระบบนี้จะไม่มีปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ และมีอายุการใช้งานนานจากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบอิเล็กโทรไลต์ยังคงต้องได้รับการพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงให้สูงขึ้น

2.1.3.3 การพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงสุด ชั้นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำ โลหะออกไซด์ จะต้องมียุทธศาสตร์ภาพสูง มีพลังงานแถบช่องว่าง (Eg) ที่กว้าง มีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้โมเลกุลสีย้อมยึดเกาะได้ในปริมาณมาก มีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอเพื่อให้การแพร่ผ่านของไอออนอิเล็กโตรไลต์ได้ดี และแต่ละอนุภาคจะต้องเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถแพร่ผ่านได้ดี อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่กลุ่มของ M. Grätzel[4] เลือกใช้ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงครั้งแรก คือ อนุภาคผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างกว้างประมาณ 3.2 eV มีเสถียรภาพสูง ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ได้มีความพยายามเปลี่ยนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างชนิดอื่นๆ แทน เช่น ทินออกไซด์ (SnO₂) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb₂O₅) และสตรอนเทียมไททาเนต (SrTiO₃) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้สารกึ่งตัวนำสมระหว่างทินออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมชนิด N3 ให้ประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 8% ที่ความเข้มแสง 90 mW/cm² ในปัจจุบันอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ยังคงเป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพรวมสูงสุด ตัวอย่างประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ดังสรุปในตารางที่ 2.1

นอกจากการเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำแล้ว แนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของสารกึ่งตัวนำ ทั้งเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้ปริมาณโมเลกุลสีย้อมไวแสงสามารถยึดเกาะได้มากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวของช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างสม่ำเสมอและเพิ่มระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้นเพื่อลดการเกิดการรีคอมไบเนชันของประจุ

โดยในปี ค.ศ. 2005 Law และคณะ [15] พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสง N719 ดูดซับบนลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ มีประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากลวดนาโนช่วยให้ส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น และลวดนาโนมีพื้นที่ผิวสูง และในปี ค.ศ. 2006 Baxter และ Aydil [16] สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมไวแสง N719 ดูดซับบนลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด 0.7 – 0.8 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 3 mA/cm² และมีประสิทธิภาพรวม 1.1% ลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับความสนใจศึกษา เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีค่าพลังงานแถบช่องว่างใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์และมีกระบวนการเตรียมให้อยู่ในรูปของลวดนาโนง่ายกว่า

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [6]

สารกึ่งตัวนำ	สีย้อมไวแสง	J_{sc}	V_{oc}	η (%)	ความเข้มของแสง (mW/cm ²)
TiO ₂	N719	12.0	0.60	7.1	100 (AM1.5)
TiO ₂	Black dye	20.5	0.72	10.4	100 (AM1.5)
TiO ₂	N3	18.0	0.72	10.0	100 (AM1.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TiO ₂	A natural cyanin-dye	1.5	0.40	0.56	100 (AM1.5)
SnO ₂ /ZnO	N3	22.8	0.67	8.0	90 direct sunlight
ZnO	mercurochrome	7.4	0.52	2.5	99 (AM1.5)
Nb ₂ O ₅	N3	4.9	0.63	2.0	100 (AM1.5)
ZnO	N3	4.2	0.46	2.0	56

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้รับการพัฒนาและศึกษาวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีขีดความสามารถสูงในระดับที่จะผลิตในระดับอุตสาหกรรมและทดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้ โดย จะต้องพัฒนาในทั้งสามส่วน คือ ตัวโมเลกุลสีย้อม ระบบอิเล็กทรอนิกส์และอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูง อันจะส่งผลโดยรวมให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงเกินกว่า 10-15%

2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ทำเป็นโฟโตแอโนดสำหรับ DSSCs

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO₂) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษและราคาถูก ไททาเนียมเป็นแร่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ใช้สัญลักษณ์แทนคือ Ti มีเลขอะตอม 22 มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรด-ด่าง ได้ดี ไททาเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่ิลเมนไนต์ (ilmenite) หรือ ลิวโซซีน (leucocene) โดยทำให้บริสุทธิ์ได้โดยวิธี rutile beach sand [10]

2.2.1 คุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติเฉพาะ

- มวลโมเลกุล 79.9 กรัม/โมล
- ความหนาแน่น 3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส
- จุดหลอมเหลว 1,850 องศาเซลเซียส
- ไม่ละลายน้ำ

คุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล

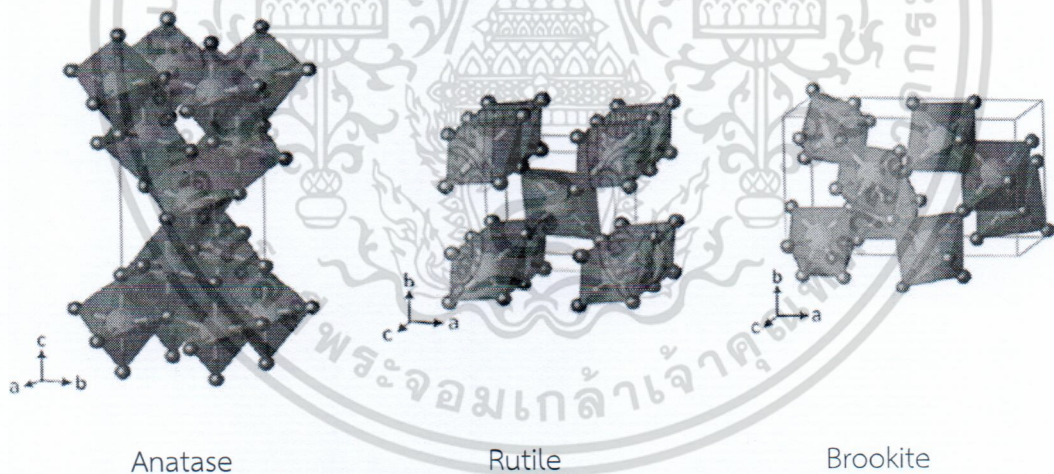
- สถานะภาพเป็นของแข็งสีขาว
- พื้นที่ผิว 50 ตารางเมตร/กรัม
- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร
- ความหนาแน่น 130 กรัม/ลิตร
- ความถ่วงจำเพาะ 0.7 กรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร
- Poisson's Ratio 0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Shear Modulus 90 GPa
- Modulus of Elasticity 230 GPa
- ค่าความต้านทาน (Resistivity, 25°C) 1012 ohm.cm
- ค่าความต้านทาน (Resistivity, 700°C) 2.5×10^4 ohm.cm
- Dielectric Constant (1MHz) 85
- Dissipation factor (1MHz) 5×10^{-4}
- Dielectric strength 4 kVmm⁻¹
- Thermal expansion (RT-1000°C) 9×10^{-6}
- Thermal Conductivity (25°C) 11.7 WmK⁻¹

ด้านความปลอดภัย

- การกินจากอุบัติเหตุ (Ingestion) มีความเป็นอันตรายต่ำ
- การสูดดม (Inhalation) ทำให้เกิดอาการคัน และอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจในระยะยาว
- การสัมผัสผิวหนัง (Skin) มีความเป็นอันตรายต่ำ สามารถล้างออกได้
- การสัมผัสสัญญาณตา (Eyes) มีความเป็นอันตรายต่ำ มีอาการแสบ คันเล็กน้อย สามารถล้างออกได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแต่ละแบบของ TiO₂ ได้แก่ anatase, rutile และ brookite ตามลำดับ [13]

2.2.2 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบัน TiO₂ ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอะนาทาส (anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใช้สำหรับสารให้สี อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้องมักใช้ TiO_2 เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืนและหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดีและทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก แก้ว และกระจก อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องใช้เซรามิก อุตสาหกรรมเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะและเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้การใช้ TiO_2 สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

3. เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ TiO_2 เป็นส่วนประกอบทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักใช้ TiO_2 เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ TiO_2 เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผงละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาท์บ เป็นต้น

6. ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง TiO_2 เมื่อได้รับแสงและความร้อน จะแตกตัวให้สารและรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำและอากาศ รวมถึงการกำจัดและต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีกลไก ดังนี้

- สำหรับการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อแผ่นนาโน TiO_2 ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^+) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) ออกมาสู่อากาศและอะตอมดังกล่าวจะเข้าดิ่งอะตอมไฮโดรเจนและคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่นทำให้จุลินทรีย์ และสารมลพิษต่างๆสลายตัวไป

- สำหรับการบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยการผ่านแสงอุลตราไวโอเล็ตในช่วงคลื่น 300-400 nm จะทำให้เกิดอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็นกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง

- สำหรับบำบัดมลพิษในน้ำ ด้วยการให้แสงแก่แผ่นตัวกลางนาโน TiO_2 ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำ กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปในผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีชื่อ"ภาษาอังกฤษ" คำเต็มว่า Scanning Electron Microscope และโดยทั่วไปเรามักจะเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ในภาษาอังกฤษโดยย่อว่า "SEM"

ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ที่สำคัญดังนี้

- Electron gun (แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน) อยู่ด้านปลายในสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 V หรือ 220 V เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 KV ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM

- Electromagnetic lens (เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน) ใช้ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

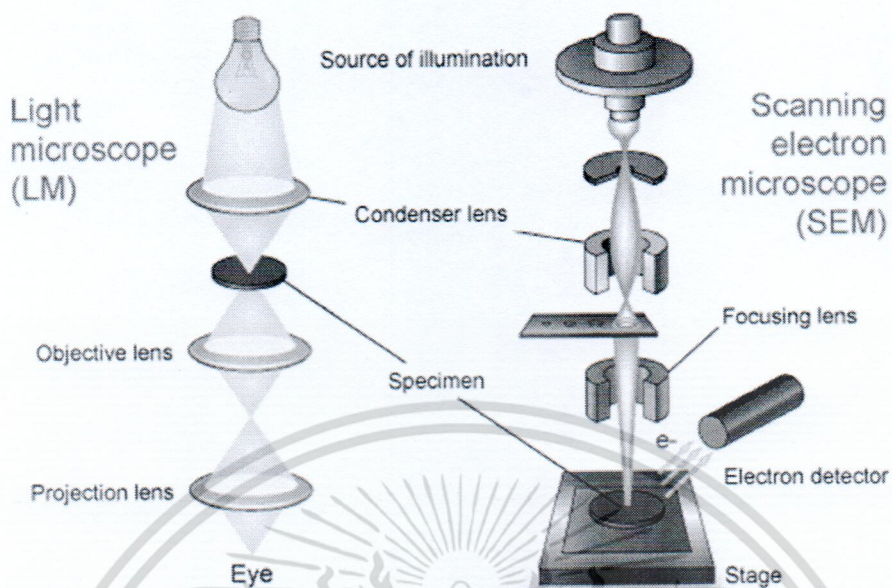
- Scan coil (ขดลวดควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอน) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ลำแสงดังกล่าวได้ตกกระทบในผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปในแนวตัวอย่างขนานที่ตนเองการ

- Specimen Chamber (ช่องใส่ตัวอย่าง) เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่าง ๆ เพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมา ภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง ฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometer stage

- Collector และ scintillator (อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมนทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมรอบด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30-250 V เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยา ระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

- Imaging photographic devices (อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการใช้บันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยาย และเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอน ให้เป็นแสงไฟสำหรับการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อนำแสงในลักษณะของแสง แสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้เป็น อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้ใน console unit ดังรูปประกอบที่ 2.8

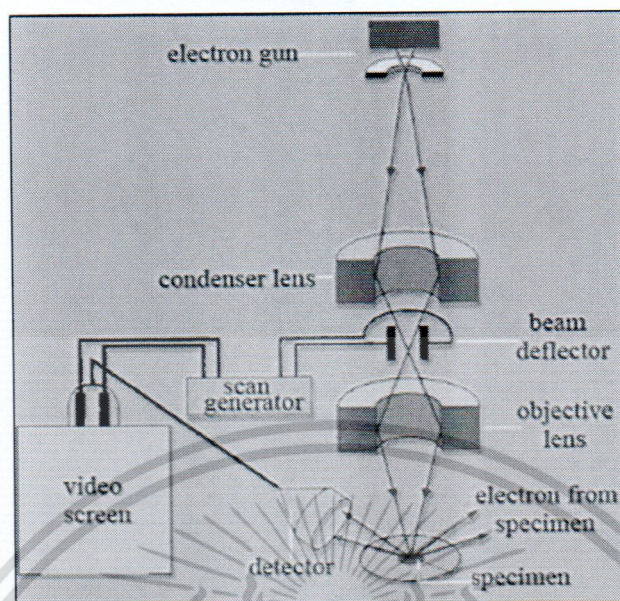
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง Scanning Electron Microscopy

หลักการการทำงานของ Scanning Electron Microscope [17]

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอคอมพิวเตอร์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้เลยดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM เมื่อใช้งานร่วมกับจอภาพ

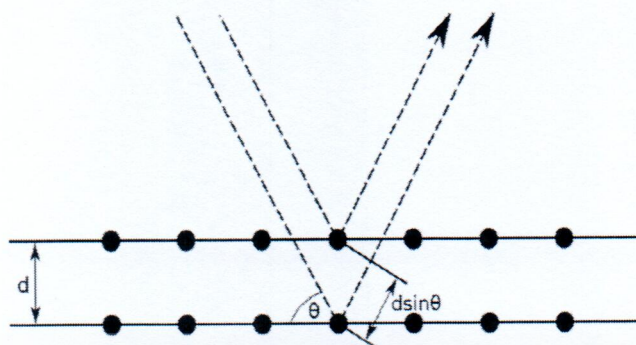
2.3.2 X-ray Diffraction

X-ray Diffraction; XRD หรือการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุสังเคราะห์ขึ้น ผู้ผลิตได้พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคนี้ ให้มีความสามารถที่ดียิ่งขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น ทำให้เอื้อประโยชน์สำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ หรือพัฒนาต่อยอดงานวิจัยต่าง ๆ

หลักการพื้นฐานของ X-ray Diffraction

เทคนิค XRD เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้รังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก ซึ่งจะให้รังสีตกกระทบทั้ง 2 ลำ มีเฟสตรงกันทำมุม θ กับระนาบ รังสีที่หนึ่งกระทบเข้ากับระนาบบน และสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบ ส่วนรังสีที่สอง กระทบเข้ากับระนาบถัดไป และสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบที่สอง โดยรังสีที่สองจะเคลื่อนที่แทรกสอดกับคลื่นลำที่หนึ่ง ซึ่งคลื่นทั้งสองลำอาจจะแทรกสอดแบบเสริม หักล้าง หรือแทรกสอดกันแบบไม่ตรงเฟสกันได้ [18] แสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงพฤติกรรมของรังสี X-Ray ที่ฉายไปยังโครงสร้างทำให้รังสีเกิดการแทรกสอด

ซึ่งการใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึกในการประยุกต์ใช้กับเทคนิค XRD นั้นจะเป็นไปตามสมการของ Bragg หรือ Bragg's Law [18] ดังนี้

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots (1)$$

โดยที่

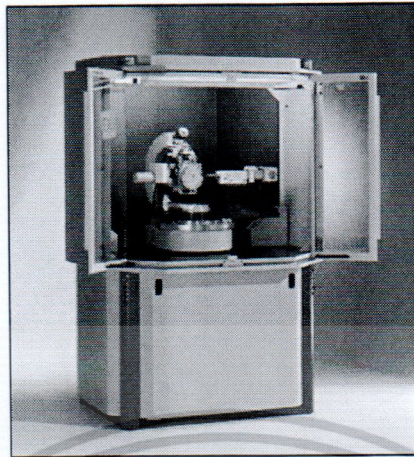
$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจและนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้จะปลด radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกำรเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการเคลื่อนไหวของอนุภาคภายในผลึก ผลึกจะถูกวางบนเครื่อง diffractometer และฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงในแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมและนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่งเทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆจะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิดด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพเคมี และคุณสมบัติเชิงกล

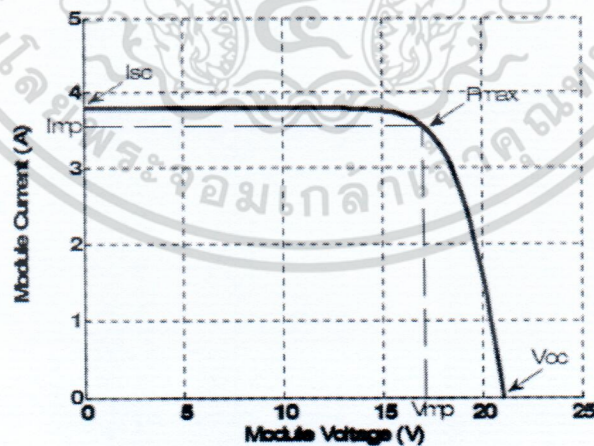


รูปที่ 2.11 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs

2.4.1 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve)

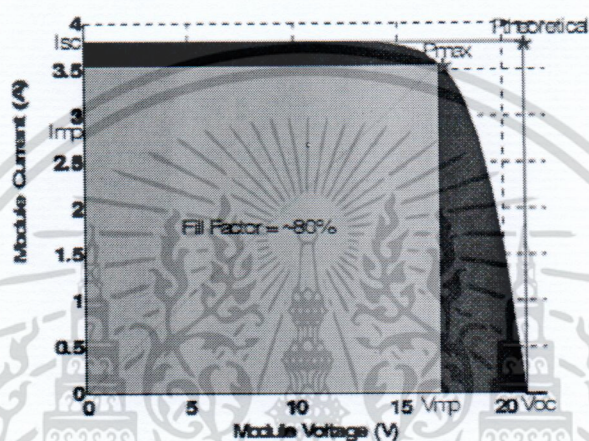
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V curve ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ จะสามารถสร้าง I-V curve ได้ ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP หรือ P_{max})



รูปที่ 2.12 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

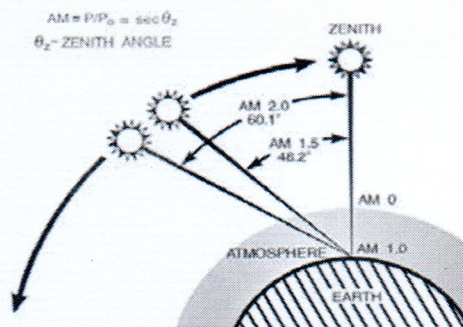
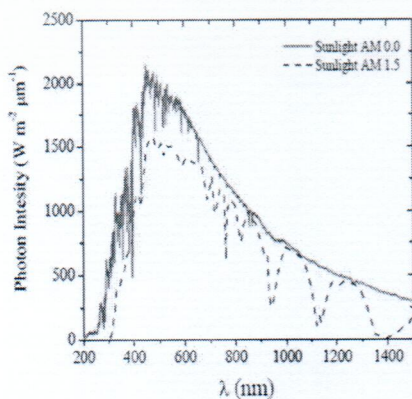
ในการพิจารณา I-V Characteristic หรือ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เรารู้ค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและมีความสำคัญดังต่อไปนี้ ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit Voltage; V_{oc}) ค่ากระแสขณะลัดวงจร (Short circuit current; J_{sc}) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point; MPP) ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power current; I_{mp}) และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power Voltage; V_{mp}) ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 แสดงค่า Fill Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงผิวโลก สามารถอธิบายได้ในรูปของมวลอากาศ (Air Mass, AM) โดยค่า $AM = 1/\cos\theta_z$ เมื่อ θ_z คือ มุม zenith เช่น เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี มีค่า $\theta_z = 0^\circ$ ดังนั้น มี AM เท่ากับ 1.0 สำหรับความเข้มแสงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศกำหนดเป็น AM 0.0 สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จะนิยมศึกษาภายใต้ความเข้มแสงที่ AM 1.5 ความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ที่ AM 0.0 และ 1.5 แสดงดังรูปที่ 2.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 ภาพแสดงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ณ AM 0.0 และ 1.5 [19]

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยเรียกว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, *IPCE*) หรือบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$IPCE(\lambda) = \frac{1240 \times j_{sc} (A/cm^2)}{\lambda(nm) \times I_{inc} (W/cm^2)} \quad \dots (2)$$

จากสมการ (2) เมื่อค่า j_{sc} (short circuit current density) คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด, λ คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด ประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{global}) ประสิทธิภาพรวมของโซลาร์เซลล์หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า (I_{inc}) สามารถหาได้ดังนี้

$$\eta_{global} = \frac{j_{sc} \times V_{oc} \times FF}{I_{inc}} \quad \dots (3)$$

เมื่อ V_{oc} คือ open circuit voltage

FF คือ ค่า Fill Factor คำนวณจาก

I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด

ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor; FF) คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งดูได้จาก IV - Curve และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ สามารถเขียนเป็นสมการที่ 4

$$FF = \frac{P_{max}}{j_{sc} \times V_{oc}} \quad \dots (4)$$

เมื่อ P_{max} คือ ค่ากำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย โดยเริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO₂ nanoparticles) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมไวแสง (Sensitizer) เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุโฟโตอานอด (Photoanode material) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและสัณฐานวิทยา (Morphology) ของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน ตลอดจนศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์ม TiO₂ ลงบนพื้นผิวแก้ว FTO ด้วยวิธีการเคลือบด้วยมือ (Doctor blade) และศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์ม TiO₂ ที่ใช้เป็นวัสดุโฟโตอานอดต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์ที่ผลิตได้

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการเตรียมเป็นฟิล์มสำหรับทำเป็นโฟโตอานอด เคอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์และสำหรับการประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง แสดงดังตารางที่ 3.1 และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการหาลักษณะเฉพาะของสารหรือฟิล์ม สรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สารเคมีและวัสดุ

สารเคมี/วัสดุ	สูตรเคมี	ยี่ห้อ/ความบริสุทธิ์	การใช้งาน
Titanium (IV) <i>n</i> -butoxide	Ti[(CH ₂) ₃ CH ₃ O] ₄	ACROS, 99%	สารตั้งต้นสำหรับ TiO ₂
Distilled water	H ₂ O	-	ใช้เป็นตัวทำละลายต่างๆไป
Sodium hydroxide	NaOH	SHOWA, 98%	ล้างสีย้อมที่ถูกดูดซึม
Acetic acid	CH ₃ COOH	Scharlau, 99.8%	การเตรียม TiO ₂
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	ECHO, 99.95%	การเตรียม TiO ₂
Methanol	CH ₃ OH	ECHO, 99.9%	ทำความสะอาดพื้นผิว
Acetone	CH ₃ COCH ₃	ECHO, 99.9%	ทำความสะอาดพื้นผิว
สารเคมี/วัสดุ	สูตรเคมี	ยี่ห้อ/ความบริสุทธิ์	การใช้งาน
Ethyl cellulose	C ₁₂ H ₂₀ O ₁₀	SHOWA	เตรียม TiO ₂ paste

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α -Terpineol	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_8(\text{CH}_3)_2\text{OH}$	Kantochemical, 95%	เตรียม TiO_2 paste
Iodine	I_2	SHOWA, 99.8%	เตรียมอิเล็กโทรไลต์
Lithium iodide	LiI	ACROS, 99%	เตรียมอิเล็กโทรไลต์
4- <i>tert</i> -Butylpyridine	$(\text{CH}_3)_3\text{CC}_5\text{H}_4\text{N}$	Aldrich, 99%	เตรียมอิเล็กโทรไลต์
1,2-dimethyl-3-propyl imidazolium iodide	$\text{C}_8\text{H}_{15}\text{N}_2\text{I}$	UR, >99.5%	เตรียมอิเล็กโทรไลต์
Acetonitrile	CH_3CN	J.T. Baker, 99.9%	ตัวทำละลายสีย้อม
<i>tert</i> -Butyl alcohol	$\text{C}(\text{CH}_3)_3\text{OH}$	TEDIA, 99.5%	ตัวทำละลายสีย้อม
Pt paste	-	TDP	เตรียมแคโทดอิเล็กโทรด
Surlyn	-	DuPont, DuPont-1702	ตัวผนึกเซลล์ DSSCs
cis- $\text{RuL}_2(\text{SCN})_2$, L= 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid	$\text{C}_{58}\text{H}_{86}\text{N}_8\text{O}_8\text{RuS}_2$ (N719)	Solaronix	เป็นสีย้อมไวแสง
Fluorine-doped tin oxide glass	FTO	Solaronix, $8\Omega/\square$	ซับสเตรต

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ	รุ่น
Surlyn	DuPont, DuPont-1702	ตัวผนึกเซลล์ DSSCs
Reverse osmosis/deionizer system	RDI-10	
Ultrasonic cleaner	DELTA	DC200H
Electronic balance	Sartorius	CP224S
Muffle furnace	SmartLab	PFY700
Rotary-evaporator	EYEL	N-1000

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ	รุ่น
X-ray diffractometer (XRD)	PANalytical	X'Pert PRO MPD
Field-emission scanning electron microscope (FE-SEM)	JEOL/ Hitachi	SM-6500F/ S-4800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power meter	NEWPORT	1935-C
Solar simulator	Oriel	300W Xe

3.2 การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (α -TiO₂nanoparticles) เพื่อใช้เป็นวัสดุโฟโตคาโนดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.2.1 ตวงน้ำกลั่นด้วยกระบอกตวงปริมาตร 65 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร

3.2.2 บีเปดต์ 99.8%, กรดแอสติกปริมาตร 8.0 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ทีละหยด โดยใช้ Magnetic stirrer ช่วยในการผสมสารให้เข้ากัน

3.2.3 ชั่งไทเทเนียม (IV) บิวท็อกไซด์ (TnB) จำนวน 15 กรัม จากนั้นหยดทีละหยดอย่างช้าๆ ลงในสารละลายข้อที่ 2 จนหมดใช้แผ่นพาราฟิล์มปิดคลุมบีกเกอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้สารทั้งหมดระเหยหรือมีสิ่งแปลกปลอมหล่นเข้าไป

3.2.4 คนสารผสมเหล่านี้โดยใช้ Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 วันเมื่อครบกำหนด 5 วัน สารผสมนี้จะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ หรือเป็นโซลของ TiO₂ สีขาวขุ่นที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การคน TnB ในกรดแอสติกโดยใช้ Magnetic stirrer

3.2.5 ถ่ายโซลของ TiO₂ ทั้งหมดออกจากบีกเกอร์ ใส่ลงใน Teflon-lined autoclave (ทำความสะอาด Teflon-lined autoclave ด้วยเอทานอล แล้วปล่อยให้แห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ Teflon-lined autoclave treatment

3.2.6 นำชุดอุปกรณ์ Teflon-lined autoclave treatment เข้าเตาอบ (Muffle furnace) โดยเงื่อนไขในการทำ Hydrothermal treatment ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทำ Hydrothermal treatment ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ระบบที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา
1	100	15 นาที
2	100	20 นาที
3	200	20 นาที
4	200	5 ชั่วโมง

3.2.7 เปิดหลอด Teflon-lined autoclave ที่ทำการ Hydrothermal treatment ที่ครบกำหนดเวลาออกจากเตาอบอย่างระมัดระวัง ถ่าย TiO_2 โซลเจล ใส่ลงในกรวยแยก (Separator funnel) ขนาด 125 มิลลิลิตร จะสังเกตเห็นว่าสารผสมในกรวยแยกมี 2 ชั้น โดยเฉพาะชั้นล่างที่เป็นโซลเจลสีขาวของ TiO_2 ใส่ลงในหลอดพลาสติก (Centrifuge tubes) เท่า ๆ กัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อเร่งการตกตะกอนด้วยเครื่อง Ultra-centrifuge โดยใช้เงื่อนไขการปั่นเหวี่ยงเร่งการตกตะกอนที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่อง Ultra-centrifuge สำหรับการปั่นเหวี่ยงเร่งการตกตะกอน

3.2.8 นำ Centrifuge tubes ออกจากเครื่องปั่นเหวี่ยง ดูดตัวทำละลายส่วนบนใสๆ ทิ้งให้เหลือ เฉพาะตะกอน TiO_2 ไว้ จากนั้นเติม 99% เอทานอลลงไปผสมประมาณ 10 มิลลิลิตร ใช้ช้อนคนโซลเจลให้ ผสมกับตัวทำละลายให้ดีทุกหลอด จากนั้นนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงอีกครั้งหนึ่ง

3.2.9 รินตัวทำละลายที่อยู่ส่วนบนทิ้งไป (เป็นครั้งที่ 3) ขูดเอาตะกอน TiO_2 ทั้งหมดใส่รวมกันลงใน ปีกเกอร์ขนาด 150. มิลลิลิตร จากนั้นเติม 99% เอทานอล ลงไปประมาณ 40 มิลลิลิตร คนสารกับตัวทำ ละลายให้ผสมกันโดยใช้ Magnetic stirrer (ปิดปีกเกอร์ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม) คนทิ้งไว้ 1 คืน

3.2.10 ชั่ง 99% เอทานอล จำนวน 15 กรัม ลงในปีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งเอทิล เซลลูโลส (EC, 10 cps) จำนวน 1.0 กรัม แล้วเทใส่ปีกเกอร์ข้างต้น จากนั้นคนสารดังกล่าวทิ้งไว้ 1 คืน

3.2.11 นำสารละลายเอทิลเซลลูโลสในข้อ 10) ที่ละลายแล้วใส่ลงปีกเกอร์ที่มีโซลเจลของ TiO_2 จากนั้นทำการผสมสารนี้โดยใช้ Magnetic stirrer เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารผสมกันดี

3.2.12 ชั่งแอลฟา-เทอร์ปีนอล (α -Terpineol) จำนวน 13 กรัม ใส่ลงในสารละลายผสมในข้อที่ 12 แล้วทำการผสมสารนี้โดยใช้ Magnetic stirrer เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารผสมกันดีอีกครั้ง

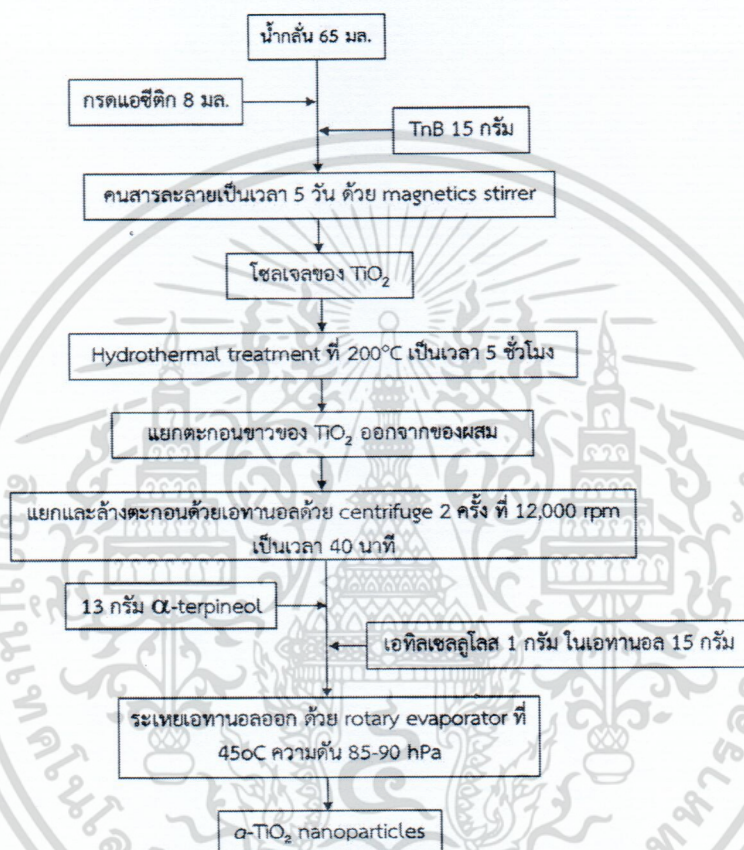
3.2.13 จากนั้นนำของผสมของ TiO_2 ที่ได้มาระเหยเอทานอลออก โดยใช้เครื่อง Rotary evaporator โดยถ่ายสารทั้งหมดลงใน Round-bottomed flask ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยใช้เงื่อนไข ในการระเหย คือ อุณหภูมิการกลั่นระเหยที่ 45°C ความดันต่ำสุด 85-90 hPa



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 เครื่อง Rotary evaporator สำหรับการระเหยเอทานอล

3.2.14 เมื่อโซลเจล TiO_2 ที่ได้มีลักษณะข้นหนืด ให้นำออกจาก Rotary จากนั้นนำไปบดด้วย โกร่งบดสารเพื่อให้โซลเจลมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก (Paste) เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.5 แผนผังการเตรียมอะนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

3.3 การเตรียมพื้นผิว (Substrate) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้เราใช้กระจกเป็นวัสดุพื้นผิวสำหรับประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นกระจกที่เคลือบด้วย Fluorine Tin Oxide (FTO) เอาไว้ด้านหนึ่งเพื่อให้สามารถเป็นกระจกที่นำไฟฟ้าได้ (Transparent Conducting Oxide glass, TCO glass) ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนแรกต้องทำการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของแผ่นกระจกที่จะใช้ งานก่อน โดยใช้ multi-meter เช็ค โดยแต่ละลงไปพื้นผิวของแผ่นกระจกถ้าเข็มของหน้าปัทมกระดิก แสดงว่าเป็นด้านที่นำไฟฟ้าได้ ส่วนอีกด้านหนึ่งเข็มต้องไม่กระดิกคือเป็นเลขศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ทำการตัดกระจกให้ได้ขนาด 1.67 ซม. x 2.0 ซม. โดยตัดทางด้านที่ไม่นำไฟฟ้า(non-conductive) เพราะถ้าตัดทางด้านที่เป็น conductive จะทำให้กระจกเป็นรอย ส่งผลให้ขั้นตอนการเคลือบไม่เรียบสม่ำเสมอ

3.3.3 ทำการหมุนแกนหัวเข็มเพื่อปรับระดับหัวเข็มลงมาให้ตำแหน่งหัวเข็มสัมผัสกับกระจกพอดี ไม่ควรหมุนให้หัวเข็มตัดกระจกตึงแน่นเกินไป ในขณะที่ทำการกรีดควรกรีดเพียงรอบเดียวเท่านั้น ควรกรีดจากด้านริมเข้ามาตรงกลางแล้วกลับด้านริมอีกฝั่งหนึ่งตัดเข้าสู่ตรงกลางเพื่อให้เราใช้มือจับแผ่นกระจกได้ถนัด ในการกรีดแต่ละครั้งต้องลองปรับระดับหัวตัดใหม่ทุกครั้ง เพราะความหนาของกระจกในการตัดแต่ละครั้งอาจเปลี่ยนไป

3.3.4 จากนั้นนำกระจกที่ตัดแล้วมาทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic cleaner โดยใช้ตัวทำละลาย 4 ชนิด โดยล้างตามลำดับดังนี้

- น้ำยาทำความสะอาดเครื่องแก้ว 30 นาที
- น้ำกลั่น 2 ครั้งๆ ละ 30 นาที
- แอซิโตน 30 นาที และ
- เมทานอล 30 นาที

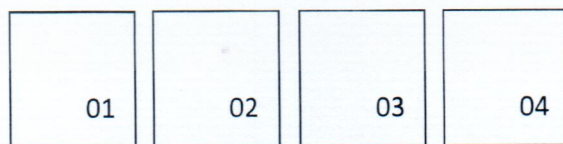
โดยนำแผ่นกระจกที่ตัดเสร็จแล้วมาวางเรียงกันบนจานพลาสติก แล้วนำไปใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 1 ลิตร จากนั้นเติมตัวทำละลายลงไปให้ท่วมกระจกพอดี

3.3.5 เมื่อล้างเสร็จ นำจานพลาสติกที่มีแผ่นกระจกออกจากบีกเกอร์แล้วทำให้แห้ง โดยการเข้าตู้อบ เพื่อรอการใช้งานต่อไป

3.4 การเตรียมฟิล์มบาง TiO_2 สำหรับใช้เป็นโฟโตแอโนด

ในงานวิจัยนี้เราเลือกวิธีการเตรียมฟิล์มสำหรับใช้เป็นโฟโตแอโนด โดยได้เลือกวิธีการเคลือบ (Screen) TiO_2 paste ลงบนพื้นผิวแก้วที่ทำความสะอาดแล้วด้วยมือ (Doctor blade) ซึ่งมีวิธีการเคลือบดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 เขียนชื่อลงบนแผ่นกระจก FTO ด้านที่ไม่นำไฟฟ้า (non-conductive) ด้วยปากกาสีกัดกระจก ดังรูปที่ 3.6 เสร็จแล้วใช้ลูกยางเป่าลมเอาเศษกระจกออกจนหมด



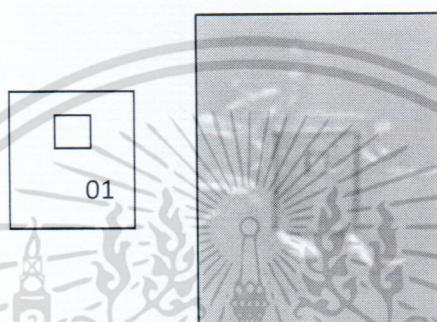
รูปที่ 3.6 ลักษณะของการเขียนชื่อลงบนกระจก FTO ด้านที่ไม่นำไฟฟ้า

3.4.2 นำก้านสำลี (Cotton brush) ชุบ 99.5% เอทานอล เช็ดทำความสะอาดทั้งสองด้านของแผ่น FTO เบาๆ โดยเช็ดไปทางเดียวกันแล้วเป่าลมให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ทำความสะอาดแผ่นสกรีน (Screen plate) และพายพลาสติก (Paddle) ด้วย 95% เอทานอลโดยใช้ผ้าที่สะอาดเช็ดถูทั้งบนและล่างของแผ่นสกรีน จากนั้นเป่าลมให้แห้ง

3.4.4 ตัก TiO_2 paste ก้อนเล็ก ๆ ประมาณเท่าเมล็ดข้าวโพดมาป้ายลงบนแผ่นสกรีนเปล่า จากนั้นนำแผ่นสกรีนมาวางทาบลงบนแผ่น FTO ที่ติดเทปใสทำเป็นบล็อกขนาด $0.4 \times 0.4 = 0.16 \text{ cm}^2$ ดังรูป 3.7 ให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสม จากนั้นใช้พายพลาสติกที่สะอาดปาด TiO_2 paste ให้สารทั้งหมดลงไปเคลือบกับแผ่นแก้ว FTO โดยให้ตรงตำแหน่งที่เหมาะสม



รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกสกรีนขนาด $0.4 \times 0.4 \text{ cm}^2$ ที่ทำจากสก็อตเทปใส

3.4.5 นำแผ่น FTO ที่ถูกเคลือบด้วย TiO_2 past แล้วออกไปวางไว้ในจานกลมใส (Dish) ปิดฝาเพื่อป้องกันฝุ่นและความชื้น ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเอาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อระเหยตัวทำละลายให้แห้ง

3.4.6 จากนั้นนำฟิล์มไปเผา (Annealing) โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) ด้วยเงื่อนไขของการเผา ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขในการทำเผา (Annealing) ของแผ่นฟิล์มสำหรับใช้เป็นโฟโตอานอด

ระบบที่	อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	เวลา
1	110	10 นาที
2	110	15 นาที
3	400	1 ชั่วโมง
4	400	3 นาที

3.4.7 ในงานวิจัยนี้เราได้กำหนดเงื่อนไขของการเคลือบเป็น 1, 2, 3, และ 4 ชั้น ซึ่งหลังจากทำการเผาแล้ว ควรปล่อยให้ฟิล์มเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาเคลือบทับในตำแหน่งเดิมอีกครั้งหนึ่งด้วยวิธีการเคลือบดังกล่าวข้างต้น

3.4.8 ทำความสะอาดพื้นผ้าสกรีนให้สะอาดด้วย 95% เอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมฟิล์มสำหรับใช้เป็นเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

สำหรับการเตรียมฟิล์มเพื่อใช้เป็นเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode) ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้วิธีการเคลือบแบบเดียวกันกับการเคลือบฟิล์ม TiO_2 ลงบนแผ่น FTO คือการเคลือบด้วยมือ (Doctor blade) แต่เราจะใช้ Pt paste ที่เป็นวัสดุทางการค้าสำหรับเตรียมขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้การเคลือบลงบนพื้นผิวแก้ว FTO ขนาด $1.67 \times 2.00 \text{ cm}^2$ ที่ผ่านการเจาะรูสองรูในตำแหน่งตรงกลางแผ่น และทำความสะอาดแผ่นแก้ว FTO มาแล้วด้วยวิธีเดียวกันกับการทำความสะอาดแผ่นแก้วที่ใช้ทำเป็นโฟโตอานอด

3.6 การเตรียมสารละลายสีย้อมและการแช่สีย้อม

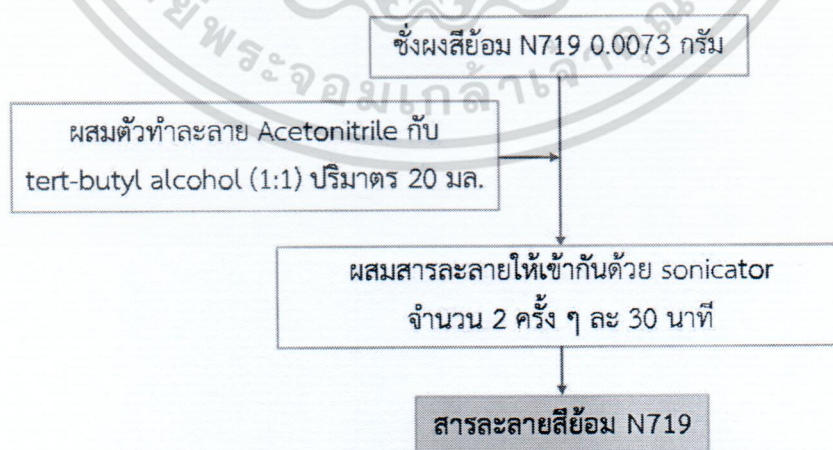
การเตรียมสารละลายสีย้อมไวแสง (Sensitizer solution) ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะต้องดำเนินการอย่างละเอียดและถูกต้อง เนื่องจากเป็นสารมีราคาแพง และมีความจำเพาะต่อตัวทำละลายสำหรับในงานวิจัยนี้เราได้กำหนดให้ใช้สีย้อมไวแสงประเภทสารเชิงซ้อนของรูทีเนียม ($\text{C}_{58}\text{H}_{86}\text{N}_8\text{O}_8\text{RuS}_2$; N719) ซึ่งเป็นสีย้อมไวแสงที่ได้รับความนิยมมาก จัดเป็นสีย้อมที่มีเสถียรภาพต่อความร้อนและแสงได้พอสมควร สามารถนำกลับมาใช้หลายครั้งโดยที่สมบัติการดูดกลืนแสงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย ดังต่อไปนี้

3.6.1 เตรียมสารละลาย N719 ที่มีความเข้มข้น $3 \times 10^{-4} \text{ M}$ โดยการชั่งผง N719 ที่ผ่านการอบมาแล้วที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 0.0072 กรัม

3.6.2 จากนั้นละลายด้วยตัวทำละลายผสมของอะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) กับเทอร์เชียรีบิวทิล แอลกอฮอล์ (*tert-butyl alcohol*) ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.6.3 นำสารละลาย N719 ไปผสมโดยวิธีใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ผงของ N719 ละลายได้ดีไม่เป็นตะกอนนอนกัน

3.6.4 เทสารละลายสีย้อมไวแสงที่เตรียมเสร็จแล้วลงในขวดสีชา หรือในขวดแก้วที่หุ้มด้วยฟอยด์เพื่อไม่ให้ถูกแสง



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสีย้อมไวแสง N719

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนในการแช่ฟิล์ม TiO_2 ที่ถูกเคลือบบนแผ่นกระจก FTO ด้วยสีย้อม N719 (Soaking the dye) ในส่วนที่เป็นวัสดุโฟโตอานอด เริ่มต้นด้วยการนำฟิล์มที่ถูกเคลือบลงบน FTO และละชั้นมาวางในแนวตั้งลงในภาชนะปิกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยพยายามอย่าให้ผิวหน้าของฟิล์มในแต่ละอันสัมผัสกัน เพราะหากกระจก FTO ล้มหรือผิวหน้าที่เคลือบสัมผัสกันอาจจะทำให้สีย้อมไม่ถูกดูดซับโดยสีย้อมได้ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า จากนั้นเทสารละลายสีย้อม N719 ลงอย่างช้าๆ จนท่วมกระจก FTO ทั้งหมด เงื่อนไขสำหรับการแช่สีย้อมในงานวิจัยนี้ คือ แช่ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.7 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เราเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบไอโอด์/ไตรไอโอด์ (I^-/I_3^-) ซึ่งเป็นระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ได้รับความนิยมให้เป็นสารตัวกลางในการส่งผ่านอิเล็กตรอนสำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยใช้อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile) เป็นตัวทำละลาย ที่ประกอบด้วย 0.5 M 1,2-Dimethyl-3-propylimidazolium iodine (DMPII), 0.1 M Lithium iodide (LiI), 0.1 M Iodide (I_2), และ 0.5 M 4-*tert*-butylpyridine (4-TBP)

3.8 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ขั้นตอนการประกอบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell Assembly) มีขั้นตอนการประกอบ ดังต่อไปนี้

3.8.1 ใส่ถุงมือยางให้เรียบร้อย จากนั้นปรับอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า ประมาณ 200°C

3.8.2 ดูดอะซิโตไนไตรล์ด้วยหลอดหยด แล้วชะล้างไปยังฟิล์ม TiO_2 ที่แช่สีย้อมไวแสงไว้แล้วเพื่อชะทำความสะอาด แล้วใช้ก้านสำลีชุบเอทานอลเช็ดทำความสะอาดรอบๆ ฟิล์ม TiO_2 และที่ขอบของกระจก FTO ด้วย

3.8.3 นำแผ่น Surlyn ขนาด $60\ \mu\text{m}$ ที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ขนาด $1.20 \times 1.67\ \text{cm}$ และเจาะรูตรงกลาง ขนาด $1.60 \times 1.67\ \text{cm}$) จากนั้นใช้ก้านสำลีชุบเอทานอลเช็ดทำความสะอาดแผ่น Surlyn ดังกล่าว จากนั้นนำมาวางครอบแผ่น Pt เคาร์บ์เตอร์อิเล็กโทรดที่ผ่านการเคลือบและเผามาแล้ว โดยนำมาวางครอบรู 2 รู โดยให้อยู่ตรงกลางแผ่นในตำแหน่งสมดุล

3.8.4 นำแผ่น TiO_2 ที่ถูกเคลือบบนแผ่นกระจก FTO และผ่านการแช่ด้วยสีย้อม N719 แล้ว มาประกอบให้อยู่ในตำแหน่งเหลื่อมลงมาด้านล่างของรูสองรูเล็กน้อย

3.8.5 จากนั้นค่อยๆ ใช้คีม (Forceps) จับชิ้นงานทั้งหมดแล้วนำไปวางแล้วกด (Press) ลงบนเตาไฟฟ้า ประมาณ 12 - 14 วินาที สังเกตดูอย่าให้มีฟองอากาศ เพราะฟองอากาศนั้นจะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3.8.6 จากนั้นทำความสะอาดกระบอกฉีดยาก่อนใช้งานด้วยอะซิโตไนไตรล์ ประมาณ 4-5 ครั้ง ชั้บด้วยกระดาษทิชชูแล้วดูดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขึ้นมาเล็กน้อยโดยอย่าให้มีฟองอากาศ

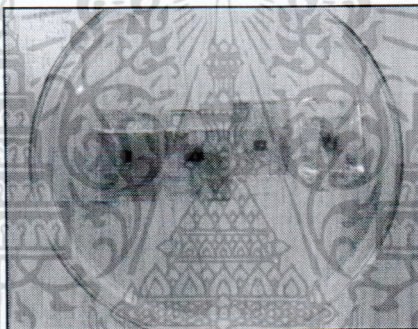
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.7 จากนั้นฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้เข้าไปในรูของแผ่นคาร์บอนเตอร์อิเล็กโทรดอย่างช้าๆ ให้สารละลายไหลเข้าไปให้เต็ม จากนั้นใช้กระดาษทิชชูปิดรูสองรูให้แน่น แล้วสลัดแรง ๆ ให้สารละลายไหลเข้าไปเติมพื้นที่ของฟิล์ม TiO_2 อย่างทั่วถึง ทั้งช่องซ้ายและขวาของขอบ TiO_2 แล้วฉีดสารละลายเข้าไปอีกจนกระทั่งเต็มรูทั้งสอง

3.8.8 ใช้ก้านสำลีชุบเอทานอลทำความสะอาดที่ผิวหน้าของแผ่นคาร์บอนเตอร์อิเล็กโทรดให้สะอาด แล้วเช็ดให้แห้งอีกครั้งด้วยก้านสำลีที่แห้งและสะอาด

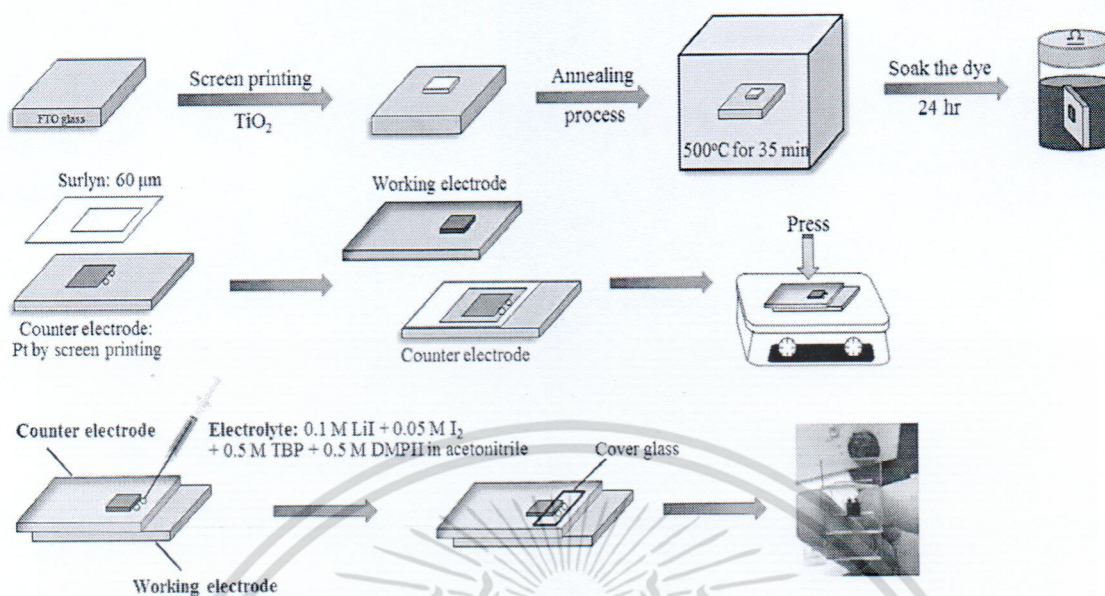
3.8.9 ใช้แผ่น Surlyn ขนาด $30 \mu\text{m}$ ที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $0.70\text{cm} \times 1.0 \text{cm}$ ที่ทำความสะอาดด้วยอะซิโตนไตรลและแห้งดีแล้ว นำมาปิดรู 2 รู ให้ครอบคลุมทั้งหมด

3.8.10 จากนั้นนำแผ่นกระจกใส ขนาด $0.8 \text{cm} \times 1.3 \text{cm}$ มาวางทับปิดสองรูอีกชั้นหนึ่งในลักษณะที่ขวางกั้นรูเพื่อไม่ให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไหลหกออกมา แล้วนำขึ้นไปแล้วกดบนเตาไฟฟ้าประมาณ 8 วินาที เพื่อให้แผ่นแก้วผนึกปิดรูในสภาพเรียบร้อยดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงหลังการประกอบเสร็จ

3.8.11 ใช้ก้านสำลีชุบเอทานอลทำความสะอาดที่ผิวหน้าของเซลล์ให้สะอาดอีกครั้ง ก่อนนำไปวัดค่า IV และควรรีบนำไปวัดโดยเร็ว เพื่อยังคงรักษาสภาพของอิเล็กโทรไลต์ไม่ให้แห้ง รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการประกอบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell Assembly) ทั้งหมด



รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงทั้งหมด

3.9 การหาลักษณะเฉพาะของวัสดุและการวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

3.9.1 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

ในขั้นตอนแรกของการหาลักษณะเฉพาะเริ่มต้นด้วยการหาสมบัติทางผลึก (Crystalline properties) ของผง TiO_2 ที่เตรียมได้ เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะของเฟสทั่วไป (Common phase) ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ภายใต้เงื่อนไขที่ 45 kV จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าการเลี้ยวเบนมาตรฐาน (Joint Committee for Powder Diffraction Standards; JCPDS) สำหรับผง TiO_2

3.9.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของ TiO_2 และความหนาของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ขนาดอนุภาค สัณฐานวิทยา และความหนาของฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง สามารถยืนยันได้โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการเคลือบ $\alpha\text{-TiO}_2$ อนุภาคนาโนลงบนพื้นผิวแก้ว FTO จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำฟิล์มดังกล่าวไปวิเคราะห์

3.9.3 การวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Photocurrent density-Voltage ; I-V)

หลังจากที่ทำการฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงในช่องว่างของขั้วโพโตอานและแคโทดอิเล็กโทรดไทเทเนียมเรียบร้อยแล้ว ควรดำเนินการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานทันที เนื่องจากการป้องกันการสลายอิเล็กโทรไลต์แห้ง ในการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะวัดโดยใช้เครื่องโซลาร์จำลอง (Solar simulator) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Photocurrent density และ Voltage ทั้งในเงื่อนไขมีแสงและไม่มีแสง (Light and dark condition)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองตามวิธีที่ได้ดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 โดยได้แบ่งผลการอภิปรายออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนที่ 1 เป็นการอภิปรายผลจากการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (α -TiO₂) ที่ใช้เป็น Meso-porous oxide สำหรับประยุกต์ใช้เป็นโฟโตแอโนด (α -TiO₂Photoanode) ส่วนที่ 2 คือ การหาลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยา (Micro-structure and Morphology) ของ α -TiO₂ อนุภาคนาโนที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction Analysis (XRD) และ Scanning Electron Microscopy (SEM) และส่วนที่ 3 เป็นการอภิปรายถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ที่ประดิษฐ์ขึ้น (η) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของชั้นฟิล์ม α -TiO₂ ที่ใช้เป็นวัสดุโฟโตแอโนดต่อค่า η ของเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 ผลของการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO₂ nanoparticles) สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมไวแสง (Sensitizer) เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุโฟโตแอโนด (Photoanode material) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันของปริมาณสารตั้งต้นของไทเทเนียม กรดย่อยสลายและปริมาณของตัวทำละลาย และเงื่อนไขสำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ได้แก่ อุณหภูมิและเวลา พบว่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดอะนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของอะนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

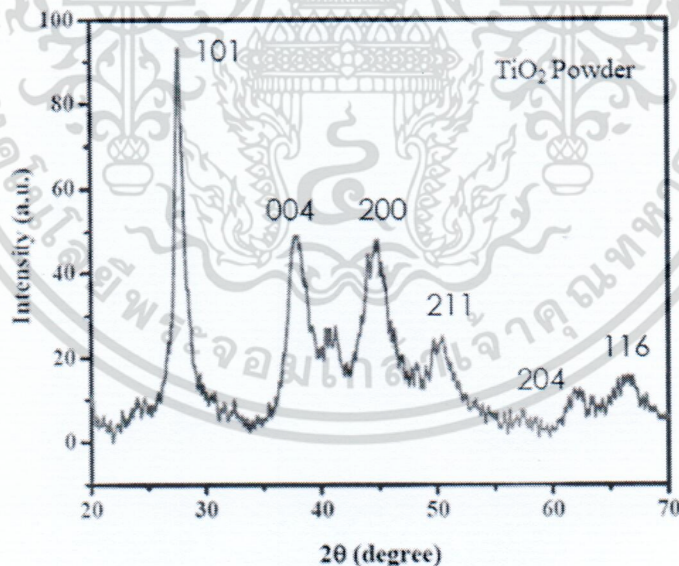
เงื่อนไขของการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์			เงื่อนไขของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	
สารตั้งต้น	TnB	15 กรัม	อุณหภูมิ	200 °C
สารย่อยสลาย	CH ₃ COOH	8 มิลลิลิตร	เวลา	5 ชั่วโมง
ตัวทำละลาย	H ₂ O	65 มิลลิลิตร		



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

4.2 การหาลักษณะเฉพาะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

ในงานวิจัยนี้ อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (α -TiO₂) ถูกเตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal treatment) ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยมีไทเทเนียม (IV) บิวทอกไซด์ (TnB) เป็นสารตั้งต้น สมบัติทางผลึก (Crystalline properties) ของผง α -TiO₂ ที่เตรียมได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ภายใต้เงื่อนไขที่ 45 kV ดังแสดงในรูปที่ 4.2



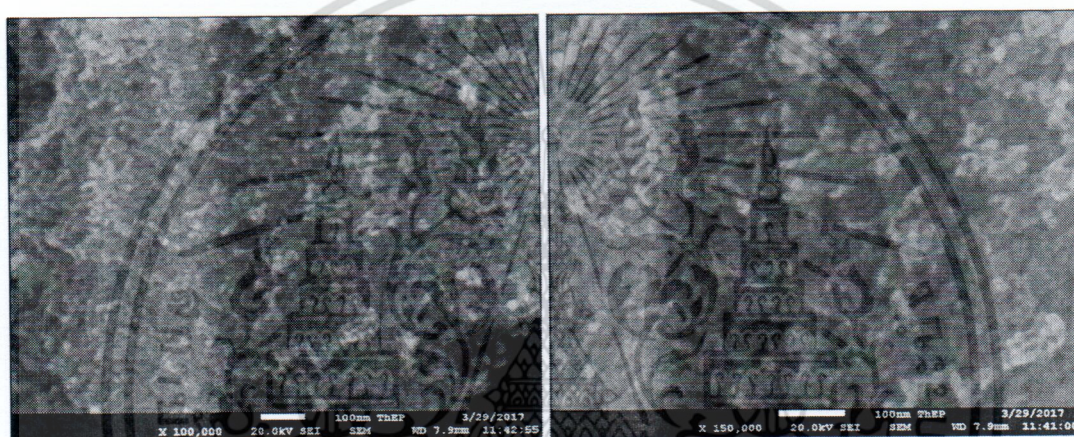
รูปที่ 4.2 แบบ XRD ของ TiO₂ ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

จากผลของ XRD แสดงให้เห็นว่าพีคการเลี้ยวเบน (Diffraction peaks) ทั้งหมดของ TiO₂ ที่เตรียมได้โดยไม่ได้ผ่านการเผา (Non-annealing) สอดคล้องกันกับระยะที่เป็นอะนาเทส (anatase phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TiO₂) บริสุทธิ์ทั้งหมด เมื่อเทียบกับฐานข้อมูล (JCPDS card No. 21-1272) โดยไม่มีฟีกที่เป็นมลทินอื่นปรากฏอยู่เลย ซึ่งผง α -TiO₂ ตัวอย่างแสดงพีคหลัก 5 ตำแหน่ง อยู่ที่ 25.3 °, 38.0 °, 48.2 °, 55.0 °, และ 62.7 ° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (101), (004), (200), (211), และ (204) ตามลำดับ

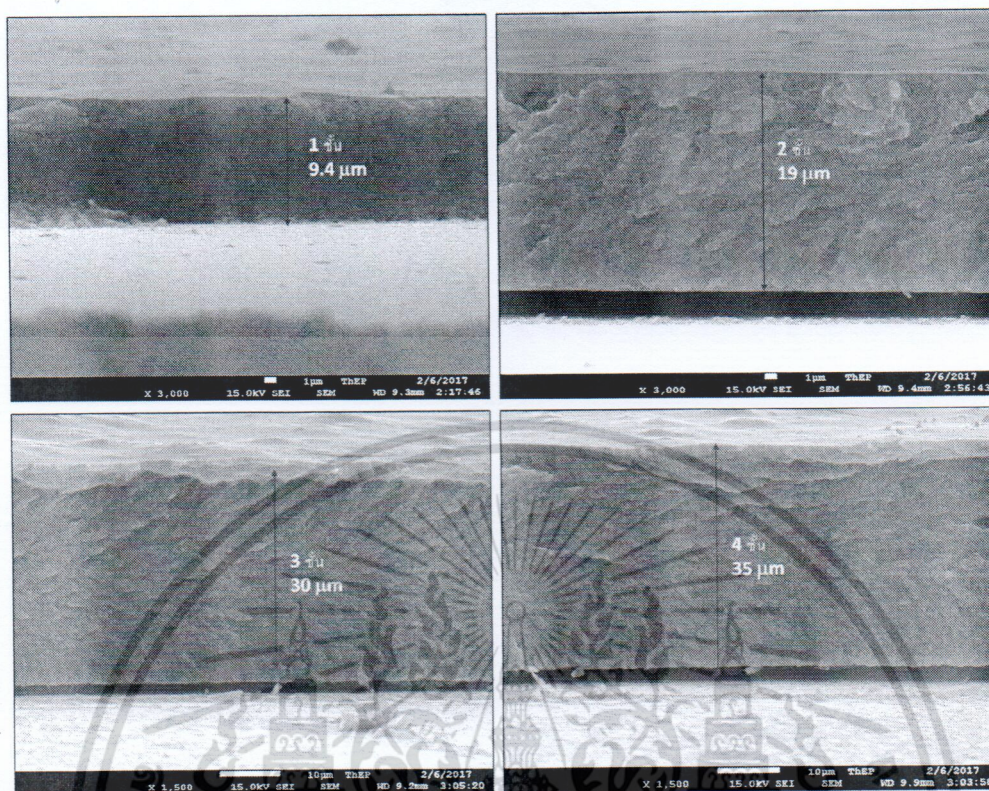
ขนาดอนุภาคและสัญญาณวิทยาของไทเทเนียมอนุภาคนาโน ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง สามารถยืนยันได้โดยภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscopy (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าอนุภาคของ α -TiO₂ อนุภาคนาโนมีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphericle particle) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-30 nm ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนเล็กน้อยและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของ α -TiO₂ อนุภาคนาโน ที่เตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ 200 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (ก) ที่กำลังขยาย x 100,000 และ (ข) ที่กำลังขยาย x 150,000

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) เราได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบเซลล์โดยใช้ α -TiO₂ paste ขนาดอนุภาคประมาณ 20 – 30 nm เป็นชั้นดำเนินการ (Active layer) โดยการเคลือบลงบนพื้นผิวกระจก FTO ด้วยมือ ในงานวิจัยนี้เรากำหนดจำนวนของชั้นดำเนินการเป็น 1, 2, 3, และ 4 ชั้น ตามลำดับ ความหนาของชั้นฟิล์มในแต่ละแบบถูกวัดด้วยภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscopy (SEM) ในรูปของภาพตัดขวาง (Cross-sectional) ของชั้นฟิล์ม α -TiO₂ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 จากรูปภาพตัดขวาง (Cross-Sectional) ของฟิล์ม α -TiO₂ จะเห็นว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ ความหนาของฟิล์มจะมากขึ้นตามจำนวนชั้นของการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



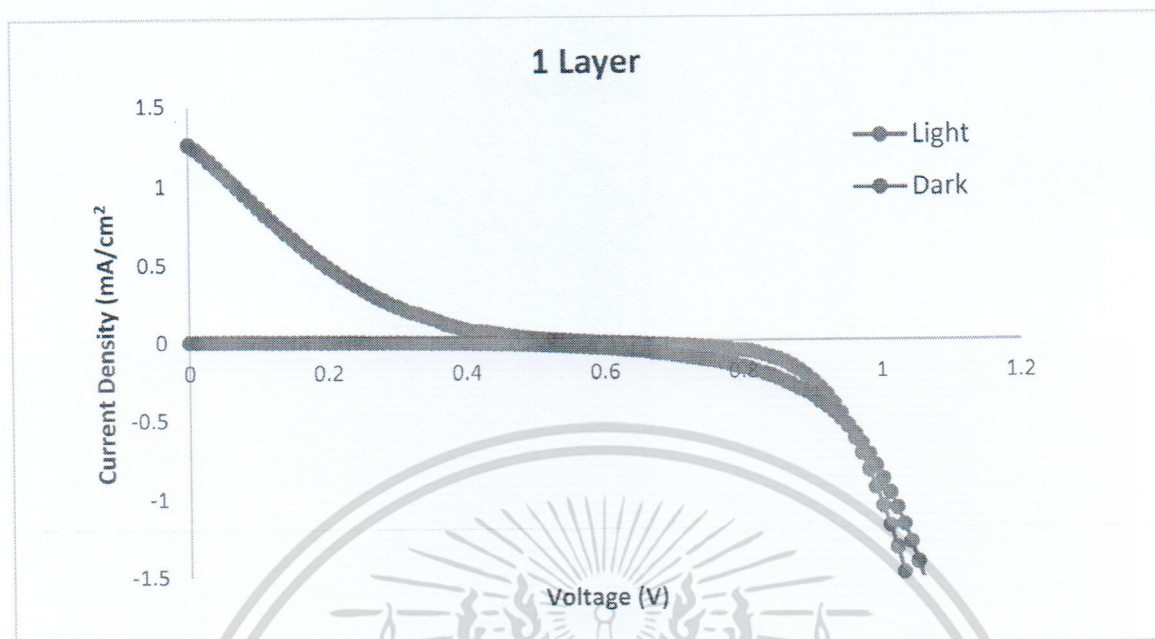
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม TiO_2 ตามจำนวนชั้นของการเคลือบต่าง ๆ

4.3 การวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้

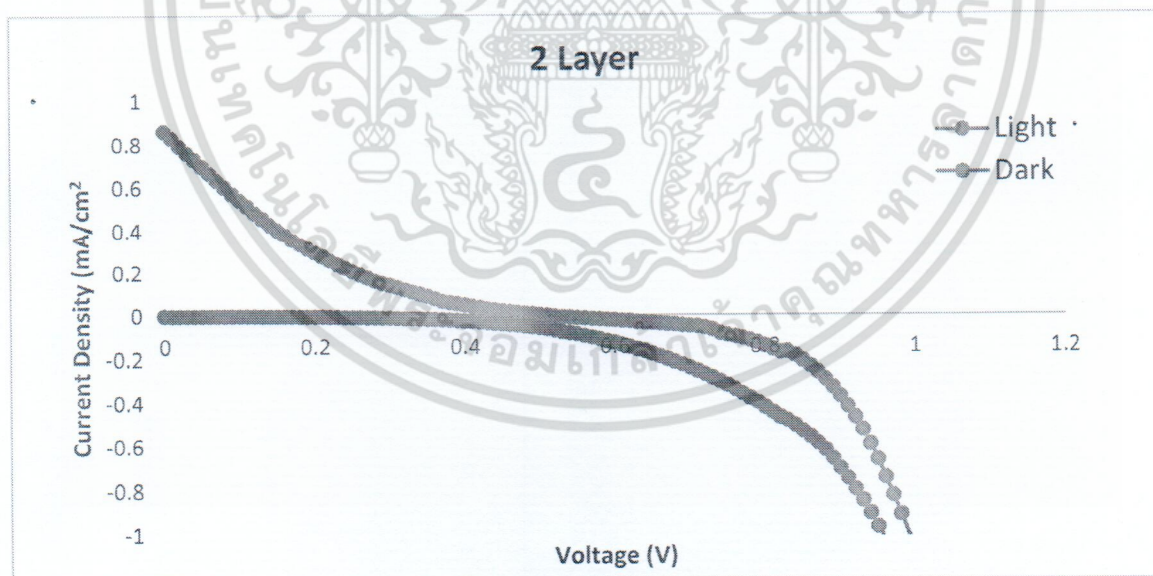
ในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เราจะดูได้จากกราฟ *I-V*-Curve (รูปที่ 4.5 – 4.8) และผลการเก็บข้อมูล (Excel data) สามารถทำการคำนวณเป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ J_{\max} , V_{\max} , P_{\max} , J_{sc} , V_{oc} , และ FF ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวอย่างสามารถแสดงได้จากข้อมูลดังตารางที่ 4.3

จากกราฟ *I-V* Curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Photocurrent density และ Voltage ของเซลล์ในที่มีดและเมื่อถูกฉายแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่า เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด (Short circuit current density; J_{sc}) หรือค่า Photocurrent density (mV/cm^2) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (1.26, 0.86, 0.82, และ $0.51 \text{ mV}/\text{cm}^2$) ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นหรือความหนา (Thickness) ของการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จะมีผลทำให้อัตราการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วโฟโตอานอดไปยังขั้วแคโทดอิเล็กโทรดได้ยากและยาวนานขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการไหลของอิเล็กตรอนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

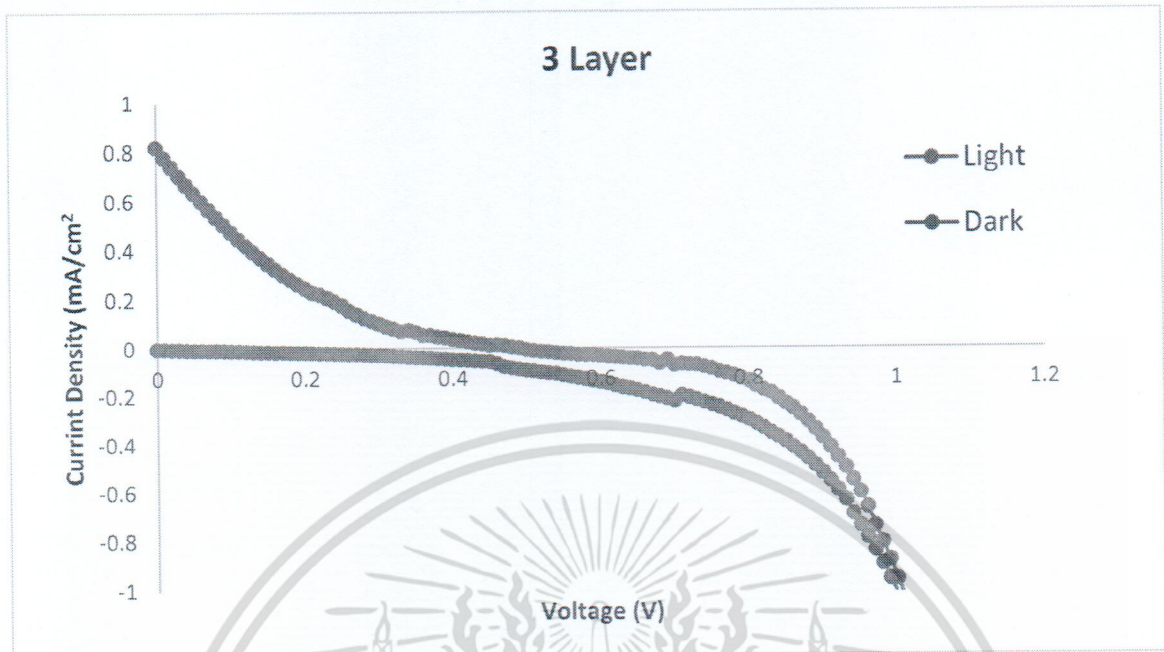


รูปที่ 4.5 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 1 ชั้น

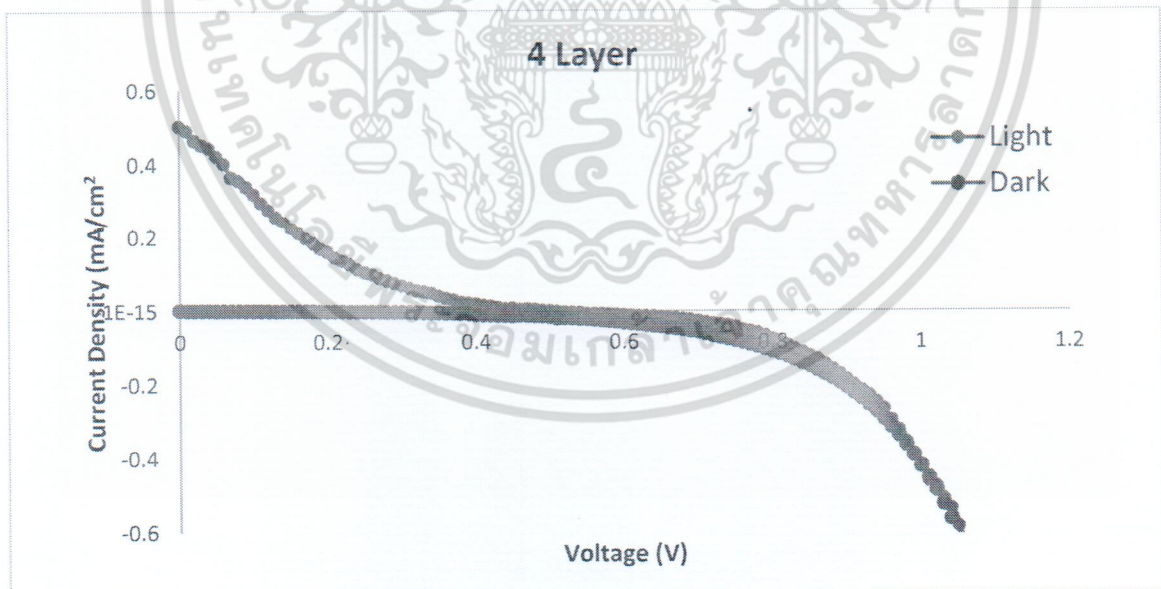


รูปที่ 4.6 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 3 ชั้น



รูปที่ 4.8 แสดงเส้นโค้ง Photocurrent density-Voltage (IV Curve) ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเคลือบ 4 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 สรุปผลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

จำนวนชั้นของ TiO_2	ความหนา (μm)	J_{max} (mA/cm^2)	V_{max} (V)	P_{max} (mW/cm^2)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
1	9.4	0.63	0.16	0.1	1.26	0.57	0.14	0.10
2	19.0	0.32	0.19	0.06	0.86	0.51	0.14	0.06
3	30.0	0.3	0.17	0.05	0.82	0.49	0.13	0.05
4	35.0	0.2	0.17	0.03	0.51	0.51	0.13	0.03

จากตารางที่ 4.3 เป็นที่สังเกตได้ชัดเจนว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด (J_{sc}) ที่ลดลงเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบางเพิ่มขึ้น จะสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Photo-electric conversion efficiency; η) ที่ลดลง (0.10, 0.06, 0.05, และ 0.03%) ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปได้ว่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก (มากกว่า $12 \mu\text{m}$) ส่งผลให้การดูดซับหรือการแทรกซึมของสีย้อมไวแสงได้เข้าไปด้านในของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ได้น้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากค่า J_{sc} ที่ลดลง [7]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและออกแบบการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO_2 nano-particle) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับโมเลกุลของสีย้อมไวแสง (N719) จากการวิจัยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน เตรียมได้จากไทเทเนียม (IV) บิวทอกไซด์ (TnB) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของไทเทเนียมถูกย่อยสลายด้วยกรด จากนั้นผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยใช้กระบวนการทางความร้อน (Hydrothermal process) ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทำการเปลี่ยนระบบให้อยู่ในตัวทำละลายที่เป็นเอทานอล แล้วทำให้เป็นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไป

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน ที่เตรียมได้ถูกวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของ TiO_2 และความหนาของชั้นฟิล์มด้วยสัณฐานวิทยา (Morphology) เช่น ขนาดอนุภาค รูปร่างอนุภาค และเฟส (Phase) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) จากผลของ XRD แสดงให้เห็นว่าเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction peaks) ทั้งหมดของผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่เตรียมได้โดยไม่ได้ผ่านการเผา (Non-annealing) สอดคล้องกันกับระยะที่เป็นอะนาเทส (Anatase phase TiO_2) บริสุทธิ์ จากการศึกษาดูด้วยภาพถ่าย SEM พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม (Sphericle particle) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-30 nm ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนเล็กน้อยและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุในการทำเป็นโฟโตอานอดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ในการศึกษากระบวนการเตรียมชั้นฉนวนบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 film) นักวิจัยใช้เทคนิคการเคลือบด้วยมือ (Doctor blade) สำหรับเคลือบเป็นชั้นโฟโตอานอด (Photoanode layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สะดวกและรวดเร็ว สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ด้วยจำนวนครั้งของการเคลือบ ซึ่งยืนยันได้จากภาพถ่าย SEM

ดังนั้น จากข้อสรุปทั้งหมดข้างต้นจึงสามารถบอกได้ว่าฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่เคลือบลงบนกระจก FTO ที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นวัสดุโฟโตอานอด (Photoanode material) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การศึกษาระบวนการประกอบหรือประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง นักวิจัยพบว่า เป็นวิธีที่ง่าย สะดวกและรวดเร็ว สามารถทำให้ห้องปฏิบัติการได้ และใช้เวลาไม่นาน ในส่วนของประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เซลล์ทั้งหมดมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในปริมาณค่อนข้างน้อยในขณะที่ทำการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

การเตรียมสารเคมี เนื่องจากการเตรียมสารเคมี $\alpha\text{-TiO}_2$ nanoparticles ไม่ได้มีการควบคุมในเรื่องของสิ่งปนเปื้อนและอุณหภูมิจึงทำให้การเตรียมสารเคมีในบางครั้งมีสิ่งปนเปื้อน ปัญหาในเรื่องของการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เนื่องจากเครื่องมือที่ต้องใช้ในการทำการทดลองบางอย่างไม่ได้อยู่รวมกัน ทำให้ต้องเคลื่อนย้ายสารเคมีหรือชิ้นงานบ่อยๆ และในส่วนของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เราพบว่ามีปัญหาในเรื่องของการกำหนดเวลา เนื่องจากเตาที่ใช้เป็นแบบ Manual จึงยากต่อการตั้งเวลาที่ใช้จริง และอีกปัญหาในการเตรียมสารเคมีสารละลายสีย้อมไวแสง (N719 dye) คือ อุปกรณ์ในการชั่งผงสีย้อมยังมีความละเอียดน้อย จึงเป็นเหตุให้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมไม่ชัดเจนเที่ยงตรง

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ควรมีเครื่องมือที่เป็นระบบอัตโนมัติให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องของการเตรียมสารและการประกอบเซลล์ แนวทางการพัฒนา คือ การพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ต่อไปเพื่อให้ได้ค่าการแปลงพลังงานที่สูงมากขึ้น การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ตัวอื่นๆ ที่เป็นสารกึ่งของแข็ง (Gel) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารละลายขณะทำการประกอบเซลล์ ตลอดจนการพัฒนาสีย้อมไวแสงเพื่อให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น สีย้อมจากธรรมชาติ หรือสีย้อมที่ปราศจากโลหะ (Organic dye) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. M. Al-Alwani, A. B. Mohamad, N. A. Ludin, A. A. H. Kadhum, K. Sopian, "Dye-sensitized solar cells: Development, structure, operation principles, electron kinetics, characterisation, synthesis materials and natural photosensitisers", *Renew. Sustainable Energy Rev.* 65 (2016) 183.
- [2] K. G. Reddy, T. G. Deepak, G. S. Anjusree, S. Thomas, S. Vadukumpully, K. R. V. Subramanian, S. V. Nair, A. S. Nair, "On global energy scenario, dyesensitized solar cells and the promise of nanotechnology", *Phys.Chem.Chem.Phys.* 16 (2014) 6838.
- [3] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson "A New Silicon *p-n* Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *Journal of Applied Physics.* 25, (1954) 676.
- [4] B. O'Regan, M. Gratzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films" *Nature*, 353 (1991) 737.
- [5] รัฐพงษ์ นาคาไชย "การศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง" (Study on creating of dye-sensitizer solar cells), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ: (2554) 434.
- [6] วินิช พรหมอารักษ์ "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง" (Dye-Sensitized Solar Cells), มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี: (2550) 14.
- [7] L. Woranan, K. Tsai-Chyuan, S. Chaochin, K. Sasipriya, S. Pedaballi, A. Suri, L. Wen-Ren. "Morphology control studies of TiO₂ microstructures via surfactant-assisted hydrothermal process for dye-sensitized solar cell applications", *Applied Surface Science* 382 (2016) 15.
- [8] Z. Dongshe, Y. Tsukasa, O. Torsten, F. Ken, M. Hideki, "Room-Temperature Synthesis of Porous Nanoparticulate TiO₂ Films for Flexible Dye-Sensitized Solar Cells", *Adv. Func. Mater.* 16 (2006) 1228.
- [9] A. Tricoli, T. D. Elmøe, "Flame spray pyrolysis synthesis and aerosol deposition of nanoparticle films", *AIChE J.*, 58 (2012) 3578.
- [10] X. Chen, S. S. Mao, "Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications", *Chem. Rev.* 107 (2007) 2891.
- [11] R. Jose, V. Thavasi, S. Ramakrishna, "Metal oxides for dye-sensitized solar cells", *J. Am. Ceram. Soc.* 92 (2009) 289.
- [12] H.-Y. Chen, D.-B. Kuang, C.-Y. Su, "Hierarchically micro/nanostructured photoanode materials for dye-sensitized solar cells", *J. Mater. Chem.* 22 (2012) 15475.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] M. Landmann, E. Rauls, W. G. Schmidt, "The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO₂", *J. Phys.: Condens. Matter* 24 (2012) 195503.
- [14] B.C. O'Regan, J.R. Durrant, P.M. Sommeling, N.J. Bakker, Influence of the TiCl₄ treatment on nanocrystalline TiO₂ films in dye-sensitized solar cells. 2. charge density, band edge shifts, and quantification of recombination losses at short circuit, *J. Phys. Chem. C* 111 (2007) 14001.
- [15] M. Law, L. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, P. Yang. "Nanowire dyesensitized solar cells", *Nature Materials*. 4 (2005) 455.
- [16] J. B. Baxter, E. S. Aydil. "Dye-sensitized solar cells based on semiconductor morphologies with ZnO nanowires", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 607.
- [17] D. N. Leonard, G. W. Chandler, S. Seraphin, *Scanning Electron Microscopy. Characterization of Materials*, John Wiley & Sons, Inc. (2002).
- [18] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering*, Wiley, 8 (2011).
- [19] E. G. Rodríguez, "Photoelectrochemical Characterization of Dye Solar Cells Based On Nanostructured Zinc Oxide Substrates", *Ph.D. Thesis* (2011).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้