



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
จากตาข่ายโลหะ

โดย สุภาพร ดาวทอง

มิถุนายน 2563

สัญญาเลขที่ MRG5580076

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
จากตาข่ายโลหะ

สุภาพร ดาวทอง
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและต้นสังกัด

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว.และต้นสังกัดไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5580076

ชื่อโครงการ : ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากตาข่ายโลหะ

Investigator : นางสาวสุภาพร ดาวทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

E-mail Address : sd.daothong@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง บนแผ่นรองรับตะแกรงสแตนเลส และตะแกรงสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนเหล็กออกไซด์ เพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับโฟโตอิเล็กโทรด โดยเส้นลวดนาโนเหล็กออกไซด์ถูกปลูกบนพื้นผิวตาข่ายสแตนเลส ซึ่งใช้ตะแกรงสแตนเลสขนาด 400, 250, 177 และ 149 μm ถูกสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 60 นาที สำหรับการเตรียมโฟโตอิเล็กโทรด ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกจุ่มเคลือบฟิล์ม 3 ชนิด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์คอลลอยด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจล และทั้งสองของไทเทเนียมไดออกไซด์คอลลอยด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จุ่มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์คอลลอยด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล ให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์คอลลอยด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดตะแกรงขนาด 250 μm มีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับแผ่นรองรับตะแกรงสแตนเลส และแผ่นรองรับตะแกรงสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน มีแนวโน้มด้านประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ที่ไม่ชัดเจน จึงยังไม่สามารถสรุปในเงื่อนไขนี้ได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป

Keywords : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, เส้นลวดนาโนออกไซด์ของเหล็ก, ตาข่ายสแตนเลส

Abstract

Project Code : MRG5580076

Project Title : The efficiency of the metal mesh based flexible dye sensitized solar cells

Investigator : Suphaporn Daothong

Faculty of science, Maejo university

E-mail Address : sd.daothong@gmail.com

Project Period : 2 years

ABSTRACT

This research was aimed to study the efficiency of dye-sensitized solar cells (DSSCs) based on bare stainless steel mesh and stainless steel mesh modified with Fe_2O_3 nanowires substrates for fabricating TiO_2 film photoelectrodes. The Fe_2O_3 nanowires were grown on the stainless steel mesh substrate, which mesh size as 420, 250, 177 and 149 μm . The nanowires were synthesized at the temperature of 750°C for 60 min. For photoelectrode fabrication, the TiO_2 films were prepared using dip-coating method, which three types of TiO_2 such as TiO_2 colloid, TiO_2 sol-gel, and both of TiO_2 colloid and sol-gel. The DSSCs performance showed that the film, dipped in TiO_2 colloid and sol-gel had higher than the TiO_2 colloid and TiO_2 sol-gel, respectively. It was also found that, the mesh size as 250 μm evaluated maximum energy conversion efficiency. However, the effects of bare and modified substrates were not clear, which should be further study and consideration.

Keywords : dye-sensitized solar cells, Fe_2O_3 nanowires, stainless steel mesh

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.2 ประโยชน์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	7
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม	8
2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก	8
2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก	9
2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก	9
2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมฟิสิคัลเทรนฮาร์ดเตนนิ่ง	9
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC)	10

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 ส่วนประกอบของ DSSC	10
2.3.2 หลักการทำงานของ DSSC	15
2.3.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	16
2.3.4 ค่ามวลอากาศ (Air mass)	19
2.4 การสังเคราะห์อนุภาคด้วยกระบวนการโซล-เจล	20
2.4.1 กระบวนการเกิดโซล-เจลทางเคมี	21
2.4.2 กลไกปฏิกิริยาของกระบวนการโซล-เจล	22
2.4.3 ข้อดีของการสังเคราะห์สารด้วยกระบวนการโซล-เจล	23
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์	24
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)	24
2.5.2 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)	32
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	40
3.1 วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง	40
3.1.1 สารเคมี	40
3.1.2 อุปกรณ์	49
3.2 วิธีการทดลอง	51
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นรองรับ	52
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมโฟโตอิเล็กโทรด	55
3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมแคโทดอิเล็กโทรด	60
3.2.4 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์	61
3.2.5 ขั้นตอนการประกอบเซลล์	61

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	64
4.1 ผลการศึกษาพื้นผิวแผ่นรองรับ	64
4.2 ผลการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนบนแผ่นรองรับ	65
4.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ของแผ่นรองรับ	67
4.4 ผลการศึกษาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียม ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	68
4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	69
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการทดลอง	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารอ้างอิง	82
Output ที่ได้จากโครงการ	85
ภาคผนวก	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงความแตกต่างของเฟสแต่ละเฟสที่พบในไทเทเนียมไดออกไซด์	5
ตารางที่ 2.2	แสดงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ไปของไทเทเนียมไดออกไซด์	6
ตารางที่ 3.1	แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	40
ตารางที่ 3.2	แสดงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	49
ตารางที่ 3.3	แสดงเงื่อนไขการจุ่มฟิล์ม	59
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ	66
ตารางที่ 4.2	แสดงความหนาของฟิล์ม TiO_2 บนตาข่ายสแตนเลสของโฟโตอิเล็กโทรด	69
ตารางที่ 4.3	แสดงผลการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η) ของชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส	72
ตารางที่ 4.4	แสดงผลการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , FF, V_{oc} และประสิทธิภาพ (η) ของฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน	76
ตารางที่ 4.5	แสดงผลการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสลักษณะต่างๆ	79

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์	7
รูปที่ 2.2	แสดงโครงสร้างของ DSSC	10
รูปที่ 2.3	แสดงการเปรียบเทียบระดับพลังงานของ Dye และแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2	11
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพรีดีน	12
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างสีย้อมไวแสงอินทรีย์	13
รูปที่ 2.6	สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Cu-MP	13
รูปที่ 2.7	การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำ และสีย้อมไวแสง	14
รูปที่ 2.8	กลไกการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ DSSC	16
รูปที่ 2.9	แสดงกราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง	17
รูปที่ 2.10	แสดงวงจรการวัดค่าทางไฟฟ้า (J-V Tester)	18
รูปที่ 2.11	แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	18
รูปที่ 2.12	แสดงผลของ R_s และ R_{sh} ต่อ J-V characteristic	19
รูปที่ 2.13	แสดงสเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ATSM กำหนด	20
รูปที่ 2.14	โครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มแอลคอกซีชนิดต่างๆ	22
รูปที่ 2.15	แผนผังแสดงขั้นตอนในกระบวนการโซล-เจล ที่นำไปสู่ผลิตภัณฑ์ต่างๆ	23
รูปที่ 2.16	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฏิกิริยากับอะตอมตัวอย่าง	25
รูปที่ 2.17	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฏิกิริยากับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ	26
รูปที่ 2.18	การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ	27
รูปที่ 2.19	การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน	28
รูปที่ 2.20	ไดอะแกรมแสดงการเกิดลำแสงอิเล็กตรอน	30
รูปที่ 2.21	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
รูปที่ 2.22	การเกิดของรังสีเอกซ์อนุภาคพลังงานสูง	33
รูปที่ 2.23	การเรียกชื่อรังสีเอกซ์	33
รูปที่ 2.24	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	34
รูปที่ 2.25	ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องเอกซเรย์	36
รูปที่ 3.1	Titanium Isopropoxide	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.2	Titanium Dioxide P25	42
รูปที่ 3.3	Polyethylene Glycol 20,000 (PEG 20000)	42
รูปที่ 3.4	Triton X-100	43
รูปที่ 3.5	Isopropanol (Propan-2-ol)	43
รูปที่ 3.6	เอทานอล	44
รูปที่ 3.7	กรดไฮโดรคลอริก	44
รูปที่ 3.8	สีย้อม N719	45
รูปที่ 3.9	Acetonitrile	45
รูปที่ 3.10	กรดไฮโดรคลอริก	46
รูปที่ 3.11	Iodine Resublimed (I ₂)	46
รูปที่ 3.12	Lithium Iodine (LiI)	47
รูปที่ 3.13	4-Tert-Butylpyridine	47
รูปที่ 3.14	แผ่นพาราฟิล์ม	48
รูปที่ 3.15	Chloroplatinic Acid (H ₂ PtCl ₆)	48
รูปที่ 3.16	อะซิโตน	49
รูปที่ 3.17	ตาข่ายสแตนเลส	49
รูปที่ 3.18	กระจกนำไฟฟ้า	50
รูปที่ 3.19	ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทดลอง	51
รูปที่ 3.20	เงื่อนไขที่ใช้ศึกษาในการทดลอง	52
รูปที่ 3.21	แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมแผ่นรองรับ	52
รูปที่ 3.22	การเตรียมขนาดแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส	53
รูปที่ 3.23	การทำความสะอาดแผ่นรองรับ	53
รูปที่ 3.24	การกัดผิวแผ่นรองรับ	54
รูปที่ 3.25	การทำความสะอาดแผ่นรองรับหลังการกัดกรด	54
รูปที่ 3.26	แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมโฟโตอิเล็กโทโรด	55
รูปที่ 3.27	การเตรียมสารตั้งต้น และตัวประสานสำหรับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (P25)	56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.28	การเติมตัวทำละลาย และสารลดแรงตึงผิว	56
รูปที่ 3.29	การกวนผสมสารให้เข้ากันของ TiO_2 (P25)	57
รูปที่ 3.30	การเตรียมสารสำหรับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล	57
รูปที่ 3.31	การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	58
รูปที่ 3.32	การกวนสารที่ผสมให้เข้ากันของ TiO_2 (Sol)	58
รูปที่ 3.33	การแช่สีย้อม	59
รูปที่ 3.34	แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมแคโทดอิเล็กโทรด	60
รูปที่ 3.35	การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าสำหรับแคโทดอิเล็กโทรด	61
รูปที่ 3.36	กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยแพลทินัม	61
รูปที่ 3.37	วิธีติดพาราฟิล์มบนโฟโตอิเล็กโทรด	62
รูปที่ 3.38	วิธีติดพาราฟิล์มบนแคโทดอิเล็กโทรด	62
รูปที่ 3.39	ประกอบเซลล์และหดยดสารอิเล็กโทรไลต์	63
รูปที่ 4.1	แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาดต่างๆ	64
รูปที่ 4.2	ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาดต่างๆ	65
รูปที่ 4.3	แสดงผล XRD ของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส	67
รูปที่ 4.4	ภาคตัดขวางฟิล์ม TiO_2 ถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงความหนาของฟิล์ม TiO_2	68
รูปที่ 4.5	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสขนาด 400 μm	70
รูปที่ 4.6	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสขนาด 250 μm	70
รูปที่ 4.7	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสขนาด 177 μm	71
รูปที่ 4.8	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสขนาด 149 μm	71

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.9	แผนภูมิแท่งสรุปผลการเปรียบเทียบชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส	73
รูปที่ 4.10	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนขนาดตาข่าย 400 μm	74
รูปที่ 4.11	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนขนาดตาข่าย 250 μm	74
รูปที่ 4.12	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนขนาดตาข่าย 177 μm	75
รูปที่ 4.13	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนขนาดตาข่าย 149 μm	75
รูปที่ 4.14	แผนภูมิแท่งสรุปผลการเปรียบเทียบชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน	77
รูปที่ 4.15	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ	78
รูปที่ 4.16	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ ที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน	79
รูปที่ 4.17	แผนภูมิแท่งสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสลักษณะต่างๆ	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานมีความสำคัญต่อโลกและมนุษย์ พลังงานเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิต เป็นรากฐานสำคัญที่ทำให้ชีวิตเจริญเติบโตขึ้น โดยไฟฟ้าเป็นพลังงานชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง นอกจากจะให้แสงสว่างเวลาค่ำคืนแล้ว ยังให้ความร้อนในการหุงต้มและรีดผ้า ใช้ในการหมุนมอเตอร์ เช่น เครื่องดูดฝุ่น เครื่องปั่น และเครื่องทำความเย็น เป็นต้น พลังงานจึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีวิตชนิดที่ขาดไม่ได้

แต่ปัจจุบันความก้าวหน้าต่าง ๆ ในทางเทคโนโลยีของสังคมโลก ประชากรที่เพิ่มขึ้น แต่แหล่งให้พลังงานกลับมีปริมาณที่น้อยลง นำไปสู่ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต การหาพลังงานต่าง ๆ เพื่อนำมาทดแทนจึงเกิดขึ้น

ดวงอาทิตย์จัดเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด และเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด และแสงอาทิตย์นอกจากจะใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ คือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอน แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและต้องการซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาแพงเกินกว่าที่จะซื้อใช้ในบ้านเรือนทั่วไปได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ขึ้น คือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cell, DSSC) ขึ้นมา ซึ่งปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในเชิงวิชาการและเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน แต่มีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่า มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า จึงเป็นทางเลือกที่เข้ามาแทนที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ อุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลักๆ คือ กระจกนำไฟฟ้า สารที่ใช้ทำอิเล็กโทรด (สารกึ่งตัวนำ) ซึ่งเคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า ตัวสีย้อม (Dye) และสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยเมื่อแสงตกกระทบบที่ตัวสีย้อม เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกเข้าไปยังอิเล็กโทรดด้านใน ส่งผ่านไปยังกระจกนำไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งในปี 1991 Grätzel และคณะวิจัย ได้ประสบความสำเร็จในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีประสิทธิภาพถึง 11% [1]

โดยทั่วไปของ DSSC ในส่วนอิเล็กโทรด ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจะถูกสร้างอยู่บนพื้นผิวของกระจกนำไฟฟ้า ซึ่งธรรมชาติของกระจกนำไฟฟ้า คือมีความยืดหยุ่นน้อยมาก ส่งผลต่อการนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงไปใช้งานสำหรับงานบางประเภทที่อาศัยความยืดหยุ่นสูง (ดัด โค้ง หรืออืด) เช่น โทรศัพท์มือถือ ไอทีการ์ด หรือ นาฬิกา เป็นต้น จึงเป็นจุดเริ่มต้นของแนวทางการศึกษาวิจัย

เพื่อพัฒนา และปรับปรุงให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีความยืดหยุ่น เพื่อสามารถนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น เกิดการคิดค้นวัสดุต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อนำมาปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีความยืดหยุ่น สามารถม้วนเก็บได้ ดัด โค้ง หรือ งอได้ ซึ่งตัวเลือกที่ถูกนำมาใช้เป็นพื้นผิวแทนกระจกนำไฟฟ้า คือวัสดุในกลุ่มของพอลิเมอร์ และโลหะ เป็นต้น [2]

ในหลายงานวิจัย เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ถูกพัฒนาให้มีความยืดหยุ่น อิเล็กโทรดถูกปรับเปลี่ยนมาใช้วัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกเคลือบ ITO แต่ปัญหาที่พบคือ พื้นผิวของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเกิดการหลุดลอก เสียหาย เนื่องจากเกิดความล้าของวัสดุ และปัญหาด้านความต้านทานความร้อน [3]

วัสดุในกลุ่ม โลหะ จึงเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งเพื่อแก้ไขปัญหในส่วนอิเล็กโทรด เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น นำไฟฟ้า และยังทนความร้อนได้ดี เป็นต้น การพัฒนาพื้นผิวของอิเล็กโทรดได้ถูกพัฒนามาจนถึงปัจจุบันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพื่อก่อให้เกิดการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้มีความยืดหยุ่นที่สูงขึ้นจากพื้นผิวแบบกระจกนำไฟฟ้าที่มีความเปราะสูง ซึ่งเป็นขีดจำกัดต่อการนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบที่ต้องการความยืดหยุ่น

ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยปรับเปลี่ยนการใช้กระจกนำไฟฟ้า เป็นวัสดุกลุ่มของโลหะ คือ ตาข่ายสแตนเลส เพื่อใช้เป็นพื้นผิวในการจุ่มเคลือบฟิล์มบาง โดยตาข่ายสแตนเลสจะถูกนำมาเผาให้ความร้อน จากนั้นจุ่มเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจล เพื่อนำไปศึกษาผลของวัสดุรองรับต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของตาข่ายสแตนเลสในการเป็นแผ่นรองรับสำหรับโพลีอิเล็กโทรด ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.2.2 เพื่อศึกษาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

1.3.2 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้โมเลกุลสีย้อมยึดเกาะได้ในปริมาณมาก มีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอเพื่อการแพร่ผ่านของไอออนอิเล็กโทรไลต์ได้ดี และแต่ละอนุภาคจะต้องเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถแพร่ผ่านได้ดี

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยทดลองใช้ตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ 400 μm , 250 μm , 177 μm และ 149 μm เป็นแผ่นรองรับสำหรับโฟโตอิเล็กโทรด การทดลองจะเริ่มจากการนำตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ เผาให้ความร้อน ก่อนนำมาจุ่มเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ โซล-เจล โดยจำกัดพื้นที่ของเซลล์คือ $1.0 \times 0.2 \text{ cm}^2$ ส่วนของเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดใช้กระจกนำไฟฟ้าเป็นแผ่นรองรับเคลือบแพลทินัม ศึกษาลักษณะฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ขอกล่าวถึงเนื้อหา และทฤษฎีที่สำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อเรื่องต่างๆ ดังนี้ สารไทเทเนียมไดออกไซด์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การสังเคราะห์อนุภาคด้วยกระบวนการโซล-เจล เครื่องมือวิเคราะห์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามลำดับ

2.1 สารไทเทเนียมไดออกไซด์ [4-6]

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมเป็นโลหะในกลุ่มทรานซิชัน จัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลก แต่มักจะอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ และจะต้องสกัดออกมาเพื่อให้ได้ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งก็มีวิธีการแตกต่างกันไป ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอม คือ 22 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน คือ $[Ar]3d^2 4s^2$ และ มีน้ำหนักอะตอม คือ 47.867 ในส่วนของขนาดอะตอมไทเทเนียมมีรัศมีอะตอม 147 พิ-โคเมตร (pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดคือ $1667^{\circ}C$ และ $3285^{\circ}C$ ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ 4.50 g/cm^3 และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) ที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ คือ $42.0 \mu\Omega/\text{cm}$ ลักษณะพิเศษของไทเทเนียมคือจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-Metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ทางเคมีที่มักจะเกิดขึ้นมากที่สุดคือ $4+$ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากก็คือโมเลกุลจำพวกไดออกไซด์ และเตตระคลอไรด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น $4-$ ดังนั้นโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูป TiO_2 และ $TiCl_4$ เป็นส่วนใหญ่

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) หรือ ไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ (Titanium (IV) oxide)) หรือ ไทเทเนีย (Titania) คือ ออกไซด์ของไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มของออกไซด์โลหะทรานซิชัน มีสูตรทางเคมีว่า TiO_2 พบได้ในธรรมชาติแต่ไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีโลหะปนเปื้อน เช่น เหล็ก โดยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถพบได้ในแหล่งแร่รูไทล์ (Rutile) อิลเมนไนต์ (Ilmenite) ซึ่งเป็นแร่สีดำชนิดหนึ่งพวกไอรอนไทเทเนต (Iron Titanate, $FeTiO_3$) หรือ แร่ลูโคซีน (Leucoxene Ores) โดยใน 93-96 เปอร์เซ็นต์ ของรูไทล์ประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ อิลเมนไนต์อาจประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 44-70 เปอร์เซ็นต์ และลูโคซีนอาจมีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีเฟส (Phase) ที่สำคัญ 3 เฟส คือ บรูกไคท์ (Brookite), รูไทล์ (Rutile) และ อนาเทส (Anatase) ซึ่งแต่ละเฟสจะเหมาะสมในการนำไปใช้งานในด้านที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแต่ละเฟสมีการจัดเรียงตัวของออกเตฮีดรา (TiO_6^{2-}) แตกต่างกันจึงมีผลให้แต่ละเฟสมีคุณสมบัติบางประการที่ต่างกัน และโดยทั่วไปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์นั้นจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติแต่ได้มาจากแร่อิลเมนไนต์ หรือ แร่ลูโคซีน

แม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีอยู่หลายแบบ แต่รูไทล์และอนาเทสจะเป็นโครงสร้างที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยรูปแบบทั้งสองนี้จะมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนบรูไคท์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) แต่อย่างไรก็ตามรูไทล์จะเป็นรูปแบบที่ค่อนข้างเสถียร พบว่าทั้งบรูไคท์และอนาเทสจะเปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยบรูไคท์จะเปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิประมาณ 750°C และอนาเทสเปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิประมาณ 915°C และได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) หรือ เซรามิกที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าวได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก ดังนั้นโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ค่อนข้างสำคัญเพราะเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งาน โดยโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษา

ในการประยุกต์ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอนาเทส และรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาโดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมโดยปกติ นั้น โครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70-75 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 30-25 เปอร์เซ็นต์) ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทส โดยทั้งนี้ทั้งนั้นมีตัวแปรหลายอย่างส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุนขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมากคือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความแตกต่างของเฟสแต่ละเฟสที่พบในไทเทเนียมไดออกไซด์

เฟส	รูไทล์	อนาเทส	บรูไคท์
ปริมาณที่พบส่วนใหญ่	พบมาก	พบมาก	พบน้อย
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โธโรมบิก
ความเสถียร	เสถียรมาก	เปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิ 915°C	เปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิ 750°C
ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา	สูง	สูง	น้อย

2.1.1.1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

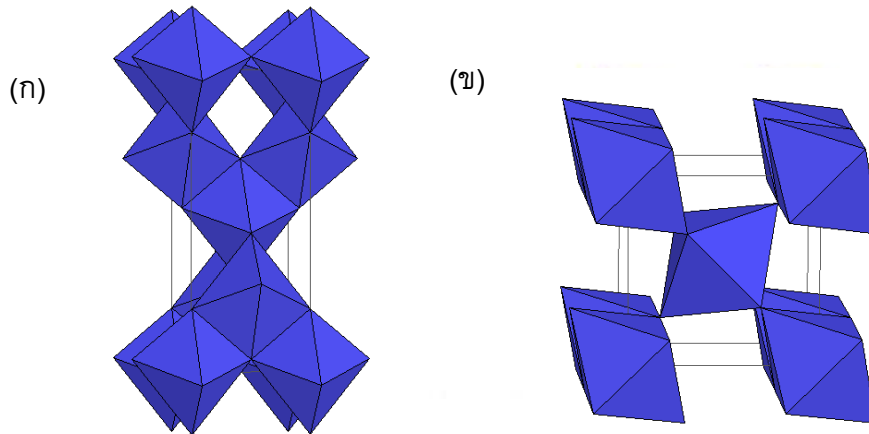
ชื่อ	Titanium Dioxide	
สูตรโมเลกุล	TiO ₂	
น้ำหนักโมเลกุล	79.9 amu	
ลักษณะและสี	ของแข็งสีขาว	
จุดเดือด	2500°C	
จุดหลอมเหลว	1830°C	
ดัชนีหักเห (Refractive index)	อนาเทส	รูไทล์
	2.49	1.903
ความหนาแน่น (g/cm ³)	อนาเทส	รูไทล์
	3.84	4.26

2.1.1.2 โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในเฟสอนาเทส และรูไทล์จะมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระ-โกนอล (Tetragonal) ซึ่งประกอบด้วยแต่ละหน่วยของออกตะฮีดรา (TiO₆²⁻) มาเชื่อมต่อกัน ในแต่ละออกตะฮีดรานั้นจะประกอบด้วย Ti⁴⁺ อยู่ตรงกลาง และถูกล้อมรอบโดย O²⁻ แต่การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดราในทั้งสองเฟสนั้นจะแตกต่างกันออกไป

ในกรณีของเฟสรูไทล์นั้นจะเกี่ยวข้องกับการใช้ขอบและมุมของออกตะฮีดราในการเชื่อมต่อ โดยด้านที่อยู่ตรงข้ามกันของออกตะฮีดราจะถูกเชื่อมต่อกันทำให้เกิดเป็นเส้นตรง (Linear Chain) และแต่ละเส้นนั้นจะถูกเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนที่อยู่ตรงมุมร่วมกัน

ในกรณีของเฟสอนาเทสนั้น การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดราจะเกี่ยวข้องกันกับการใช้ขอบร่วมกันเท่านั้น การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดราของเฟสรูไทล์ และอนาเทสแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

(ก) อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

(ข) รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

(ที่มา: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>)

2.1.2 ประโยชน์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

2.1.2.1 เม็ดสี

การใช้งานที่สำคัญที่สุดของไทเทเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมคือ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงเพื่อใช้เป็นเม็ดสีสำหรับสร้างความขาวและความทึบแสงให้แก่ผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น สี หรือสารเคลือบต่างๆ พลาสติก กระดาษ หมึกพิมพ์ เส้นใย อาหาร และ เครื่องสำอาง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ผลิตเป็นเม็ดสีขาวมากที่สุด เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีความขาวมากและมีดัชนีหักเหสูงมากกรองจากเพชร ดัชนีการหักเหแสงนี้เป็นตัวกำหนดความทึบแสงของสารที่มีเม็ดสีน้อย และด้วยค่าดัชนีหักเหแสงที่สูงของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงไม่จำเป็นต้องใช้เม็ดสีจำนวนมากเพื่อทำให้เกิดเป็นสีขาวทึบแสงบนวัตถุที่ต้องการ ค่าดัชนีหักเหแสงที่สูงและสีขาวของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้นำไปใช้เป็นตัวทำให้ทึบแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวทำให้ทึบแสงสำหรับสารเคลือบผิวแก้วและเครื่องปั้นดินเผา เครื่องสำอาง ครีมกันแดด กระดาษ และสี เนื่องจากสารนี้สามารถทนทานต่อการขีดของสีเมื่อสัมผัสกับสีเหนียว

2.1.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงอย่างแพร่หลายเนื่องจาก

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับแสงเหนียวได้ดี
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี
3. โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในขณะเดียวกัน
4. ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่มีความสามารถสูง
5. ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรทางเคมี ทนทานต่อการกัดกร่อนของแสงเมื่อสัมผัสกับน้ำ

6. ไทเทเนียมไดออกไซด์มีราคาถูกอย่างถูกสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย

ความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงนั้นเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างและขนาดของผลึก ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว ความมีรูพรุน และสมบัติอื่นๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pair) การดูดซับบนพื้นผิว และปฏิกิริยารีดอกซ์

2.1.2.3 การใช้งานด้านอื่นๆ

ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำไปใช้งานด้านอื่นๆ ได้อีกเช่น

1. ใช้เป็นแอโนดที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงในเซลล์แสงอาทิตย์
2. ใช้เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายๆ ปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอ-ไซลีน (Ortho-Xylene) ไปเป็นฟาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic Anhydride) ปฏิกิริยารีดักชันของไนโตรเจนออกไซด์ในก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน และปฏิกิริยา Fischer-Tropsch เพื่อผลิตสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เป็นต้น
3. ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สออกซิเจนสำหรับเครื่องตรวจจับในท่อไอเสียรถยนต์ และแก๊สอื่นๆ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวตรวจจับสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (volatile organic compound) เช่น เมทานอล เอทานอล และโพรพานอล เป็นต้น

2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม [6-7]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) มักจะถูกเลือกใช้งานในงานวิศวกรรม เนื่องจากมีสมบัติในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในทุกสภาวะ การที่เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีเพราะมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่จำนวนมาก เหล็กกล้าไร้สนิมจะไร้สนิมได้จะต้องมีปริมาณโครเมียมอยู่อย่างน้อย 12 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมเหล่านี้จะเกิดเป็นโลหะออกไซด์ที่ผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะผสมเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะเกิดฟิล์มออกไซด์ชั้นที่ผิวได้นั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องถูกวางอยู่ในสภาวะที่มีสารออกซิไดส์ เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) เป็นโลหะผสมเหล็ก-โครเมียม ซึ่งประกอบด้วยโครเมียม 12-13 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่าเฟอร์ริติก เพราะโครงสร้างส่วนใหญ่ เป็นแบบ เฟอร์ริติก (BCC, α iron) หลังจากที่ผ่านมากรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากโครเมียมจะมีโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ (BCC) เช่นเดียวกัน α ferrite บริเวณเฟสของ α จึงกว้างขึ้น และบริเวณเฟสของ γ จะแคบลง เกิด “ γ loop” ขึ้นในเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-โครเมียม และแบ่งเฟสไดอะแกรมออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณโครงสร้างลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (FCC) และบริเวณโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีปริมาณโครเมียมมากกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงไม่มี

การเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ไปเป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ แต่จะเกิดสารละลายของแข็งโครเมียมในเฟสของ α ของเหล็ก

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค (Martensitic Stainless Steel) เป็นโลหะผสม Fe–Cr ที่มีปริมาณโครเมียมอยู่ 12-17 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณคาร์บอนพอประมาณ (0.15-1.0% C) ที่จะทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนซิติคได้หลังจากผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างเฉียบพลัน จากบริเวณเฟสของออสเทนนิค เหล็กกล้าชนิดนี้ถูกเรียกว่า มาร์เทนซิติค เพราะสามารถทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนซิติคได้หลังจากผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติคนี้ถูกปรับปรุงให้มีความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความทนต่อการกัดกร่อนได้น้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค

การเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค โดยกรรมวิธีทางความร้อนจะเหมือนกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนอย่างเดียว (Plain–Carbon) และชนิดที่มีธาตุอื่นผสมอยู่น้อย (Low–Alloy) กล่าวคือ โลหะผสมจะถูกอบให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitized) และถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนได้โครงสร้างมาร์เทนซิติค ต่อจากนั้นจึงนำไปทำกระบวนการอบคืนตัว (Tempering) เพื่อลดแรงเค้นและเพิ่มความแข็งแรง เนื่องจากโลหะผสม Fe–Cr ที่มีโครเมียม 12-17 เปอร์เซ็นต์ จะมีความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ที่สูง ดังนั้นจึงทำให้ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างเฉียบพลันด้วยน้ำเพื่อให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนซิติคและสามารถใช้อัตราการเย็นตัวช้าลงได้

2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค (Austenitic Stainless Steel) เป็นโลหะที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ชนิดคือ เหล็ก–โครเมียม–นิกเกิล โดยจะมีโครเมียมอยู่ 16-25 เปอร์เซ็นต์ และนิกเกิล 7-20 เปอร์เซ็นต์ โลหะผสมชนิดนี้ถูกเรียกว่า ออสเทนนิค เพราะโครงสร้างภายในประกอบด้วยเฟสของออสเทนนิค (FCC, เหล็ก γ) ในช่วงอุณหภูมิที่ดำเนินการกรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากนิกเกิลมีโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ จึงทำให้โครงสร้างทั้งหมดโดยรวมยังคงเป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง

2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมฟิสิปเตชันฮาร์ดเดนนิ่ง

เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีทั้งโครเมียมและนิกเกิลอยู่คล้ายกับกลุ่มออสเทนนิค นอกจากนี้ยังผสมด้วยธาตุอื่น เช่น อะลูมิเนียมและไทเทเนียม ฯลฯ เพื่อทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กโดยให้เกิดการแยกเฟสโดยกรรมวิธีทางความร้อนได้ สมบัติเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ คือ ถ้าเผาให้อุณหภูมิสูงขึ้นเหล็กจะไม่แข็งแต่เหนียวมาก ทำให้สามารถแปรรูปทางกลได้มาก

จนได้ขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นก็ทำการรวมวิธีทางความร้อนต่อเพื่อให้เหล็กมีทั้งความแข็งและความเหนียวตามที่ต้องการ

2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC) [8-13]

2.3.1 ส่วนประกอบของ DSSC [8-10]

โครงสร้างของ DSSC แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ DSSC

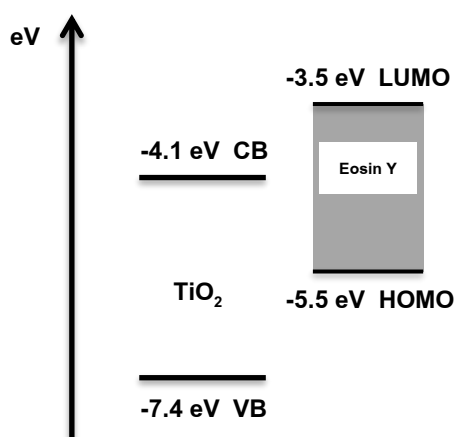
ส่วนประกอบของ DSSC มีดังนี้

2.3.1.1 กระจกนำไฟฟ้า (Transparent Conducting Oxide glass, TCO glass) หรือ ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide Thin Film, TCO) นำไปใช้กันมากในอุปกรณ์ Optoelectronic device เช่น Flat display Solar cell และอื่นๆ ซึ่งฟิล์มชนิดนี้เป็นฟิล์มที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงที่ดีควบคู่กัน โดยฟิล์มต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและแสงสามารถทะลุผ่านได้มาก ดังนั้นการเลือกสารตั้งต้นเพื่อนำมาเตรียมฟิล์มต้องพิจารณาคุณสมบัติทั้งสองข้อนี้เป็นสำคัญ และโดยทั่วไปสารที่จะนำมาใช้ควรเป็นสารที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูง สภาพต้านทานต่ำและแสงสามารถทะลุผ่านได้ดี ซึ่งฟิล์มบางที่นิยมใช้กันได้แก่ฟิล์มบางทินออกไซด์ (SnO_2) ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) และฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) เป็นต้น

2.3.1.2 ชั้นอนุภาคสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Layer) เป็นสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor) ที่มีช่องว่างแถบพลังงานสูง (Wide Band-Gap) และสามารถสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลสีย้อมได้ โดยชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีการศึกษากันมาก ยกตัวอย่างเช่น TiO_2 และ ZnO เป็นต้น

2.3.1.3 สีย้อม (Dye) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจากสีย้อมมีหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ซึ่งเมื่อสีย้อมได้รับพลังงานแสงโมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ในชั้น HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) จะถูกกระตุ้น

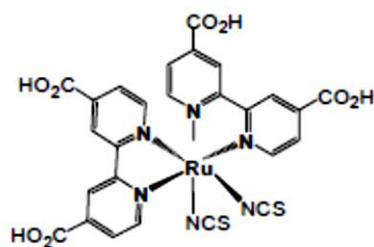
ให้ไปอยู่ที่ชั้น LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในชั้น LUMO จะถูกฉีดเข้าไปในชั้นแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในการเลือกสีย้อมจำเป็นต้องเลือกสีย้อมที่เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ซึ่งสีย้อมต้องมีระดับพลัง LUMO สูงกว่าระดับแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



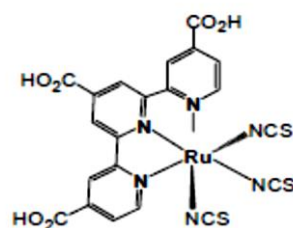
รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระดับพลังงานของ Dye และแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 [8]

สามารถจำแนกสีย้อมไวแสงออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

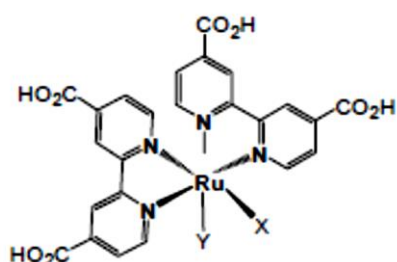
1. กลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพรีดีน สีย้อมกลุ่มไวแสงกลุ่มนี้ได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนามาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากรูทีเนียมเป็นโลหะมีความต่างศักย์รีดอกซ์สูง เหมาะสำหรับการกระตุ้นและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้ดี โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพรีดีนหรืออนุพันธ์ของโพลีไพรีดีน โดยลิแกนด์โพลีไพรีดีนจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลและมีความสามารถดูดซับบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 แม้ว่าการใช้สารประกอบเชิงซ้อนกลุ่มโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพรีดีนจะให้ประสิทธิภาพรวมสูง แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอาทิตย์ที่แคบ การสังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์ยาก และยังมีราคาแพง



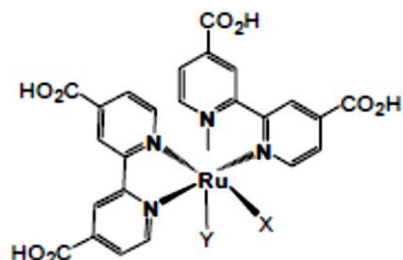
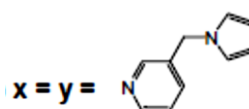
(ก)



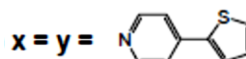
(ข)



(ค)

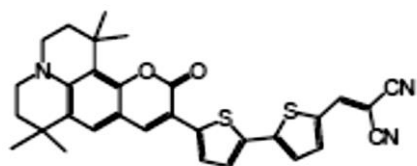


(ง)

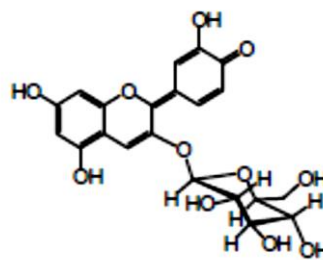


รูปที่ 2.4 สีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพรีดีน ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ได้แก่ N₃ Dye (ก) และ Black Dye (ข) และสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนโมเลกุล (ค) และ (ง) ที่มีหมู่ลิแกนด์ไพโรโรลและไทโอเฟนเพิ่มมา [9]

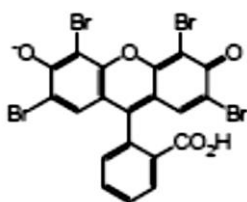
2. กลุ่มสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ เป็นการนำสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมาใช้เป็นสีย้อมไวแสงส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันยาว และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ แสดงดังรูปที่ 2.5 แม้ว่าสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ให้ประสิทธิภาพรวมต่ำกว่ากลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม แต่ยังคงได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะมีราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย และมีความเป็นพิษต่ำ



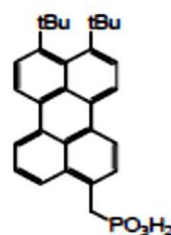
(ก)



(ข)



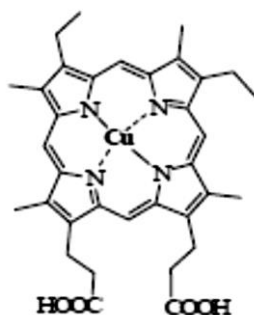
(ค)



(ง)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสีย้อมไวแสงอินทรีย์ เช่น สารกลุ่มอนุพันธ์ของเคมาริน ได้แก่ (ก) Coumarin Based NKX-2677 Dye, (ข) Flavonoid Anthocyanin Dye และ (ค) Xanthene dye สารกลุ่มเพอริลีน ได้แก่ (ง) Perylene Dye [9]

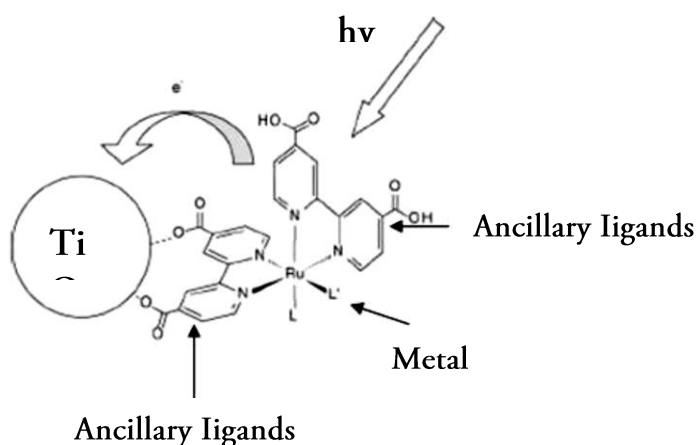
3. กลุ่มสีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน (Porphyrin) สีย้อมชนิดนี้พัฒนามาจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นโครโมฟอร์ที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แม้ว่าประสิทธิภาพรวมของสีย้อมกลุ่มพอร์ไฟริน จะมีค่าต่ำกว่าของสีย้อมกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมมาก แต่การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงพอร์ไฟรินสามารถปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลได้ง่ายและมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพไปในทางที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.6 สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Cu-MP [9]

ใน DSSC มีสีย้อมไวแสงหลายกลุ่มที่นำมาใช้ เช่น กลุ่มสีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน(Porphyrin) กลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (Transition Metal Complexes) เช่น รูทีเนียมกับลิแกนด์โพลี-ไพริดีน และกลุ่มสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ (Organic Dye) เป็นต้น แต่ที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือกลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ ซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขป ดังนี้

สีย้อมไวแสงในกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ เป็นสารที่มีโลหะเชิงซ้อน เป็นแกนของโครงสร้าง โดยส่วนมากจะเป็นจำพวกโลหะทรานซิชัน ข้อดีของตัวสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ คือมีช่วงในการรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่กว้าง ส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้ดี แต่มีข้อเสียคือ สัมเคราะห์ยาก และราคาสูง ปกติจะประกอบด้วย Anchoring Ligands และ Ancillary Ligands โดยที่ Anchoring Ligands มีหน้าที่ในการยึดเกาะกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ แต่ Ancillary Ligands จะไม่สามารถจับกับสารกึ่งตัวนำ ได้แต่จะสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติของตัวรับแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำ และสีย้อมไวแสง [10]

2.2.1.4 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่ทำงานในวงจรภายนอกกลับคืนสู่สีย้อม

2.2.1.5 แคโทดอิเล็กโทรดแพลทินัม (Platinum) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากภายนอกให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยที่แคโทดอิเล็กโทรดต้องมีสมบัติดังนี้คือ มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเป็นรูปทรงสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา และจะต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วย วัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นแคโทดอิเล็กโทรดคือ โลหะแพลทินัม (Pt)

2.3.2 หลักการทำงานของ DSSC [11]

1. การดูดกลืนพลังงานแสง

เมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงจะดูดกลืนพลังงานแสงไว้เพื่อใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้น HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) ไปยังชั้น LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital)



2. อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น

อิเล็กตรอนสถานะกระตุ้น (Dye^*) ที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อมในชั้น LUMO ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (Conduction Band) จะย้ายไปอยู่บนแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกขั้นตอนนี้ว่า Electron Injection

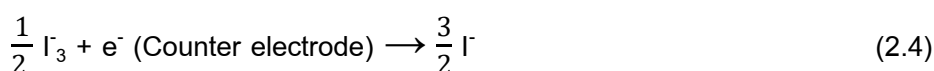
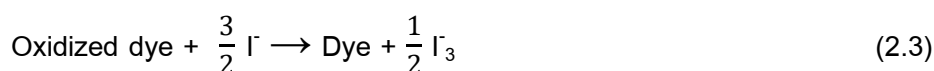


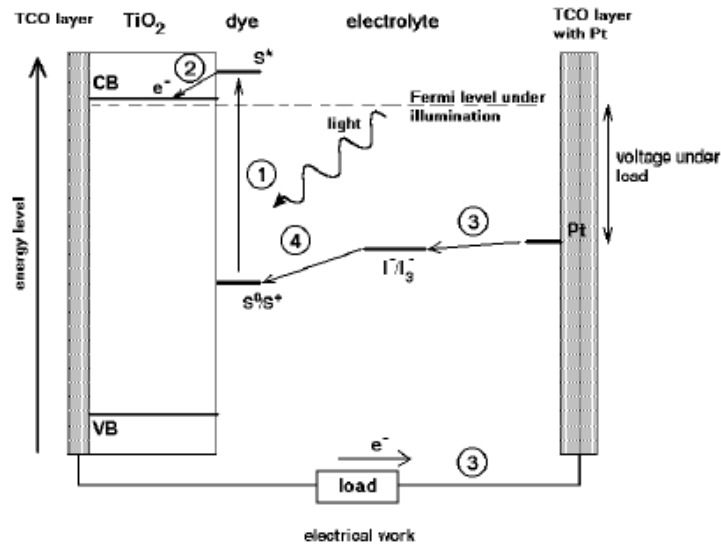
3. อิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่

อิเล็กตรอนที่มาจากชั้น LUMO จะเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำ ออกสู่วงจรภายนอกผ่านทางโฟโตอิเล็กโทรดเกิดการสูญเสียพลังงานให้แก่วงจรภายนอก หลังจากนั้นกลับคืนสู่เซลล์ผ่านทางเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (ขั้วที่กระจกนาไฟฟ้าเคลือบด้วย Pt)

4. อิเล็กตรอนคืนสภาพ

อิเล็กตรอนกลับสู่โมเลกุลของสีย้อม โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ในอิเล็กโทรไลต์ และเรียกขั้นตอนนี้ว่า Dye regeneration ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดจะเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.8





รูปที่ 2.8 กลไกการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ DSSC [11]

2.3.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

เมื่ออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจากวงจรรายนอกจะกลับคืนสู่เซลล์ผ่านทาง Counter electrode ซึ่งถูกเชื่อมกับวงจรรายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลรวมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของสองอิเล็กโทรด

$$J_{sc} = J_p + J_d \quad (2.5)$$

เมื่อ J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสรวมสูงสุด (Short Circuit Current Density (mA/cm^2))

J_p คือ Photo generated current density (mA/cm^2)

J_d คือ ความหนาแน่นกระแสรั่ว (Dark current density (mA/cm^2))

ความหนาแน่นกระแสรวมสูงสุดมีค่าเป็น J_{sc} เป็นค่าที่ได้รับมาจากเงื่อนไขของ Short Circuit ซึ่ง $\Delta E = V = 0$ ซึ่งเห็นได้จากกราฟ J-V (Current-Voltage Curve) ภายใต้แสงแสงได้ดังรูปที่ 2.9 ค่า V_{oc} เป็นค่าปฏิบัติกับพลังงานที่แตกต่างระหว่างระดับพลังงาน Fermi ของสารกึ่งตัวนำและระดับพลังงานของ Electrolyte redox couple ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ค่า $J_{max} \times V_{max}$ มาจากจุดที่ทำให้เกิด P สูงที่สุด ดังนั้นค่ากำลังสูงสุดที่สามารถคำนวณได้คือ

$$P_{max} = J_{max} \times V_{max} \quad (2.6)$$

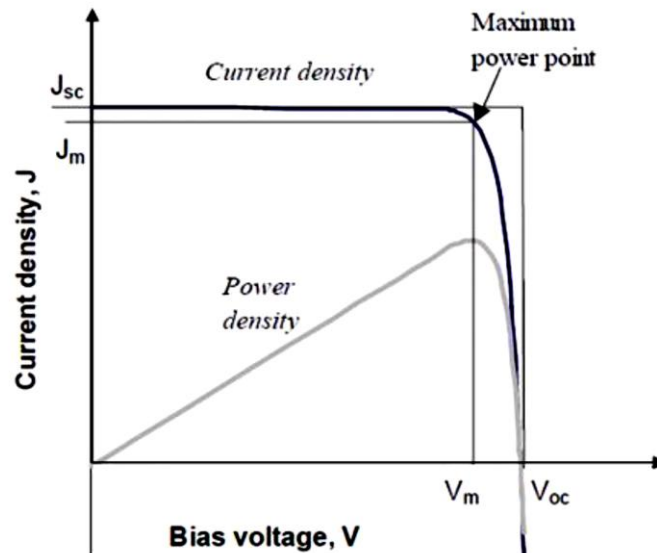
เมื่อ P_{max} คือ กำลังสูงสุด

J_{max} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังสูงสุด

V_{max} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

พื้นที่สี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากจุดที่มีกำลังสูงสุด ค่า Fill Factor (FF) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.7

$$FF = \frac{J_{\max} V_{\max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง [12]

FF คือ ค่า Fill Factor เป็นค่าบอกถึง คุณภาพของรอยต่อ(ความต้านทาน) การรั่วไหลของ กระแสที่รอยต่อ เป็นต้น ค่า J_{sc} และ V_{oc} นั้นเป็นค่าที่แปรผันตรงต่อประสิทธิภาพ (η) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$\eta = \frac{J_{\max} V_{\max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (2.8)$$

เมื่อ P_{in} คือ ผลรวมของกำลังของแสงที่แผ่รังสีตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์

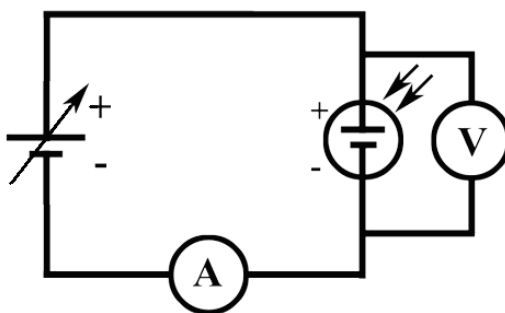
J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสวงจรเปิด หรือ ความหนาแน่นกระแสรวมสูงสุด

V_{oc} คือ ความต่างศักย์วงจรเปิด

$J_{\max}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังสูงสุด

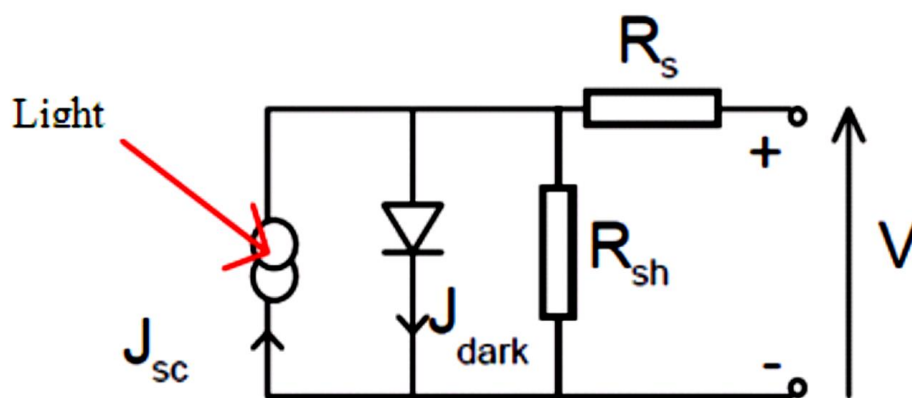
$V_{\max}$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อทดสอบเซลล์ภายใต้เงื่อนไข Air Mass 1.5 (AM 1.5) โดยแสงมีความเข้มเท่ากับ 100 mW/cm^2 หรือ 1000 W/m^2 ตกกระทบบนตั้งฉากกับระนาบของเซลล์ ซึ่งสามารถวัดค่า J และ V ตามวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.10



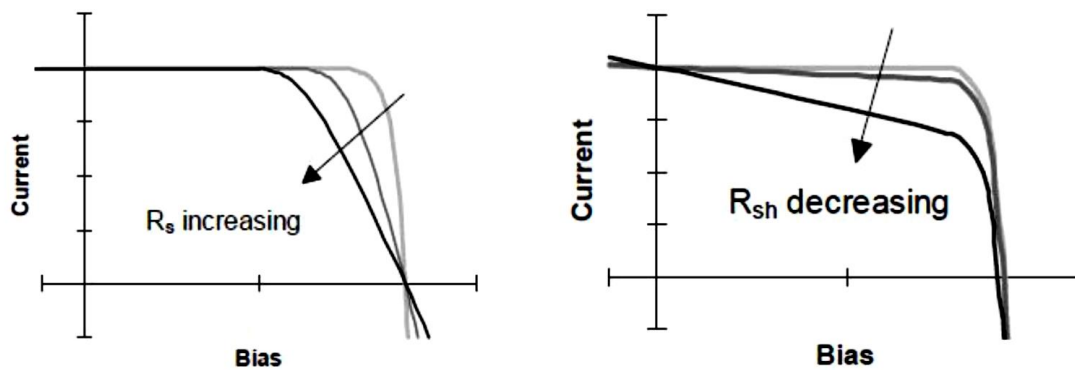
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรการวัดค่าทางไฟฟ้า (J-V Tester) [13]

เซลล์แสงอาทิตย์มีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสีย้อม และการสูญเสียของกระแสอิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม (Resistance Series, R_s) และความต้านทานชั้ด (Resistance Shunt, R_{sh}) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [13]

สำหรับ R_s นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากสารแต่ละชนิดมีค่าสภาพการนำกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยเฉพาะที่ผิวของสารนั้นและเกิดขึ้นเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของสาร โดยความต้านทานนี้จะมีผลกระทบอย่างมากต่อเซลล์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูง สำหรับ R_{sh} นั้นเกิดจากการสูญเสียกระแสให้แก่ขั้วไฟฟ้าและบริเวณรอยต่อของสารที่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นทั้ง R_s และ R_{sh} ทำให้ค่า FF ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องมีค่า R_s น้อยๆ และมีค่า R_{sh} น้อยๆ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า FF มาก



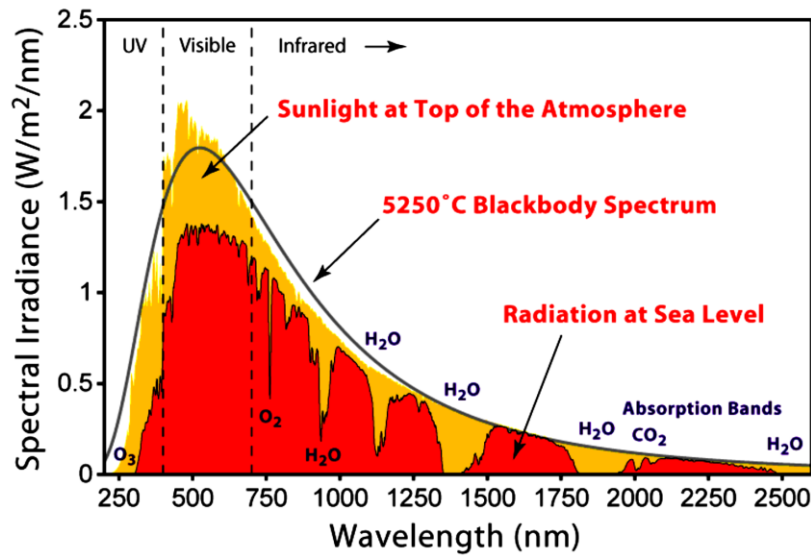
รูปที่ 2.12 แสดงผลของ R_s และ R_{sh} ต่อ J-V characteristic [13]

2.3.4 ค่ามวลอากาศ (Air mass) [13]

ปริมาณแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในอากาศมีค่าคงที่เรียกว่า solar constant มีค่าเท่ากับ $1,365 \text{ W/m}^2$ เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก 30 % จะสะท้อนกลับและอีก 20 % จะถูกดูดกลืนด้วยเมฆ ฝุ่น ก๊าซเรือนกระจก คาร์บอนไดออกไซด์ และชั้นโอโซน เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางมากขึ้นความเข้มแสงก็จะลดลงเป็นลำดับ โดยตามทฤษฎีแล้วจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ส่งผลให้ความเข้มของแสงในหนึ่งวันเปลี่ยนไปโดยความเข้มของแสงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางฟ้าพอดี ลักษณะความเข้มของแสงตามระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศ แสดงเป็นค่าความเข้มแสงที่สูงที่สุดสังเกตได้บนผิวโลก เรียกว่า ค่ามวลอากาศ 1 (Air Mass 1 = AM1) ดังนั้นแสงอาทิตย์ที่ไม่ผ่านบรรยากาศโลก จะเรียกว่า ค่ามวลอากาศ 0

เนื่องจากกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่แปรตามความเข้มแสงมากนักแต่จะแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าความเข้มแสงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์คือ ความเข้มแสงที่วัดได้บนโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงมีค่าเท่ากับ $1,000 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเท่ากับ AM 1.5

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มของสเปกตรัมของแสง โดยกำหนดให้ที่ชั้นอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหรือหมอก วัดค่าความเข้มของแสงมีค่าเท่ากับ $1,000 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเท่ากับ AM 1.5 ที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก กำหนดสเปกตรัมแสงมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ATSM กำหนด[13]

2.4 การสังเคราะห์อนุภาคด้วยกระบวนการโซล-เจล [14]

เทคโนโลยีทางโซล-เจล สำหรับเซรามิกที่ใช้โซล และเจลเป็นตัวตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอิเล็กทรอนิกส์ให้มีลักษณะเป็นผง ไฟเบอร์ แผ่นฟิล์ม และแก้วเซรามิก เป็นต้น เทคโนโลยีทางโซล-เจลได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อใช้ในการสังเคราะห์วัสดุ พื้นฐานของการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจล เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส และปฏิกิริยาควบแน่นเซชันของโลหะแอลคอกไซด์

โซล คือ สารของแข็งแขวนลอยกระจายตัวในของเหลว ส่วนเจลเป็นของเหลวแขวนลอยชนิดหนึ่งซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้น ทำให้มีความหนืด และความยืดหยุ่นสูง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากโครงข่าย (Network) ของเฟสที่กระจาย (Dispersed Phase) และสารตัวกลางทำกระจาย (Dispersion Medium) วนเวียนอยู่ทั่วโครงข่ายนั้น การเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลทำให้ความหนืดสูงขึ้น ในระบบของโซล-เจลอธิบายได้เป็น 2 แบบซึ่งแตกต่างกัน

(1.) ระบบอนุภาคที่แขวนลอย เกี่ยวข้องกับการกระจายของโลหะออกไซด์หรืออนุภาคของไฮดรอกไซด์ในของเหลว จะเป็นโซล แล้วโซลรวมตัวกันเป็นเจล

(2.) ในระบบของพอลิเมอร์ เกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอร์ของสารเคมีอินทรีย์ของโลหะแอลคอกไซด์ ผลิตเจลได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงข่าย

ขั้นตอนการทำให้แห้ง เจลที่เปียกเมื่อทำให้แห้งจะมีรูพรุน และเป็นของแข็งออสัญฐานที่อนุภาคของเจล ตัวอย่างการทำให้แห้งโดยการระเหยเจลอยู่ในรูปของเซอรเจล (Xerogel) ซึ่งมีการยุบตัวของผิวหน้าเจลเท่านั้น แต่การทำให้แห้งภายใต้สภาวะวิกฤต เช่น ความดันวิกฤต และอุณหภูมิวิกฤต เมื่อของเหลวและไออยู่ในสมดุลซึ่งกันและกันสามารถกำจัดของเหลวและไอที่อยู่ระหว่างผิวทั้งสองทำให้เกิดรูพรุนทั่วทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า แอโรเจล (Aerogel)

2.4.1 กระบวนการเกิดโซล-เจลทางเคมี

ในการสังเคราะห์สารด้วยวิธีนี้จะเริ่มจากการใช้สารตั้งต้นที่อยู่ในสภาพของสารละลายซึ่งผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดีและสามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุล ทำให้เกิดโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาว หรือเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า โซล (Sol) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะสูงขึ้นจนกระทั่งกลายสภาพเป็นสารกึ่งของเหลวที่เรียกว่า เจล (Gel) จากนั้นจึงนำเจลที่ได้ไปทำให้แห้งสนิท แล้วบดให้เป็นผงละเอียดก่อนจะนำไปเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป วิธีการสังเคราะห์แบบโซล-เจลจะทำให้ได้ผงที่มีขนาดเล็กและมีความบริสุทธิ์สูงมาก สำหรับการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล-เจล สามารถสังเคราะห์ได้โดยนำสารละลายอะซิเตรตของโลหะที่ต้องการ คือ อะซิติดอะซิโตนมาละลายด้วยเอทานอลโดยให้ความร้อน หลังจากเย็นแล้วเติมเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ การไฮโดรไลซ์เกิดขึ้นเนื่องจากการเติมน้ำในปริมาณมากเกินไปในเอทานอล หลังจากนั้นกระบวนการทำเจลจะใช้เวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับปริมาณกรดที่ใช้ และการเติมอะซิติดอะซิโตนเข้าไปในเจลอะซิเตรตเพื่อการเปลี่ยนแปลงให้สารอยู่ในรูปคอลลอยด์ก็คือ เจล ซึ่งจะให้ผลผลิตเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดคีเลตที่แข็งแรงกับโลหะ แล้วนำไปเผาแคลไซน์จะได้อนุภาคนาโนเมตร

ในทางเคมีระบบของซิลิกาโซล-เจลนั้น มีการศึกษาถึงในรายละเอียดกันมาก แต่สำหรับระบบซอล-เจลของโลหะแทรนซิชันออกไซด์ เช่น TiO_2 , ZrO_2 , WO_3 และ Nb_2O_5 เป็นต้น มีข้อมูลน้อยมาก โครงสร้างโมเลกุลระหว่างกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่มีหลักฐานยืนยันแน่นอน กลไกการเกิดโซล-เจลของโลหะแทรนซิชันออกไซด์มี 2 วิธีเหมือนกับของซิลิกอนแอลคอกไซด์เพื่อเกิดเป็นซิลิกาโดยที่

- (1.) โลหะแทรนซิชันมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) ต่ำ ซึ่งทำให้เป็นนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic) เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าซิลิกอน
- (2.) ไอออนของโลหะแทรนซิชันเปลี่ยนเลขโคออร์ดิเนชัน และจำนวนโคออร์ดิเนตขึ้นกับกลไกของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไป

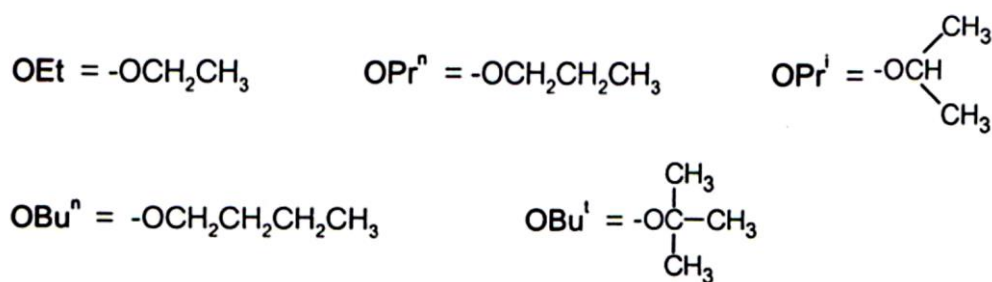
การเพิ่มขึ้นของความยาวสายแอลคิลและกิ่งก้านของมันทำให้อัตราการไฮโดรไลซิสลดลง เพราะว่ามีผลของกลุ่มที่เกะกะ การศึกษาไทเทเนียมแอลคอกไซด์กับความยาวที่แตกต่างกันของกลุ่มแอลคอกซี เช่น $-\text{OCH}_2\text{CH}_3(\text{OEt})$, $-\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3(\text{OPrn})$, $\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3(\text{OBun})$ พบว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไทเทเนียม n-บิวทอกไซด์ ได้ซอลที่เสถียร ในทางตรงกันข้าม พวกกลุ่มสายแอลคอกซีที่สั้นโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เอทอกไซด์ โพรพอกไซด์ น้ำเข้าไปจับกับโลหะได้ดี

เมื่อละลายโลหะแอลคอกไซด์ในแอลกอฮอล์จะมีปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิสเกิดขึ้น เช่น การแลกเปลี่ยนของกลุ่มแอลคอกซีระหว่างโลหะแอลคอกไซด์และตัวทำละลาย



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเองที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไทเทเนียมแอลคอกไซด์ต่าง ๆ แต่ละกลุ่มแอลคอกไซด์แลกเปลี่ยนกันลดลง เมื่อเพิ่มความยาวของสายแอลคิล ตัวทำละลายควบคุมอัตราการเกิดเจลเลชันในกระบวนการโซล-เจลของโลหะแอลคอกไซด์ $M(OR)_x$ การเกิดไฮโดรลิซิสและคอนเดนเซชันจะนำไปสู่การเกิดเจลเลชัน ในสารละลายความรู้เกี่ยวกับกลไกปฏิกิริยายังไม่ชัดเจนนัก การเกิดไฮโดรลิซิสและคอนเดนเซชันเกิดขึ้นพร้อมกัน และเป็นการยากที่จะแยกกลไกปฏิกิริยาทั้งสอง ในขั้นสุดท้ายของคอนเดนเซชันได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างคล้ายพอลิเมอร์

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยให้แอลคอกไซด์มีตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดไฮโดรลิซิสและคอนเดนเซชัน มีการสันนิษฐานว่าตัวเร่งควบคุมธรรมชาติของอินเทอร์มีเดียท และโครงสร้างของเจล ในสภาพที่เป็นกรดหรือเบส ตัวเร่งมีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและปฏิกิริยาคอนเดนเซชันภายใต้สภาวะที่เป็นกรดโดยใช้กรดเป็นตัวเร่ง เช่น HNO_3 , CH_3COOH ช่วยให้อัลคอกไซด์เป็นกลุ่มที่หลุดออกได้ดี และพันธะระหว่าง $M-OH$ เกิดขึ้นได้ดี ส่วนภายใต้สภาวะที่เป็นเบสโดยใช้ NH_4OH เป็นนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) ที่แรงสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส กลุ่มไฮดรอกซิลจับกับอะตอมของโลหะและไปแทนกลุ่มแอลคอกไซด์ เช่น $OEt = -OCH_2CH_3$, $OPr' = -OCH(CH_3)_2$, $OBu' = -OC(CH_3)_3$ เป็นต้น ดังรูป 2.14

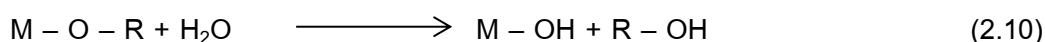


รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มแอลคอกไซด์ชนิดต่างๆ [14]

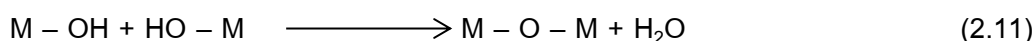
2.4.2 กลไกปฏิกิริยาของกระบวนการโซล-เจล

ปฏิกิริยาที่สำคัญใน กระบวนการโซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การควบแน่นด้วยน้ำ และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดเป็นโซลและเจลที่มีคุณสมบัติและโครงสร้างต่างกัน

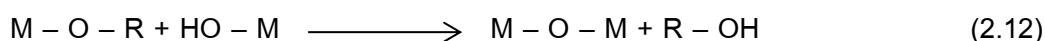
1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)



2. การควบแน่นด้วยน้ำ (Water Condensation)

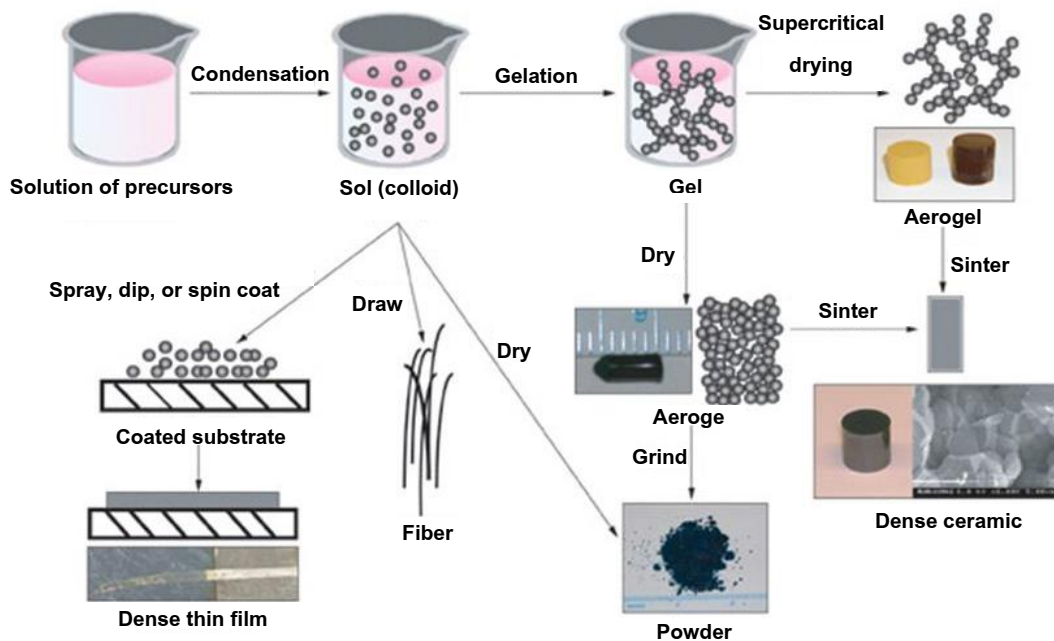


3. การควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (Alcohol Condensation)



เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Ti, Si, Zr, Sn, Ce และ -O -R แทนกลุ่มอัลคอกซิล

แผนผังแสดงขั้นตอนในกระบวนการโซล-เจลที่นำไปสู่ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนในกระบวนการโซล-เจล [14]

2.4.3 ข้อดีของการสังเคราะห์สารด้วยกระบวนการโซล-เจล

- ได้ผงละเอียดสม่ำเสมอและมีความบริสุทธิ์สูง
- สามารถควบคุมคุณลักษณะพื้นฐาน และการแจกแจงของขนาดอนุภาคได้
- ทำให้เกิดพันธะบางๆ ระหว่างวัสดุฐานกับตัวสารเคลือบ
- สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้
- สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่าย ๆ และซับซ้อน
- ทำได้ง่ายราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง
- มีความเป็นเนื้อเดียวกัน
- เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ

2.5 เครื่องมือวิเคราะห์ [15-17]

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) [15]

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector, SE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scatter Electron Detector, BSE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้สามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (EDS) และแบบเวฟเลงท์ดิสเพอร์สฟเอกซ์เรย์สเปกโตรโฟโตเมทรี (Wavelength Dispersive x-ray Spectrophotometry, WDS) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามระดับพลังงาน

2.5.1.1 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

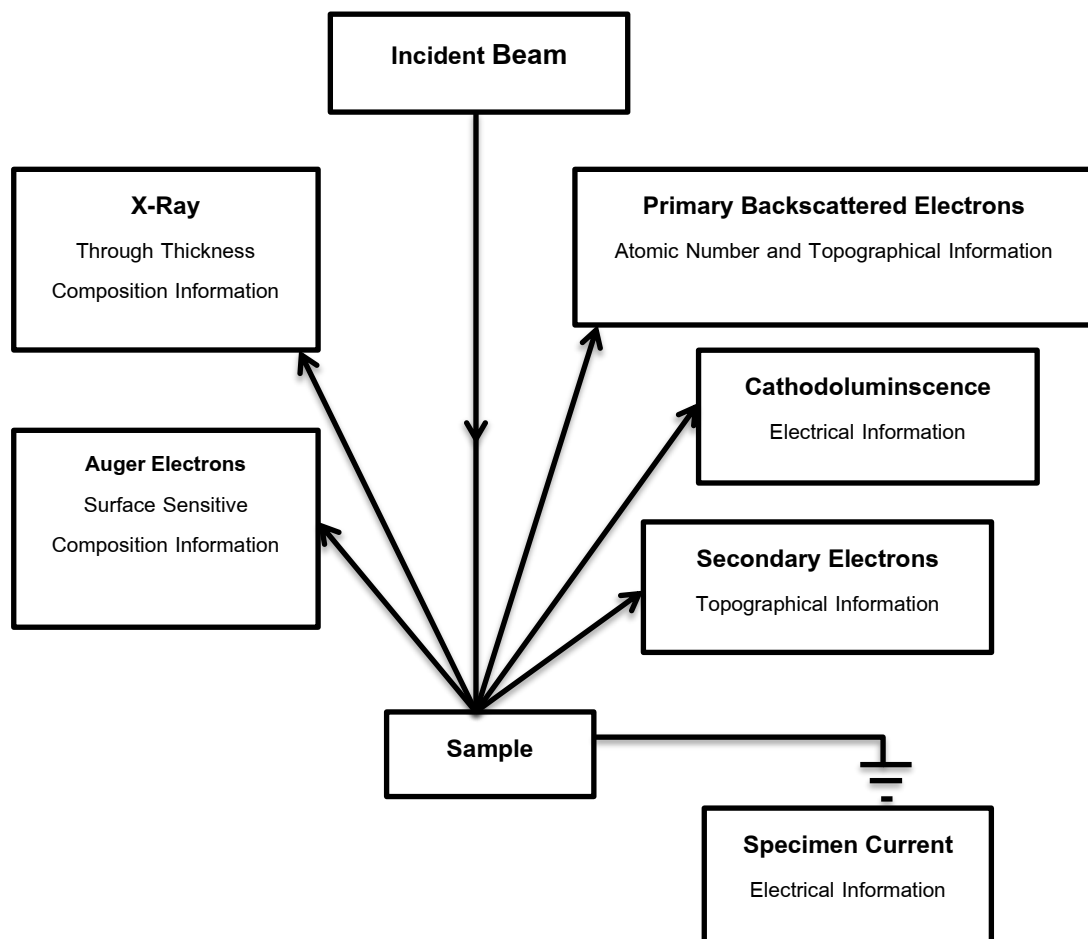
(1) หลักการเกิดภาพ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (1000 ถึง 3000 eV หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบี่ยงล่างโดยแผ่นแอโนด (Anode Plate) ภายใต้ความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่ปรับลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนทะลุเบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนวิ่งลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 nm โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scan Coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (Control Unit) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุหรือตัวอย่าง และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron Signal) ชนิดต่าง ๆ ออกมา ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่าง และวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นคือ

- สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับไมโครไม่เล็กไม่เกิน 10 nm โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

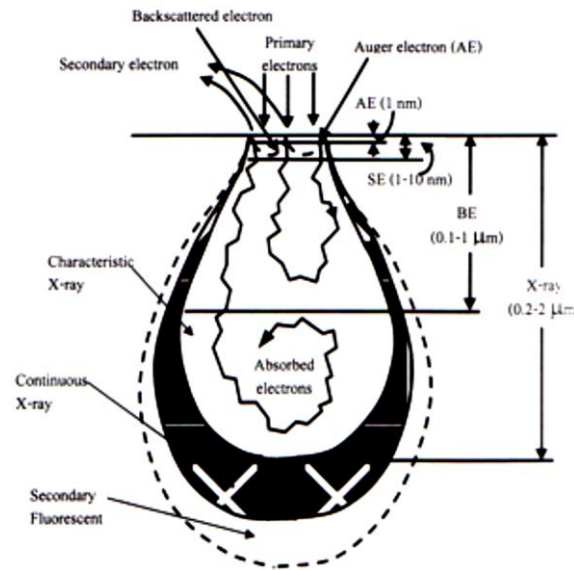
- สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และการกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมี

พลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 nm โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

- สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-ray Image) เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ



รูปที่ 2.16 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง [15]

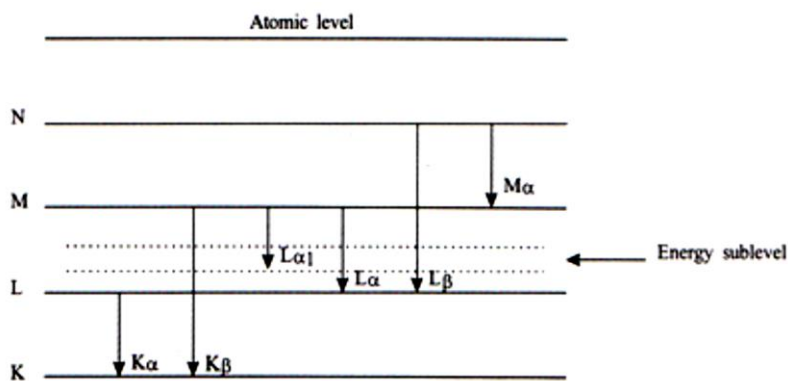


รูปที่ 2.17 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่าง
ที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ [15]

สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพได้ โดยต้องเลือกใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดให้เหมาะสมกับสัญญาณแต่ละชนิด โดยทั่วไปสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิใช้ตัวตรวจวัดชนิดพลาสติกเรืองแสง (Plastic Scintillation Detector) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับใช้ตัวตรวจวัดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น (P-N Junction Detector) หรือตัวตรวจวัดชนิดโรบินสัน (Robinson Detector) และในสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์จะใช้ตัวตรวจวัดชนิดสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอนลิเทียม (Lithium Drifted Silicon, Si(Li)) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ซึ่งอุปกรณ์วิเคราะห์เหล่านั้นมีทั้งแบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer, SCA) และอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multi Channel Analyzer, MCA)

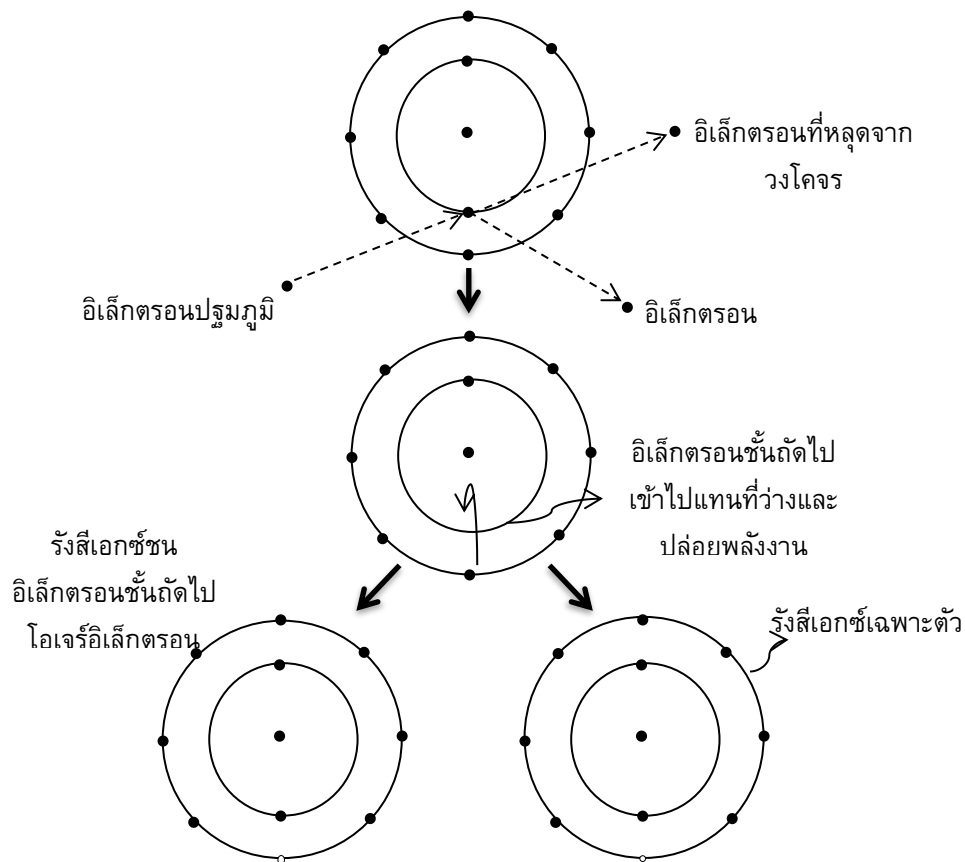
(2) หลักการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ ในระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ใช้ระบบการวิเคราะห์แบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ได้และใช้เวลาไม่นานเพียงไม่กี่นาทีซึ่งแตกต่างกับระบบการวิเคราะห์แบบเวฟเลงท์ดิสเพอร์ซิฟเอกซเรย์สเปกโทรโฟโตเมทรีที่ใช้เวลาเป็นชั่วโมง โดยในแบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมเช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกิน พลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจรจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูก

กระตุ้นลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้นประมาณ 10-15 วินาที โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับค่าความต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและเฉพาะของธาตุนั้น ๆ จึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เราเรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19



รูปที่ 2.18 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่าง ๆ [15]

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ตัวตรวจวัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ ตัวตรวจวัดรังสีแบบ Si(Li) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 ถึง 30 keV หรือตัวตรวจวัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้าง 3 ถึง 200 keV อย่างไรก็ตาม แม้ว่าตัวตรวจวัด HPGe สามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้างกว่า แต่ในการวิเคราะห์ธาตุเบาตัวตรวจวัดชนิด Si(Li) ซึ่งสามารถวัดได้ในย่านพลังงานต่ำ 1 keV ก็ยังมีความจำเป็นอยู่มาก ทั้งนี้ตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ทางออกของตัวตรวจวัดเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดี่ยวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัม พร้อมทั้งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกันไปในแต่ละกลุ่มผู้ผลิต



รูปที่ 2.19 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน [15]

2.5.1.2 รูปแบบการวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างโดยวิธีอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis, EPMA) ในระบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ หรือเวฟเลงท์ดิสเพอร์สฟเอกซ์เรย์สเปกโตรโฟโตเมทรี กระทำได้ 3 วิธี

(1) การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (Area Scan Analysis) หรือ เรียกว่าเป็นการทำเอกซ์เรย์แมปปิง (X-Ray Mapping) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่ เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ และมีลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และ บนลงล่างเหมือนโทรทัศน์ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่พุ่งออกมาจากตัวอย่างเป็นจุดต่อจุด ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์แบบนี้แสดงถึงลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่นั้นๆ

(2) การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (line Scan Analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนเป็นแนวนอนบนตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการหาขอบเขต (Boundary) ของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

(3) การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งกับที่บนผิวตัวอย่าง ณ จุดที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อวัดปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตัวตรงจุดที่ต้องการ

2.5.1.3 การประยุกต์ใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์

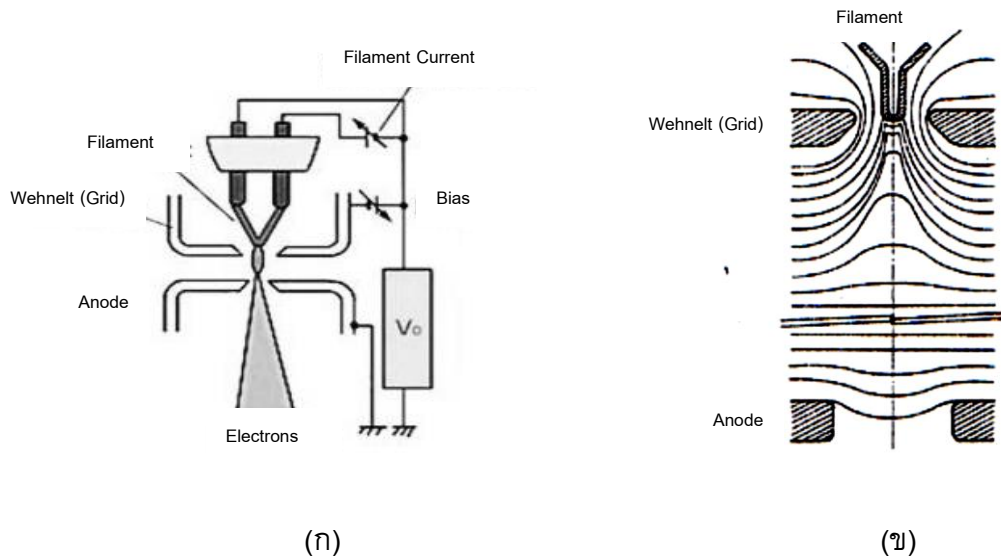
(1) การประเมินคุณลักษณะเฉพาะ (Characterization Evaluation) สามารถดูได้จากขนาดของเกรน (Grain Size) ความขรุขระของผิว (Surface Roughness) ความพรุน (Porosity) การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) และความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Material Homogeneity)

(2) การวิเคราะห์จุดบกพร่อง (Failure Analysis) สามารถดูได้จากการปนเปื้อนเฉพาะบริเวณ (Contamination Location) การประเมินกลไกการเกิดความเสียหาย (Mechanical Damage Assessment) บริเวณที่เกิดการแตกหักในระดับจุลโครงสร้าง (Micro-Crack Location)

(3) การควบคุมคุณภาพ (Quality Control Screening) สามารถดูได้จากการเปรียบเทียบตัวอย่างที่ดีและไม่ดี การกำหนดความหนาของฟิล์มและชั้นเคลือบ เป็นต้น

2.5.1.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

(1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ ฟิลาเมนต์ (Filament, Cathode) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ทำจากลวดทังสเตนบริสุทธิ์หรือเป็นรูปตัว V เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ฟิลาเมนต์ ฟิลาเมนต์จะร้อนแดงและปล่อยอิเล็กตรอนวงนอกสุดออกมาโดยรอบในขณะเดียวกันจากกันแคโทด และจากกันแอโนดต่างก็ได้รับกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าลบและบวกตามลำดับ สนามไฟฟ้าลบจากจากกันจะเบี่ยงเบนอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากฟิลาเมนต์ทุกทิศทางให้มารวมกันเป็นจุดเดียว เรียกว่า จุดตัด (Cross Over Point) ที่ 1 ส่วนสนามไฟฟ้าบวกจากแอโนดดึงอิเล็กตรอนจากจุดรวมกันนั้นให้พุ่งลงมาเป็นลำอิเล็กตรอน โดยอาศัยความต่างศักย์ระหว่าง จากกันแคโทด หรือ ฟิลาเมนต์กับแอโนด ความต่างศักย์นี้ก็คือ ศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ซึ่งมีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ ถ้าให้ความต่างศักย์สูง อิเล็กตรอนถูกดึงให้วิ่งลงผ่านเลนส์และตัวอย่างเร็วมากขึ้น เหมาะกับตัวอย่างที่หนา แต่ให้ภาพที่มีความคมชัดต่ำกว่าในตัวอย่างที่บาง ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ไดอะแกรมแสดงการเกิดลำแสงอิเล็กตรอน
 (ก) โครงสร้างปืนอิเล็กตรอน (Structure of electron gun)
 (ข) ผิวสมศักย์ (Equipotential Surface) [15]

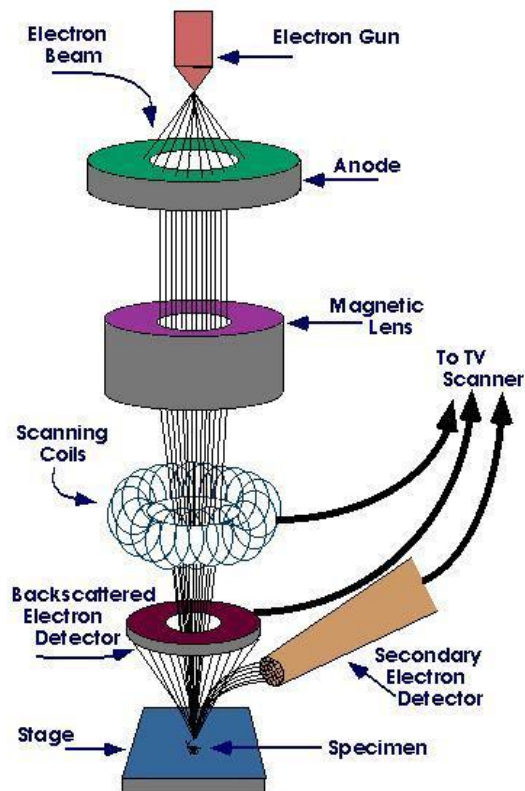
(2) อิเล็กโทรแมกเนติกเลนส์ (Electromagnetic Lens) หรือขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน อิเล็กโทรแมกเนติกเลนส์เป็นชุดของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ที่ทำหน้าที่ในการรวบรวมและบังคับประจุอิเล็กตรอนจำนวนมากที่เกิดขึ้นให้มีลักษณะเป็นลำแสงรูปกรวยขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยให้ไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักลำอิเล็กตรอนปฐมนุม โดยทั่วไปชุดของเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้วางเรียงซ้อนเป็นระยะห่างกันพอประมาณ 2 ถึง 3 ชุด โดยในแต่ละชุดมีช่อง (Aperture) รับแสงประกอบอยู่ ทำหน้าที่กำหนดให้ลำอิเล็กตรอนที่ผ่านลงมาเป็นรูปกรวยที่สมมาตรที่สุด

(3) บั๊มสุญญากาศและระบบควบคุมความดัน (Vacuum Pump and Control Pressure System) เนื่องจากในคอลัมน์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจำเป็นต้องทำงานภายใต้ภาวะความดัน เพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนถูกทำให้กระเจิงกลับด้วยแก๊สอะตอม ด้วยเหตุนี้เองตัวอย่างที่ใช้ศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจำเป็นต้องเป็นตัวอย่างที่ไม่มีความดันไอสูง สาเหตุสำคัญที่จำเป็นต้องปรับสภาพภายในคอลัมน์ให้เป็นสุญญากาศโดยเฉพาะส่วนบนที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนก็เพื่อให้สามารถควบคุมลำอิเล็กตรอนได้ แต่ก็ทำให้ความดันสุญญากาศในช่องใส่ตัวอย่างที่อยู่ส่วนล่างสูงตามไปด้วย ซึ่งมีผลต่อตัวอย่างบางชนิดที่มีความชื้น และในตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าเกิดการตกค้างของประจุบนผิวตัวอย่างมาก ทำให้สัญญาณภาพที่ได้ไม่ดีเท่าตัวอย่างที่นำไฟฟ้า ดังนั้นการใช้ระบบควบคุมความดันที่สามารถปรับสภาพความดันในช่องใส่ตัวอย่างให้มีความดันสุญญากาศต่ำ จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าได้

(4) ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen Chamber) ส่วนนี้อยู่ล่างสุด เป็นส่วนของช่องว่างใต้เลนส์ชุดสุดท้ายมีขนาดกว้างพอที่ติดตั้งอุปกรณ์ใช้รวบรวมสัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวอย่างและลำอิเล็กตรอน ได้แก่ ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิง (SE Detector) ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BSE Detector) และตัวตรวจวัดสัญญาณเอกซเรย์ (X-Ray Detector) ในอุปกรณ์วิเคราะห์แบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ เป็นต้น โดยมีส่วนสำคัญคือ แท่นวางตัวอย่าง ซึ่งมีอุปกรณ์ใช้ในการควบคุมการเลื่อนของแท่นดังกล่าวไปมาได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง ทั้งในแนวนอน (4 ทิศทาง) และแนวตั้ง (2 ทิศทาง) และสามารถควบคุมการเอียง (Tilt) และการหมุน (Rotate) ของตัวอย่างได้

(5) ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron Signal Detector) ตัวตรวจวัดที่ใช้ด้วยกัน 3 ชนิดได้แก่ ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิง (SE Detector), ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BSE Detector) และตัวตรวจวัดสัญญาณเอกซเรย์ (X-Ray Detector) ในอุปกรณ์วิเคราะห์แบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ซึ่งมีการติดตั้งและจัดวางมุมที่ไต่ระดับกับแท่นวางตัวอย่างต่างๆ กัน เพื่อให้สามารถรวบรวมสัญญาณที่เกิดให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยในตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงใช้ตัวตรวจวัดรังสีชนิดพลาสติกเรืองแสงกึ่งตัวนำ ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับใช้ตัวตรวจวัดรังสีชนิดซิลิคอนไดโอด (Solid-State Diode, SSD) ตัวตรวจวัดชนิดกระเจิงกลับความดันไฟฟ้าต่ำ (Backscatter Low Voltage detector) และตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ใช้ตัวตรวจวัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำประเภท Si(Li) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์เรืองเฉพาะธาตุแบบช่องเดี่ยว

(6) อุปกรณ์สร้างภาพ (Imaging Devices) ในส่วนของอุปกรณ์สร้างภาพ ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณที่ได้รับให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏที่จอรับภาพ ซึ่งส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยภาพรวมแล้ว สามารถดูได้จากรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [15]

2.5.2 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) [16-

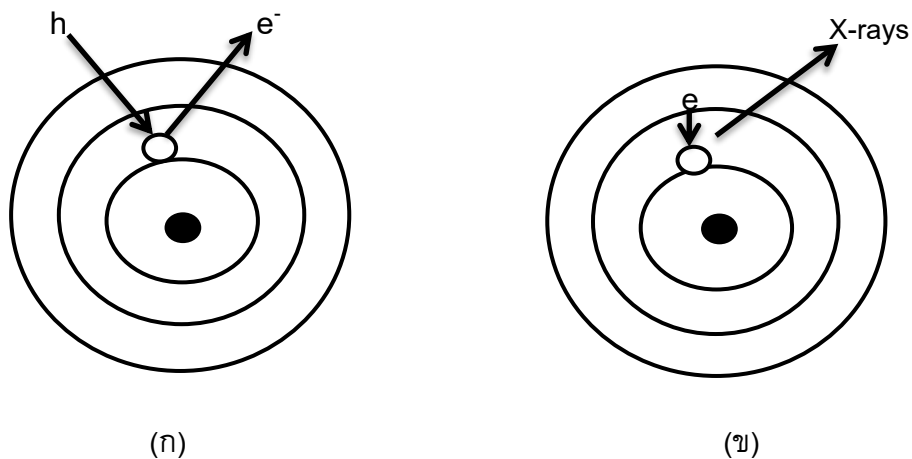
17]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-Destructive Analysis) ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในวัสดุเบื้องต้น ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยชุดข้อมูลของค่า D-Spacing และความเข้มของรังสีที่ตรวจจับได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameters) ชนิดของเฟสที่ปรากฏ

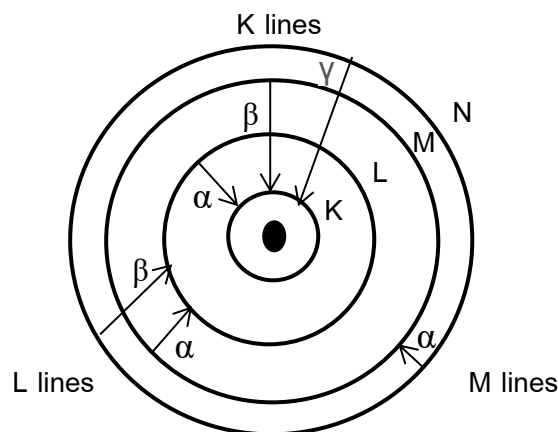
รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10nm เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืน การกระเจิง หรือการเลี้ยวเบนของรังสี ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบ ดังนั้นเมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพฤติกรรม การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นได้

2.5.2.1 การเกิดของรังสีเอกซ์

เมื่อยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเช่น อิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ปฐมภูมิไปกระทบอนุภาคที่เป็นเป้า ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่วงในของอะตอมอนุภาคที่เป็นเป้าหลุดออกมา และทำให้มีออร์บิทัลว่างเกิดขึ้น ที่ว่างที่เกิดขึ้นทำให้อะตอมมีเสถียรภาพต่ำลง ดังนั้นอิเล็กตรอนในชั้นถัดออกมาซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ออร์บิทัลที่ว่างอยู่อย่างรวดเร็ว แต่การเข้ามาแทนที่นี้จะต้องมีการคายพลังงานส่วนที่เกินออกมาในรูปของความร้อนหรือรังสีเอกซ์ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเกิดของรังสีเอกซ์อนุภาคพลังงานสูงเข้าชนทำให้ (ก) อิเล็กตรอนชั้นในหลุดออกไป (ข) อิเล็กตรอนในชั้นถัดมาจะเข้ามาแทนที่พร้อมกับคายรังสีรังสีเอกซ์ออกมา [16]



รูปที่ 2.23 การเรียกชื่อรังสีเอกซ์ [16]

ถ้าอิเล็กตรอนในชั้น L หรือ M เข้ามาแทนที่ว่างที่เกิดจากการหลุดออกไปของอิเล็กตรอนในชั้น K จะเรียกรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นรังสี $K\alpha$ หรือ $K\beta$ ตามลำดับซึ่ง จะเป็นรังสีที่มีความเข้มสูงและถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางสเปกโทรสโคปีเป็นอย่างมาก ตัวอย่างการเรียกชื่อรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 2.23

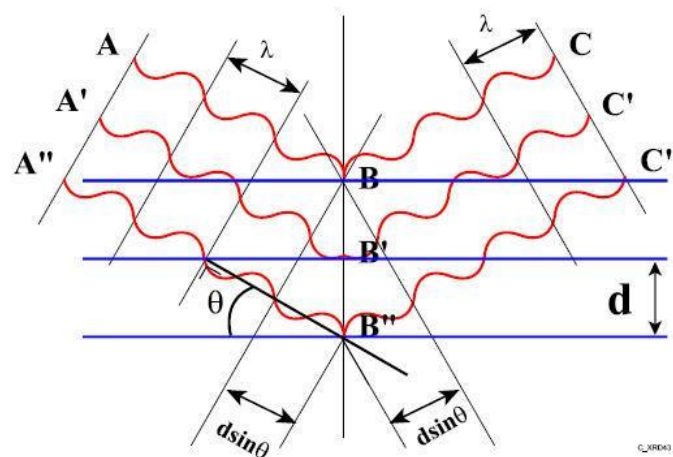
รังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอังสตรอม ($\text{\AA}$) ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับขนาดของอะตอมรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Bremsstrahlung หรือ Continuous X-Rays) ซึ่งมีลักษณะเป็นแถบพลังงานที่กว้าง และรังสีเอกซ์แบบลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ (Characteristic X-Rays)

2.5.2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาโครงสร้างของผลึกของแข็งในระดับอะตอมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

(1) Powder X-ray Diffraction ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดรังสีเอกซ์ Diffraction จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอก วัฏภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่าเป็นผลึก หรือเป็นอสัณฐาน เทคนิคนี้ยังมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิพพันธุ์เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวัฏภาคของวัสดุได้

(2) Single-crystal X-ray Diffraction หรือ X-ray Crystallography สามารถใช้หาโครงสร้างของโมเลกุลได้ คือ สามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะ มุมระหว่างอะตอมในโมเลกุลได้เนื่องจากวัสดุตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา และขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ อยู่ในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึกของของแข็ง ซึ่งทำให้รังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [17]

การเลี้ยวเบนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การกระเจิง (Scattering) ของรังสีตกกระทบซึ่งทำมุม θ กับผิวหน้าของของแข็ง มุมของรังสีกระเจิงจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบซึ่งในแต่ละระนาบของโครงผลึกจะมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ขั้นตอนที่สองคือการเกิดการแทรกสอด (Interference) ของรังสีกระเจิงที่เกิดขึ้นจากระนาบต่างๆ ถ้าการแทรกสอดเป็นแบบเสริม (Constructive Interference) เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นจากต่างระนาบตรงกัน (In Phase) จะทำให้รังสีกระเจิงมีความสูงของคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อนำฟิล์มมารองรับจะเป็นเป็นจุดสว่างใหญ่ ถ้าการแทรกสอดเป็นแบบหักล้าง (Destructive Interference) เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นต่างเฟสกัน (Out Of Phase) รังสีกระเจิงจะมีค่าแอมพลิจูดลดลง ถ้านำฟิล์มมารองรับจะเห็นเป็นจุดที่เล็กกว่าหรือไม่เห็นเลยถ้าเกิดการหักล้างอย่างสมบูรณ์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบ สามารถอธิบายโดยใช้กฎของแบร็ก (Bragg's Law) ดังสมการ 2.13

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.13)$$

โดย n คือจำนวนเต็มซึ่งเรียกว่าอันดับของการสะท้อน λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ d คือระยะห่างระหว่างระนาบผลึก และ θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบผลึก ถ้าเราสามารถวัดมุม 2θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีที่เกิดการแทรกสอดกับรังสีตกกระทบเราสามารถหาค่า d ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดได้

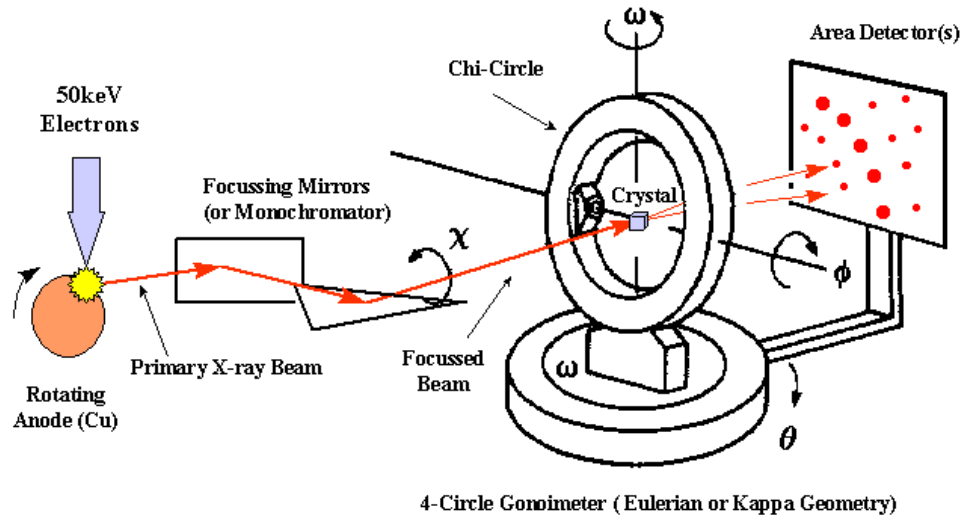
ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือมีดังนี้

(1) แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube) สำหรับเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คือหลอดรังสีเอกซ์หรือหลอดคูลิดจ์ (Coolidge Tube) ประกอบด้วยหลอดสุญญากาศ ซึ่งภายในบรรจุแคโทดซึ่งเป็นเส้นลวดให้ความร้อน แอโนดคือโลหะที่เป็นเป้า แอโนดที่ใช้ในหลอดรังสีเอกซ์ต้องเป็นโลหะที่นำความร้อนได้ดี คือมีสภาพนำความร้อนสูงและมีจุดหลอมเหลวสูงหลุดออกจากแคโทดและพุ่งเข้าชนแอโนด ทำให้อิเล็กตรอนวงในของแอโนดหลุดออกมา เมื่ออิเล็กตรอนชั้นอื่นเข้าไปแทนที่ออร์บิทัลที่ว่าง แอโนดจะคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ และความร่อย โดยทั่วไปรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่คายออกมาทั้งหมด รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านหน้าต่างของหลอดที่ทำจากธาตุเบริลเลียม (Be) โลหะที่นิยมใช้เป็นแอโนดคือ ทองแดงหรือโมลิบดีนัม (Mo) โดยหลอดที่ใช้ทองแดงจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมกับผลึกขนาดเล็ก ส่วนโมลิบดีนัมเหมาะสมกับผลึกขนาดใหญ่หรือผลึกที่มีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดี

(2) อุปกรณ์สำหรับเลือกความยาวคลื่น อาจจะเป็นโมนโครเมเตอร์ (Monochromator) หรือแผ่นกรองแสงซึ่งเป็นตัวดูดกลืนความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการเช่น ใช้เซอร์โคเนียม (Zr) หนา 0.01 cm. ในการดูดกลืนรังสี $K\beta$ ของโมลิบดีนัม ทำให้เหลือเพียง $K\alpha$ เท่านั้น ข้อจำกัดคือตัวกรองที่ใช้ดูดกลืนความยาวคลื่นที่ต้องการมีให้เลือกน้อย

(3) ที่ใส่ตัวอย่างและฐานวาง ที่ใส่ตัวอย่างอาจเป็นพลาสติก หรือโลหะก็ได้ส่วนฐานวางอาจเป็นแท่งที่ไม่เคลื่อนที่ หรือเป็นแท่งที่สามารถหมุนได้

(4) ตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ และสามารถวัดรังสีกระเจิงได้ ณ มุมต่างๆ ทำให้หาค่า 2θ ได้



รูปที่ 2.25 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องเอกซเรย์

[ที่มา: <http://www.stolaf.edu/people/hansonr/mo/diffract.html>]

ข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างแบบผงคือ พีกในสเปกตรัมจะคมชัดเมื่อวัสดุนั้นมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในช่วงกว้าง (Long Range Order) ถ้าไม่เช่นนั้นพีกจะกว้างออก (Broadening) อย่างไรก็ตามเมื่อพีกกว้างออกนั้นเรายังสามารถประมาณขนาดของอนุภาคได้ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 100 nm เนื่องจากการกว้างออกของพีกเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างที่เกิดไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเลี้ยวเบนซึ่งสามารถนำมาหาค่าขนาดของผลึกสารตัวอย่างได้เช่นกัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [18-26]

ปี 1991 M. Grätzel [18] เป็นนักวิจัยคนแรกที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ในตอนนั้น Grätzel ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำเนื่องจาก TiO_2 เป็นสารที่มีช่องว่างของแถบพลังงานกว้าง และสีย้อมไวแสงที่ใช้คือ N719 ซึ่งเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้พบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงยังคงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยพัฒนาในส่วนของโฟโตอิเล็กโทรด สีย้อมไวแสง สารอิเล็กโทรไลต์ และแคโทดอิเล็กโทรด เป็นต้น ทำให้การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ถูกวิจัยขึ้นอย่างกว้างขวาง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้มีค่าที่สูงขึ้น

ในปี ค.ศ. 2004 W. Aihara และคณะ [19] ได้เล็งเห็นความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมพลังงาน ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีความยืดหยุ่นสามารถนำไปใช้งานได้ในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ จึงเกิดการพัฒนาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีความยืดหยุ่นขึ้น โดยโพโต อิเล็กโทรดเป็นการเตรียมฟิล์ม TiO_2 ด้วยเทคนิคคัตต็อกเตอร์เบลด (Doctor Blade) บนแผ่นรองรับ พลาสติกนำไฟฟ้า คือ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate ; PET) เคลือบด้วย อินเดียมดีบุกออกไซด์ (Indium Tin Oxide ; ITO) เป็นแผ่นรองรับฟิล์ม TiO_2 ซึ่งผลของประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในงานวิจัยคือ 4.2 เปอร์เซ็นต์ แต่ข้อเสียที่พบ คือ มีการหลุดลอกของ พื้นผิวที่ง่าย เกิดความเสียหายบนพื้นผิวที่เกิดจากความล้าของวัสดุ เป็นต้น

ค.ศ. 2006 Man Gu Kang และคณะ [20] พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ให้มี ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และมีความยืดหยุ่นของฟิล์มโดยเคลือบฟิล์ม TiO_2 บนแผ่นรองรับสแตนเลสเพื่อ เป็นโพโตอิเล็กโทรด ได้ศึกษาการใช้แผ่นรองรับสแตนเลส เปรียบเทียบกับการใช้แผ่นรองรับแบบกระจก นำไฟฟ้า สแตนเลสที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด คือ ฟอยล์สแตนเลส หน้า 100 mm (TiO_2/StSt), ฟอยล์ สแตนเลสเคลือบชั้น ITO หน้า 150 mm ($\text{TiO}_2/\text{ITO}/\text{StSt}$) และฟอยล์สแตนเลสเคลือบชั้น ITO หน้า 150 mm และชั้นซิลิกอนออกไซด์หน้า 150 mm ($\text{TiO}_2/\text{ITO}/\text{SiO}_x/\text{StSt}$) จากนั้นแผ่นรองรับทั้ง 3 ชนิดถูก เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 หน้า 10 mm และเผาที่ 470°C นาน 10 นาที ในส่วนเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดใช้ พลาสติกเคลือบ ITO เคลือบพลาสติกนั้น พบว่า โพโตอิเล็กโทรดชนิด $\text{TiO}_2/\text{ITO}/\text{SiO}_x/\text{StSt}$ มีการยึดเกาะ ของฟิล์มและแผ่นรองรับดีที่สุด ส่วนการเปรียบเทียบผลการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ DSSC ทั้ง 3 ชนิด พบว่าชนิดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ $\text{TiO}_2/\text{ITO}/\text{SiO}_x/\text{StSt}$ เช่นกัน ซึ่งเป็นผลมา จากมีชั้นของซิลิกอนซึ่งเป็นวัสดุประเภทฉนวนไฟฟ้า จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และอีกทั้งซิลิกอนยังป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจากสแตนเลสสู่อิเล็กโทรไลต์ที่อาจจะลุผ่านชั้น ITO ที่มีรูพรุน แต่อย่างไรนั้นกระจกนำไฟฟ้ายังให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไว แสงที่ดีที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของแผ่นรองรับสแตนเลสทั้ง 3 ชนิดพบว่า สแตนเลสที่เคลือบชั้น ITO และชั้น SiO_x ค่าประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าที่สูง กว่าสแตนเลสอีก 2 ชนิด คือ 4.2 เปอร์เซ็นต์

ค.ศ. 2007 Kun-Mu Lee และคณะ [21] ได้ปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในด้าน ความยืดหยุ่น โดยได้ปรับเปลี่ยนจากการใช้กระจกนำไฟฟ้าเป็นพลาสติก เพื่อเป็นแผ่นรองรับในการ สังเคราะห์ฟิล์มของโพโตอิเล็กโทรด พลาสติกที่ใช้คือ Polyethylene Naphthalate (PEN) เคลือบด้วย ITO ถูกใช้เป็นแผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรด ในส่วนของฟิล์ม TiO_2 เตรียมด้วยเทคนิคการตกสะสม แบบอิเล็กโทรโฟเรติก (Electrophoretic Deposition ; EPD) สารตั้งต้นที่ใช้คือ วัสดุนาโนไทเทเนียมได ออกไซด์ทางการค้า P90 (TiO_2 Nanoparticle P90) 0.25 g (สังเคราะห์ด้วยเทคนิค โซล-เจล) ละลายใน ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 100 mm กวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) และ อัลตราโซนิกส์ (Ultrasonically) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ในส่วนเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดใช้กระจกนำไฟฟ้าเคลือบด้วย ฟลูออรีนเจือซิงค์ออกไซด์ ($\text{F}:\text{SnO}_2$;FTO) ซึ่งผลของการปรับเปลี่ยนแผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรดให้

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 3.14 เปอร์เซ็นต์ ในปีเดียวกัน Kinji Onoda และคณะ [22] ได้เห็นว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด ซึ่งหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ คือในส่วนของโพโตอิเล็กโทรด ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาโดยใช้แผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรดเป็น วัสดุในกลุ่มโลหะ คือใช้แผ่นสแตนเลส (Stainless 304, SUS304) และแผ่นไทเทเนียม (Ti) เป็นแผ่น รองรับในการวางฟิล์ม TiO_2 และนำมาศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพกับแผ่นรองรับที่ใช้กระจกนำ ไฟฟ้าแบบเดิม โดยในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นรองรับโพโตอิเล็กโทรดเป็นวัสดุ 3 ชนิด คือ กระจกนำไฟฟ้า โลหะสแตนเลส และโลหะไทเทเนียม แผ่นรองรับทั้ง 3 ชนิด นำมาเคลือบผลึกนาโน TiO_2 ด้วยเทคนิค ออโตเตอร์เบลต นำมาอบที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาที จะได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 12 mm และนำไป เผา ที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นโพโตอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดถูกนำไปแช่สีย้อม N719 นาน 1 วัน เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดใช้กระจกนำไฟฟ้าเคลือบด้วยแพลทินัม ซึ่งผลของงานวิจัยนี้คือ การใช้วัสดุใน กลุ่มโลหะ (โลหะสแตนเลส และโลหะไทเทเนียม) ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 3.2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยโดย Xing Fan และคณะ [23] ได้ศึกษาวิจัยพัฒนาเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยโพโตอิเล็กโทรด ฟิล์มบาง TiO_2 ถูกวางบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตน เลส จุ่มเคลือบในไทเทเนียมไอโซพรอพอกไซด์ 0.01 M ในเอทานอล และอะซิโตน 0.02 โมล นาน 30 วินาที และเผาที่ 500°C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำมาพ่นด้วยคอลลอยด์ TiO_2 ที่เตรียมจากสารตั้งต้น คือ รูพรุนไทเทเนียมไอโซพรอพอกไซด์ จากนั้นนำมาเผาที่ 500°C เป็นเวลา 30 นาที ความหนาของ ของฟิล์มสามารถควบคุมโดยความเข้มข้นของคอลลอยด์ TiO_2 และอัตราการพ่น พบว่าค่าประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้แผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรดแบบตาข่ายสแตนเลส ให้ค่า ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้แผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรดแบบ แผ่นสแตนเลสทั่วไป

ค.ศ. 2009 Kun-Mu Lee และคณะ [24] ศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสงแบบพลาสติก โดยแผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรดคือ TiO_2 เคลือบบนพลาสติกนำ ไฟฟ้า (PEN เคลือบด้วย ITO) และศึกษาผลของสีย้อม 2 ชนิด คือ สีย้อม N719 และสีย้อม SJW-E1 (cis-di(thio-cyanato)-4,4'-di(octylethylenedioxythienyl)-2,2'-bipyridine-4,4'-dicarboxylate-2,2'-bipyridine ruthenium(II)) ซึ่งผลในการศึกษาพบว่า สีย้อม SJW-E1 ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบพลาสติกสูงถึง 6.31 เปอร์เซ็นต์ และยังแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีความ ยืดหยุ่นนั้นสามารถเก็บเกี่ยวแสงได้สูงขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ดี ขึ้น

ค.ศ. 2010 Wen-Hsiang Yen และคณะ [25] ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้มี ความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น โดยแผ่นรองรับของโพโตอิเล็กโทรดคือ พลาสติกนำไฟฟ้า (PEN เคลือบด้วย ITO) เคลือบฟิล์มอนุภาคนาโน TiO_2 แทรกด้วยอนุภาคนาโนของ TiO_2 ในเชิงพาณิชย์ (*Degussa P25 Titanium Dioxide* และ *Degussa P90 Titanium Dioxide*) โดยฟิล์มอนุภาคนาโน TiO_2 ที่สังเคราะห์ขึ้น นั้นได้รับความประสบความสำเร็จในด้านการเตรียมฟิล์ม TiO_2 โดยการใช้อุณหภูมิต่ำซึ่งกระบวนการ

เตรียมฟิล์มบางในงานวิจัยคือ กระบวนการโซล-เจล โดยใช้สารตั้งต้นเป็นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium Isopropoxide ; TTIP) ซึ่งผลของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในงานวิจัยได้ค่าถึง 3.10 เปอร์เซนต์

ค.ศ. 2012 Eryta S.R และคณะ [26] ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ที่สามารถยืดหยุ่นสูง บาง และน้ำหนักเบาฟิล์มพลาสติกจึงถูกเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาแทนกระจกนำไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งเป็นที่น่าสนใจอย่างมากเนื่องจากมีศักยภาพสำหรับนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ เช่น สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงประเภทม้วนเก็บได้ ในงานวิจัยได้ใช้ฟิล์มพลาสติกนำไฟฟ้า (PET เคลือบด้วย ITO) พื้นที่ประมาณ 2.0 cm^2 เคลือบอนุภาคนาโน TiO_2 โดยเทคนิคด็อกเตอร์เบลด ซึ่งจะได้โฟโตอิเล็กโทรดที่มีชั้นของ PET/ITO/ TiO_2 แล้วนำไปแช่ในสีย้อม N719 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ส่วนแคโทดอิเล็กโทรดเตรียมจากแพลทินัมเคลือบลงบนแผ่นรองรับพลาสติกนำไฟฟ้า (PET เคลือบด้วย ITO) ผลการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพประมาณ 0.12 เปอร์เซนต์

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองสำหรับงานวิจัยเรื่อง “การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง” โดยจะอธิบายถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล และขั้นตอนการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง รวมทั้งการศึกษาลักษณะทางจุลภาคของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และค่าประสิทธิภาพของเซลล์

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดของการใช้สารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

3.1.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองนี้สรุปได้ดังตาราง 3.1 โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

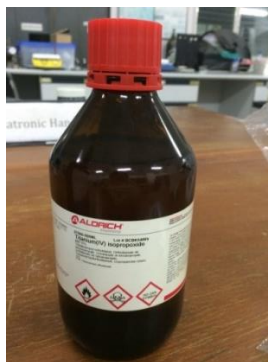
ตารางที่ 3.1 สารเคมี

ลำดับ	สาร	รายละเอียด
1	Titanium Isopropoxide	จากบริษัท Sigma – Aldrich
2	Titanium Dioxide P25	จากบริษัท Sigma – Aldrich
3	Polyethylene Glycol 20,000	จากบริษัท Sigma – Aldrich
4	Triton X-100	จากบริษัท Sigma – Aldrich
5	Isopropanol (Propan-2-ol)	จากบริษัท RCI Labscan
6	เอทานอล (Ethanol)	จากบริษัท EMD Millipore Corporation
7	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)	จากบริษัท RCI Labscan
8	Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II) (สีย้อม N719)	จากบริษัท Sigma – Aldrich
9	Acetonitrile	จากบริษัท RCI Labscan
10	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrofluoric Acid)	จากบริษัท Ajax Finechem
11	Iodine Resublimed (I ₂)	99.8 เปอร์เซ็นต์ มวลโมเลกุล 253.81 g/mol จากบริษัท Qrec Chemical Co Ltd.

ตารางที่ 3.1 สารเคมี (ต่อ)

ลำดับ	สาร	รายละเอียด
12	Lithium Iodine (LiI)	จากบริษัท EMD Millipore Corporation
13	4-Tert-Butylpyridine	จากบริษัท Sigma – Aldrich
14	พาราฟิล์ม (Parafilm)	จากบริษัท Bemis Flexible Packaging
15	Chloroplatinic Acid (H_2PtCl_6)	จากบริษัท Sigma – Aldrich
16	Acetone	จากบริษัท RCI Labscan

1. Titanium Isopropoxide (TTIP) ขนาดอนุภาคน้อยกว่า $1\ \mu m$ ความหนาแน่น $0.96\ g/mL$ มีความบริสุทธิ์ 97.0 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma–Aldrich ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 3.1



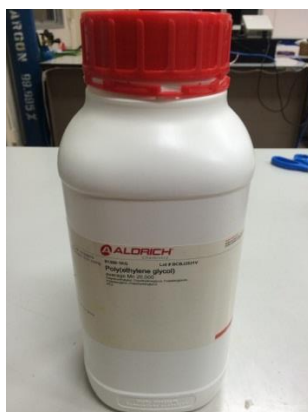
รูปที่ 3.1 Titanium Isopropoxide (TTIP)

2. Titanium Dioxide P25 ขนาดอนุภาค 21 nm ความหนาแน่น 4.26 g/mL มีความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Titanium Dioxide P25

3. Polyethylene Glycol 20,000 (PEG 20000) น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20,000 amu ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ใช้เป็นตัวประสาน (Binder) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Polyethylene Glycol 20,000 (PEG 20000)

4. Triton X-100 น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยเท่ากับ 80,000 amu ผลิตโดย Sigma – Aldrich ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว ดังรูปที่ 3.4



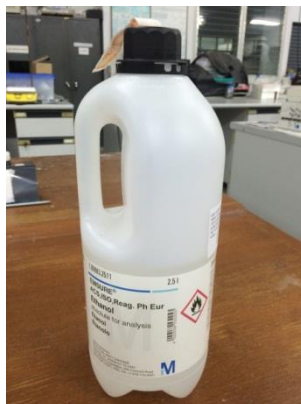
รูปที่ 3.4 Triton X-100

5. Isopropanol (Propan-2-ol) ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลายของอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3.5



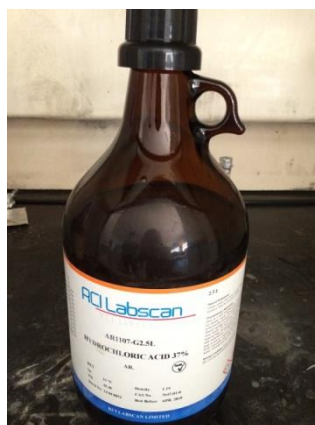
รูปที่ 3.5 Isopropanol (Propan-2-ol)

6. เอทานอล (Ethanol) ได้รับมาตรฐาน ISO ผลิตโดยบริษัท EMD Millipore Corporation ใช้สำหรับทำความสะอาดและใช้สำหรับเป็นตัวทำละลายของ TTIP และ สีย้อม N719 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เอทานอล (Ethanol)

7. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCL) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กรดไฮโดรคลอริก

8. สีย้อม N719 (Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato) bis (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium (II)) มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Aldrich เพื่อใช้เป็นตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สีย้อม N719

9. Acetonitrile จากบริษัท Labscan ใช้เป็นล้างหลังการแช่สีย้อม ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Acetonitrile

10. กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem ใช้สำหรับกัดเปิดผิวแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสก่อนเผาออกไซด์ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กรดไฮโดรฟลูออริก

11. Iodine Resublimed (I_2) มีความบริสุทธิ์ 99.8 เปอร์เซ็นต์ มวลโมเลกุล 253.81 g/mol ผลิตโดยบริษัท Qrec Chemilcal Co Ltd. ใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Iodine Resublimed (I_2)

12. Lithium Iodine (LiI) มีความบริสุทธิ์ 98.0 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 Lithium Iodine (LiI)

13. 4-Tert-Butylpyridine มีความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลายในอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 4-Tert-Butylpyridine

15. แผ่นพาราฟิล์ม ผลิตโดยบริษัท Bemis Flexible Packaging เพื่อใช้ประกอบเซลล์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผ่นพาราฟิล์ม

16. Chloroplatinic Acid (H_2PtCl_6) ความบริสุทธิ์ 37.50 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ใช้เป็นสารตั้งต้นของแพลทินัม ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 Chloroplatinic Acid

17. อะซิโตน (Acetone) ชนิด Analytical Reagent Grade จากบริษัท Labscan ใช้สำหรับทำความสะอาด และใช้เป็นตัวทำละลายแพลทินัม ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 อะซิโตน

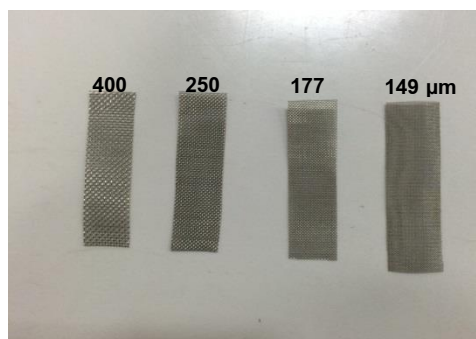
3.1.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

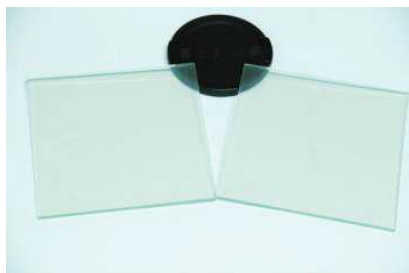
ลำดับ	สาร	รายละเอียด
1	ตาข่ายสแตนเลส	ตาข่ายสแตนเลส ขนาด 40 μm , 60 μm , 80 μm และ 100 μm
2	เครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (J-V Tester)	ใช้เพื่อวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์
3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	รุ่น JSM-5910LV จากบริษัท JEOL Ltd.
4	กระจกนำไฟฟ้า (FTO)	8 Ω /square
5	ปืนเป่าลมร้อน	รุ่น KX 2000K จากบริษัท Black & Decker
6	เตาเผาสาร	รุ่น LEF-1035-1 จากบริษัท Labtech
7	อัลตราโซนิกส์	รุ่น D-78224 Singen/Htw. จากบริษัท Elma Schmidbauer GmbH
8	เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง	รุ่น BSA224S-CW จากบริษัท Sartorius
9	เครื่องกวนสาร	รุ่น MS7-H550-S จากบริษัท Scilogex รุ่น C-MAG HS 7 จากบริษัท IKA

1. ตาข่ายสแตนเลสขนาด 400 μm , 250 μm , 177 μm และ 149 μm ใช้สำหรับเป็นแผ่นรองรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ตาข่ายสแตนเลส

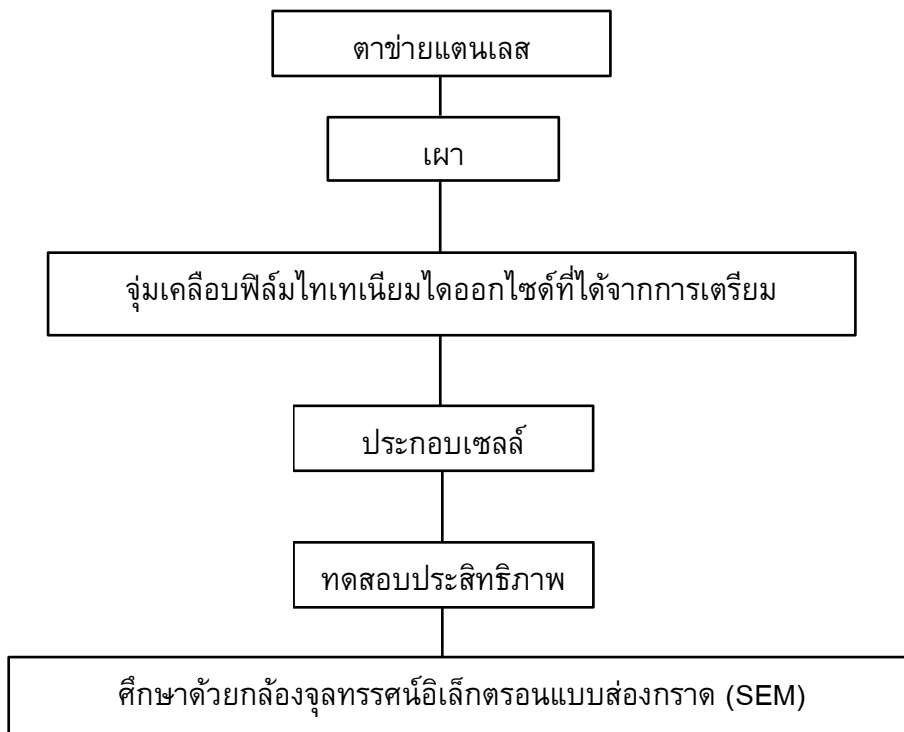
2. กระจกนำไฟฟ้า เป็นกระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นของ Fluorine-doped Tin Oxide ไว้ด้านใดด้านหนึ่งเพื่อให้กระจกมีสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 3.18



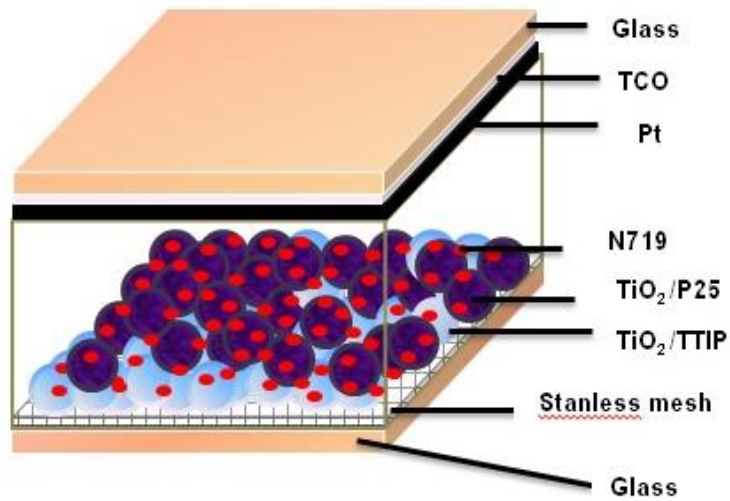
รูปที่ 3.18 กระจกนำไฟฟ้า 8 Ω/sq . จากบริษัท Solaronix

3.2 วิธีการทดลอง

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยหลายขั้นตอน ในการทดลองนี้ได้ทดลองปรับเปลี่ยนแผ่นรองรับของโฟโตอิเล็กโตรดจากกระจกนำไฟฟ้า เป็นวัสดุในกลุ่มของโลหะ คือตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาด 400, 250, 177 และ 149 μm โดยตาข่ายสแตนเลสจะถูกเผา เพื่อใช้เป็นพื้นผิวในการจุ่มเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียม จุ่มเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นแช่ในสีย้อม N719 ส่วนของแคโทดอิเล็กโตรดใช้กระจกนำไฟฟ้าเป็นแผ่นรองรับเคลือบแพลทินัม ศึกษาวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยจำกัดพื้นที่ของเซลล์คือ $1.0 \times 0.2 \text{ cm}^2$ และศึกษาลักษณะฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ลำดับขั้นตอนการทดลอง และเงื่อนไขที่ใช้ศึกษาดังรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.20 รูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นรองรับ

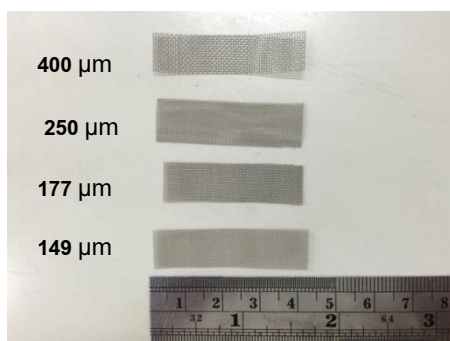
การเตรียมแผ่นรองรับได้สรุปไดอะแกรมขั้นตอนดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นรองรับที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน

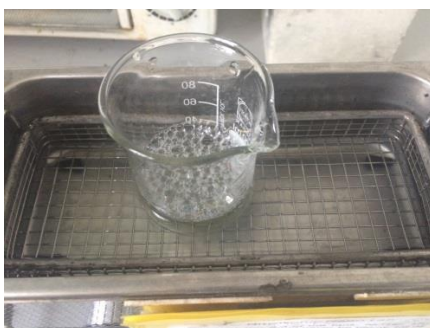
โดยมีรายละเอียดการเตรียมดังนี้

1. ตาข่ายสแตนเลสขนาด 400, 250, 177 และ 149 μm ถูกตัดให้ได้ขนาด $1.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ตาข่ายสแตนเลส 400, 250, 177 และ 149 μm ขนาด $1.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$

2. ทำความสะอาดตาข่ายสแตนเลส โดยการล้างด้วยผงซักฟอก, acetone และน้ำกลั่น พร้อมสั่นทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์ จากนั้นทิ้งให้แห้ง



รูปที่ 3.23 การทำความสะอาดแผ่นรองรับ

3. กัดผิวแผ่นรองรับด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกในเครื่องอัลตราโซนิกส์ กัดนาน 15 นาที



รูปที่ 3.24 การกักผิวแผ่นรองรับ

4. ล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด และรอให้แห้ง

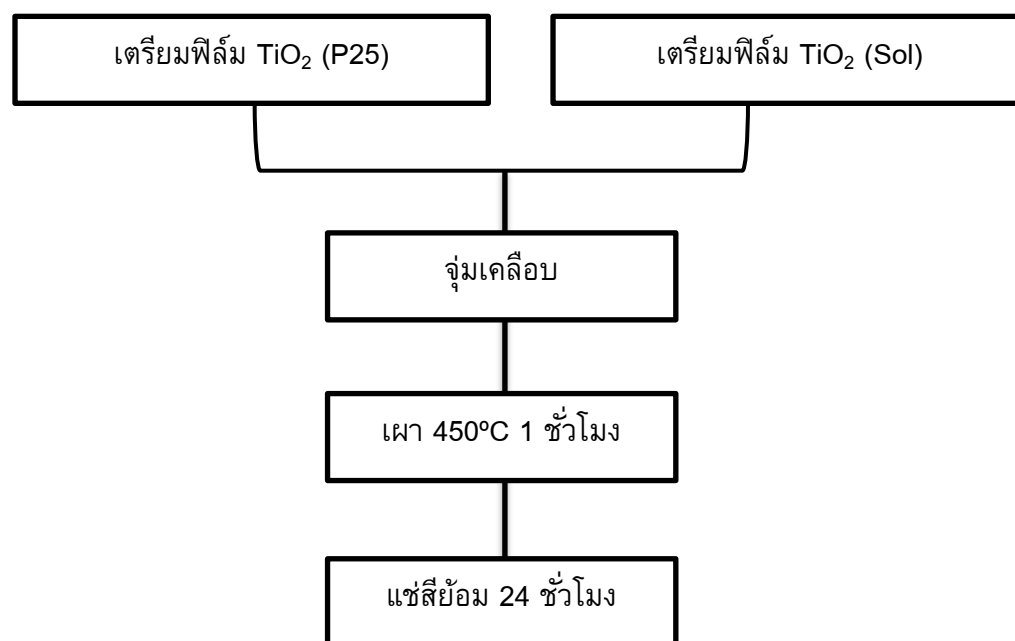


รูปที่ 3.25 การทำความสะอาดแผ่นรองรับหลังการกักกรด

5. เเผาที่อุณหภูมิ 750°C นาน 1 ชั่วโมง
6. ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิโตอิเล็กโทรด

การเตรียมฟิโตอิเล็กโทรดได้สรุปดังแผนภาพในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมฟิโตอิเล็กโทรด

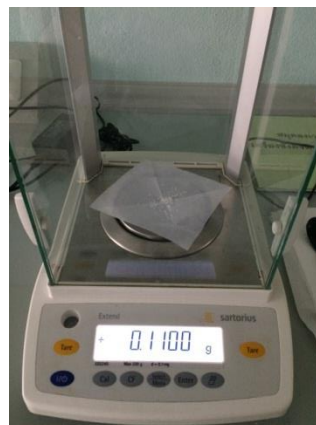
โดยมีรายละเอียดการเตรียมดังนี้

1. เตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า P25 (TiO_2 (P25)) [26]

- ชั่งผง P-25 TiO_2 1 g และ PEG20000 0.11 g



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.27 (ก) การเตรียมสารตั้งต้น และ (ข) ตัวประสานสำหรับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

- เติม Triton x-100 11 μL และ น้ำปราศจากไอออน 2 ml



รูปที่ 3.28 การเติมตัวทำละลาย และสารลดแรงตึงผิว

- กวนสารเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.29 การกวนผสมสารให้เข้ากันของ TiO_2 (P25)

2. เตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล TiO_2 (Sol) [27]

- TTIP 3 ml, เอทานอล 30 ml และ น้ำปราศจากไอออน 1 ml



รูปที่ 3.30 การเตรียมสารสำหรับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

- ค่อยๆ เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 60% 1 ml



รูปที่ 3.31 การเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

- กวนสารไว้ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.32 การกวนสารที่ผสมให้เข้ากันของ $\text{TiO}_2(\text{Sol})$

3. การจุ่มเคลือบฟิล์มบนแผ่นรองรับ

- จุ่มด้วยอัตราการเคลื่อนที่ 3 cm/min โดยสภาวะการเคลือบฟิล์มดังตารางที่ 3.3
ชนิดฟิล์มที่ใช้เคลือบมี 3 ชนิด คือ

ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ชื่อชิ้นงานคือ $\text{TiO}_2(\text{P25})$

ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล ชื่อชิ้นงานคือ $\text{TiO}_2(\text{Sol})$

ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล เคลือบบนไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ชื่อ
ชิ้นงานคือ $\text{TiO}_2(\text{P25}) + \text{TiO}_2(\text{Sol})$

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม

ตาข่ายสแตนเลส (μm)	ตาข่ายสแตนเลส แผ่น (μm)	TiO ₂ (P25) (รอบ)	TiO ₂ (Sol) (รอบ)	TiO ₂ (P25) / TiO ₂ (Sol) (รอบ)
400	400	3	3	3/3
250	250	3	3	3/3
177	177	3	3	3/3
149	149	3	3	3/3

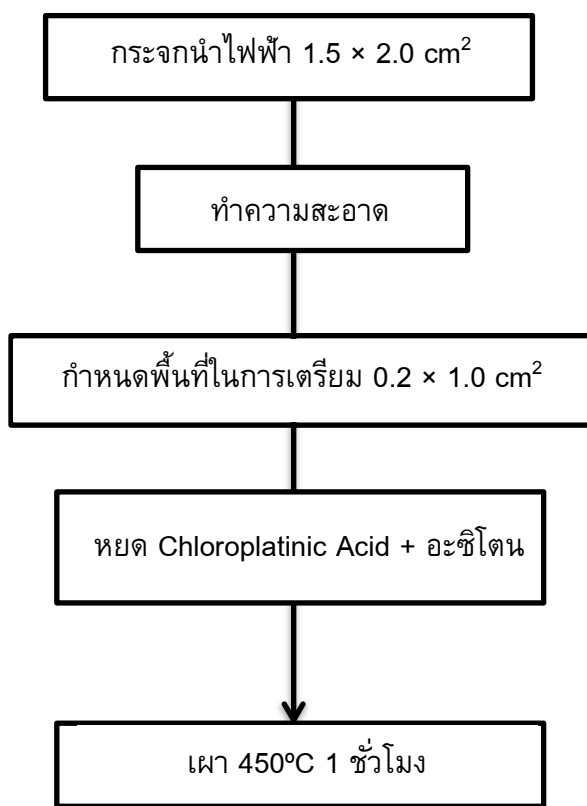
- นำมาเผาที่อุณหภูมิ 450°C นาน 1 ชั่วโมง ศึกษาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำชิ้นงานไปแช่สีย้อม N719 นาน 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.33 การแช่สีย้อม

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์

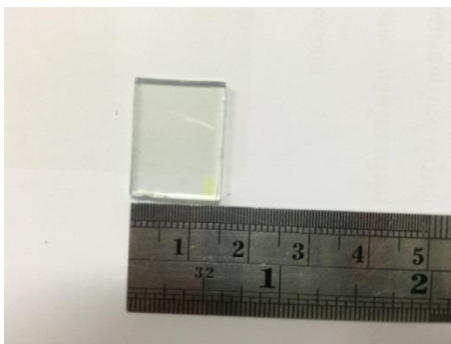
การเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์ได้สรุปผังแผนภาพในรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 ขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์

โดยมีรายละเอียดการเตรียมดังนี้

- (1) ตัดกระจกนำไฟฟ้าให้มีขนาด $1.5 \times 2.0 \text{ cm}^2$ ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าโดยการแช่ในอะซีโตน แล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นแช่ด้วยเอทานอลแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 30 นาที รอให้แห้ง



รูปที่ 3.35 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าสำหรับแคโนเตอร์อิเล็กทรอนิกส์

(2) พื้นที่ในการเตรียมฟิล์มแพลทินัม คือ $0.2 \times 1.0 \text{ cm}^2$ โดยหยดสารละลายที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายความเข้มข้น 20 mM ลงบนกระจกที่ทำความสะอาดแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C นาน 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.36 กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยแพลทินัม

3.2.4 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์

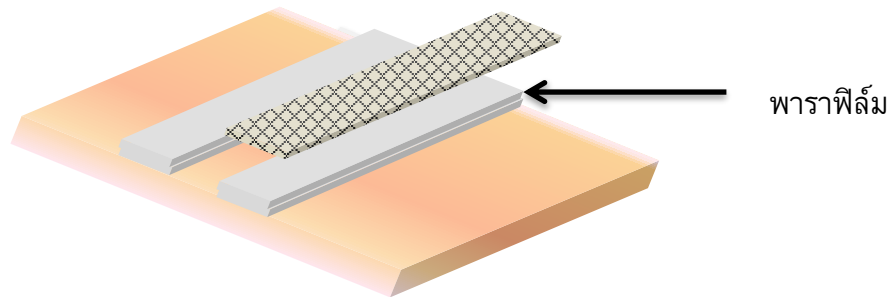
(1) เตรียม I_2 จำนวน 0.03 โมล และ LiI จำนวน 0.3 โมล นำสารที่เตรียมได้มาละลายในปริมาณ 100 ml

(2) เพื่อให้ I_2 และ LiI ละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันกับ 4-Tert-Butylpyridine นำไปปั่นด้วยเครื่อง Stirrer เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

3.2.5 ขั้นตอนการประกอบเซลล์

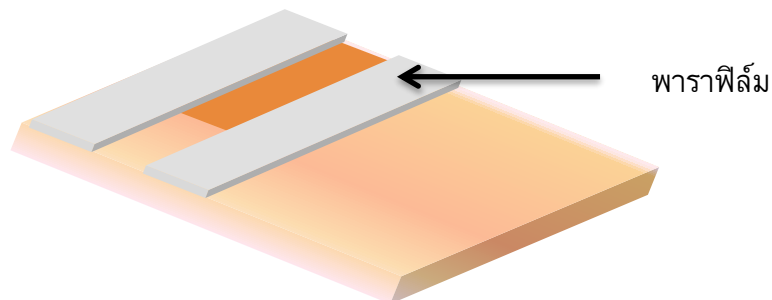
การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัดประสิทธิภาพมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ติดพาราฟิล์มหนา 2 ชั้น บริเวณรอบๆ โฟโตอิเล็กโทรด



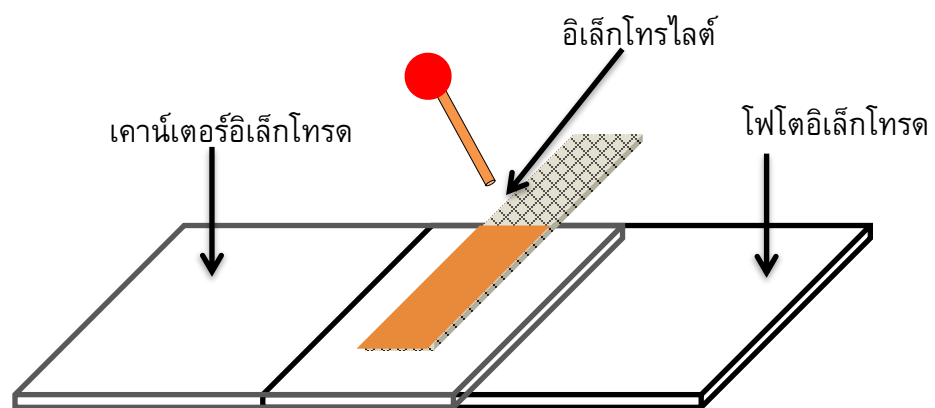
รูปที่ 3.37 วิธีติดพาราฟิล์มบนโฟโตอิเล็กโตรด

(2) ติดพาราฟิล์มหนา 1 ชั้น บริเวณรอบๆ แคโทดอิเล็กโตรด โดยพาราฟิล์มต้องทับขอบแพลทินัมเล็กน้อย



รูปที่ 3.38 วิธีติดพาราฟิล์มบนแคโทดอิเล็กโตรด

(3) นำโฟโตอิเล็กโตรดและ แคโทดอิเล็กโตรดที่เตรียมไว้มาประกบกันแล้วใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าเพื่อให้แผ่นพาราฟิล์มเริ่มหลอม และเชื่อมโฟโตอิเล็กโตรดกับแคโทดอิเล็กโตรดเข้าด้วยกัน แล้วหยดสารอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.2.4 เข้าไประหว่างขั้วทั้งสองแล้วจึงนำไปวัดประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 3.39 ประกอบเซลล์และหยดสารอิลีกโตรไลต์

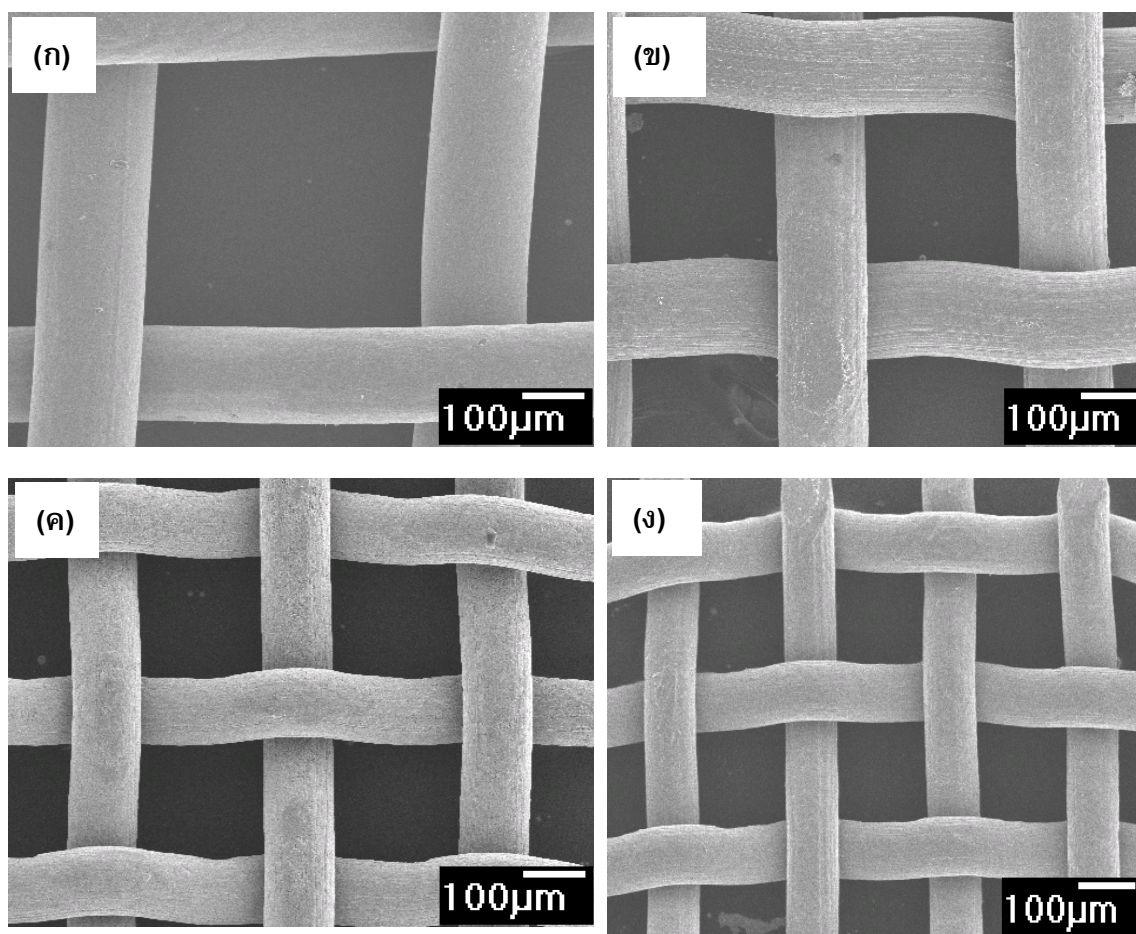
(4) นำไปทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ด้วย J-V Tester

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การสังเคราะห์เส้นลวดนาโนบนแผ่นรองรับนั้นได้สอดคล้องกับหลักการ Doped เหล็ก ออกไซด์ในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง[29] ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงให้มีความสามารถในการถ่ายโอนเพิ่มขึ้น

4.1 ผลการศึกษาพื้นผิวแผ่นรองรับ

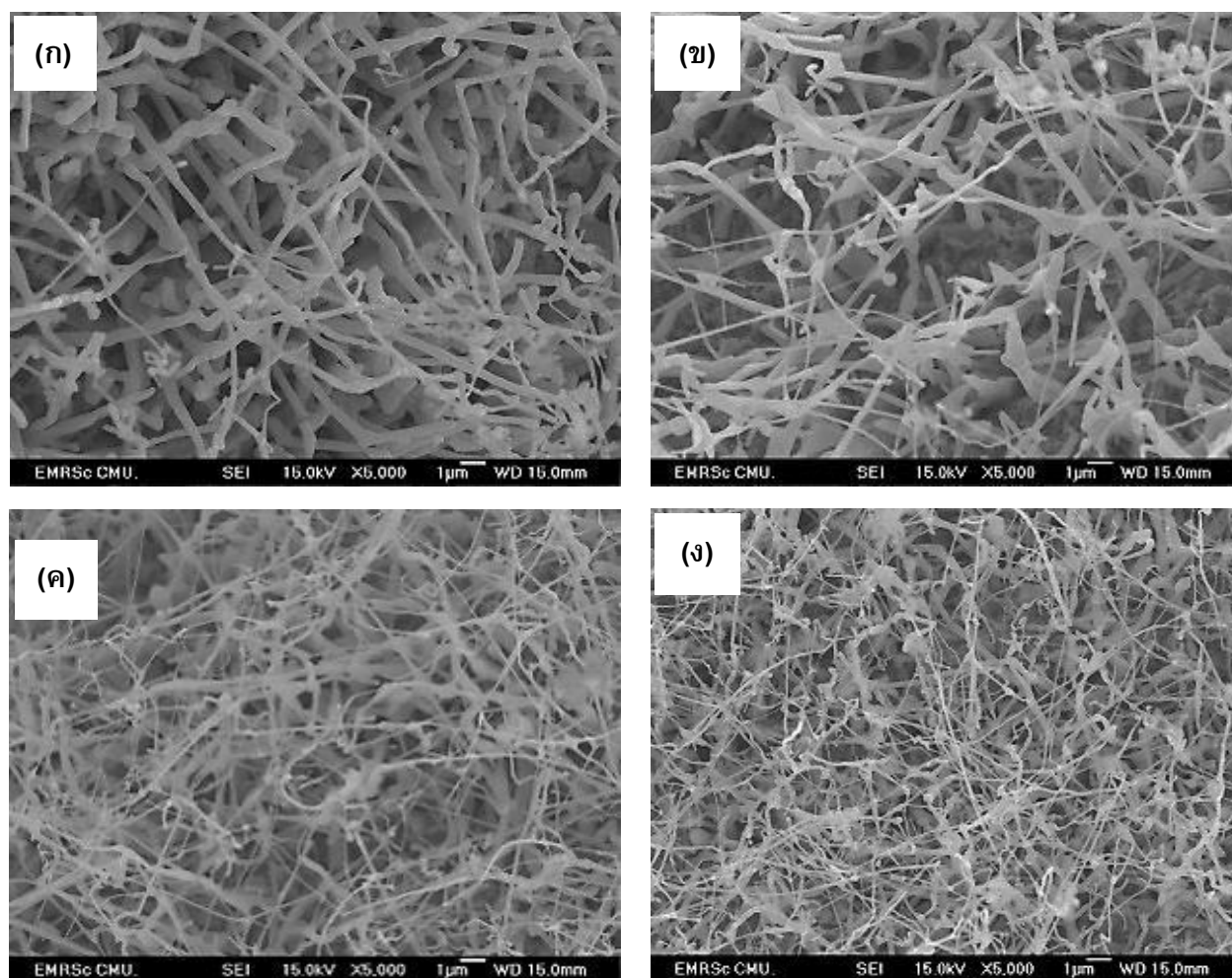


รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของพื้นผิวแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาดต่างๆ โดย (ก) 400 μm , (ข) 250 μm , (ค) 177 μm และ (ง) 149 μm

จากรูปที่ 4.1 เมื่อนำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดแต่ละขนาด ตามยาวขนาด 400 μm (ก) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 166 μm , ตามยาวขนาด 250 μm (ข) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 154 μm , ตามยาวขนาด 177 μm (ค) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 112 μm และ ตามยาวขนาด 149 μm (ง) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 92 μm

4.2 ผลการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนบนแผ่นรองรับ

เมื่อทำการปลูกเส้นลวดนาโนบนแผ่นรองรับ โดยการเผาแผ่นรองรับสแตนเลสที่อุณหภูมิ 750°C และนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนแผ่นรองรับ ตามยาวสแตนเลสที่มีขนาดต่างๆ คือ (ก) 400 μm , (ข) 250 μm , (ค) 177 μm และ (ง) 159 μm

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล SEM จากรูปที่ 4.2 (ก) – (ง) ซึ่งเป็นการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนบนตาข่ายสแตนเลสขนาด 400 μm , 250 μm , 177 μm และ 149 μm สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}\text{C}$

พบว่า เส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมีการกระจายทั่วบนพื้นผิวตาข่ายสแตนเลส มีความยาวมากกว่า 15 μm โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนาโน แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนตาข่ายสแตนเลสขนาดต่าง ๆ

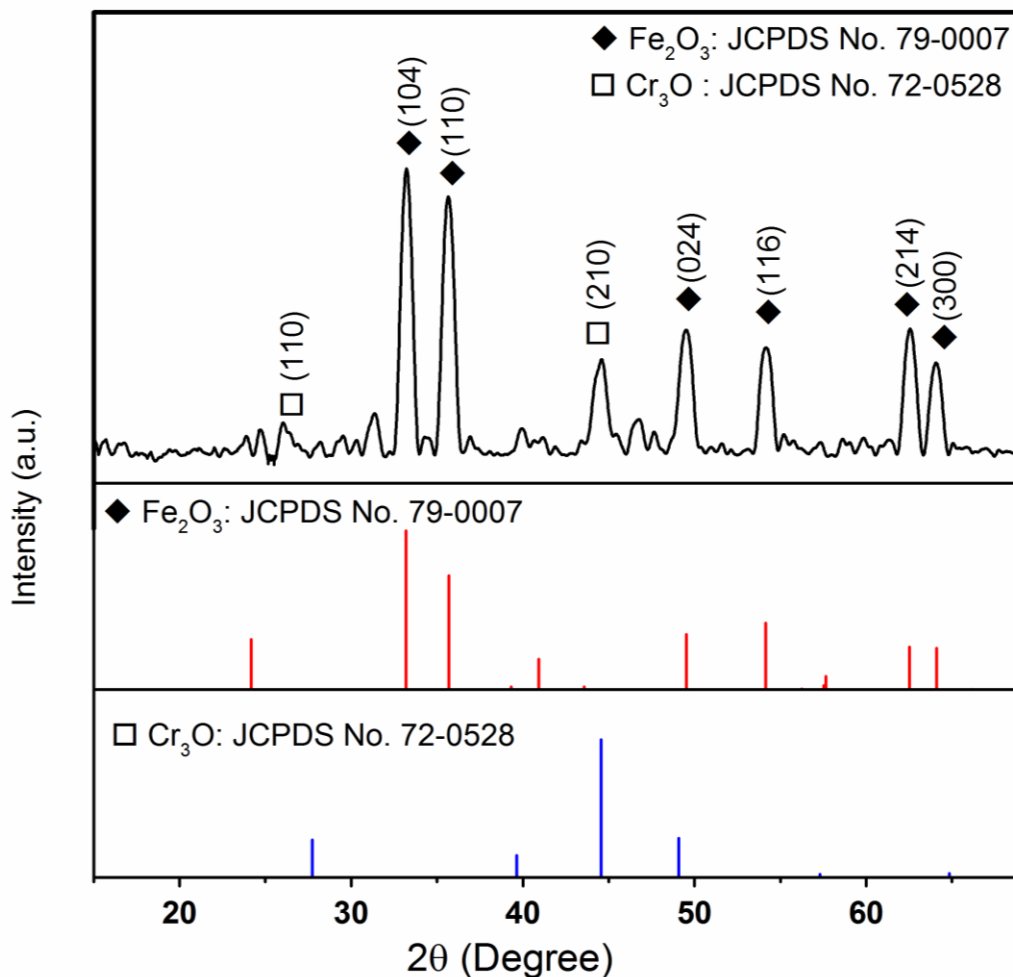
ขนาดตาข่าย (μm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนาโน (nm)
400	218.15 ± 59.44
250	198.97 ± 59.40
177	121.61 ± 44.08
159	111.54 ± 27.19

จากผลการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนาโนในตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดของตาข่ายส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนาโน คือ เมื่อขนาดของตาข่ายสแตนเลสลดลง (400 μm – 159 μm) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนาโนมีขนาดลดลง ซึ่งเกรนของเส้นลวดที่ใช้สานเป็นตาข่ายทำหน้าที่เป็นตำแหน่งก่อเกิดเส้นลวดนาโน กล่าวคือ เส้นลวดขนาดเล็ก เกรนจะมีขนาดเล็ก และเกิดเส้นลวดนาโนขนาดเล็กตามไปด้วย

ในแต่ละขนาดตาข่ายมีขนาดเส้นลวดที่ต่างกันโดย (ก) 400 μm มีขนาดเส้นลวด 169 nm, (ข) 250 μm มีขนาดเส้นลวด 155 nm, (ค) 177 μm มีขนาดเส้นลวด 112 nm และ (ง) 159 μm มีขนาดเส้นลวด 92 nm

4.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) ของแผ่นรองรับ

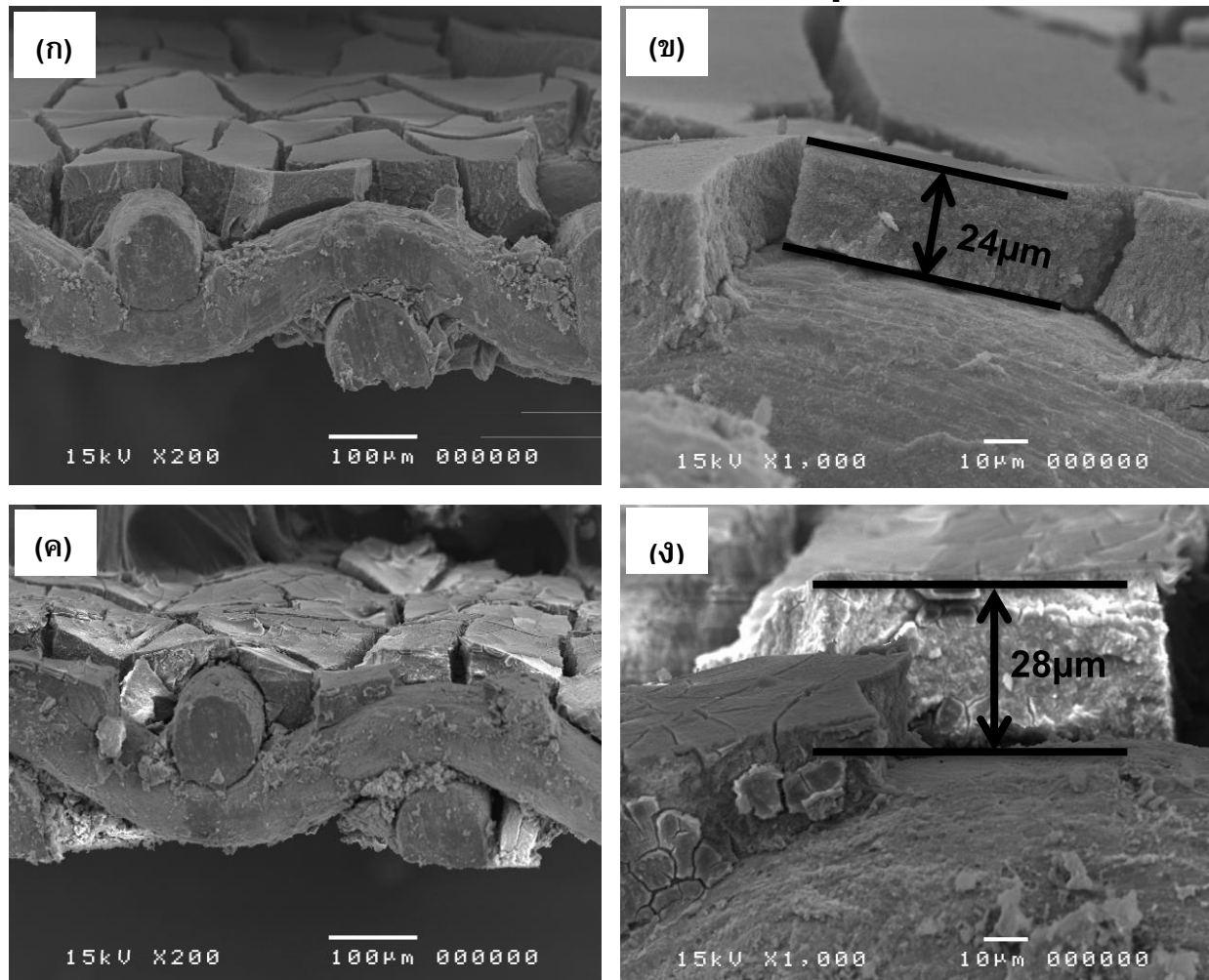
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนตาข่ายสแตนเลสด้วยเทคนิค XRD ใช้ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (λ) 1.54056 Å แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเมื่อเทียบกับฐานข้อมูล Joint Committee on Power Diffraction Standard (JCPDS) หมายเลข 79-0007 ซึ่งเป็นของ Fe_2O_3 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยพีคที่ตำแหน่ง $2\theta = 33.20^\circ, 35.68^\circ, 49.53^\circ, 54.14^\circ, 62.53^\circ$ และ 64.10° เป็นระนาบ (104) (110) (024) (116) (214) และ (300) ตามลำดับ นอกจากนี้พบพีคของ Cr_3O ตรงตามฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 72-0528 ที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.74^\circ, 44.55^\circ$ ซึ่งเป็นระนาบ (110) (210) ด้วย เนื่องจากสแตนเลสเกรดทางการค้า 304 ประกอบไปด้วยเหล็กและโครเมียม เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเป็นองค์ประกอบออกไซด์ของเหล็ก และโครเมียม



รูปที่ 4.3 แสดงผล XRD ของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์บนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส

4.4 ผลการศึกษาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียม ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) สำหรับโฟโตอิเล็กโทรด โดยวิธีการจุ่มเคลือบด้วย TiO_2 2 ชนิด คือ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล ซึ่งได้ศึกษาความหนาของฟิล์มจากภาคตัดขวางด้วยกล้อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาคตัดขวางฟิล์ม TiO_2 ถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงความหนาของฟิล์ม TiO_2 (P25) ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 1000 เท่า และความหนาของฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) ที่กำลังขยาย (ค) 200 เท่า (ง) 1000 เท่า

จากรูป 4.4 ผลการศึกษาความหนาของฟิล์ม พบว่า ฟิล์ม TiO_2 (P25) ที่จุ่มเคลือบจำนวน 3 รอบ มีความหนา 24 μm และฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) ซึ่งจุ่มเคลือบด้วย P25 จำนวน 3 รอบ และ Sol จำนวน 3 รอบ วัดความหนาได้ 28 μm สามารถสรุปความหนาของฟิล์มดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาของฟิล์ม TiO_2 บนตาข่ายสแตนเลสของโฟโตอิเล็กโทรด

ฟิล์ม	ความหนา (μm)
TiO_2 (P25)	24 ± 2.01
TiO_2 (P25+Sol)	28 ± 4.08

4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความต่างศักย์ (J-V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ทำการศึกษา ต่อชนิดของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และลักษณะแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสเพื่อใช้เป็นโฟโตอิเล็กโทรด ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.5.1 ชนิดของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด

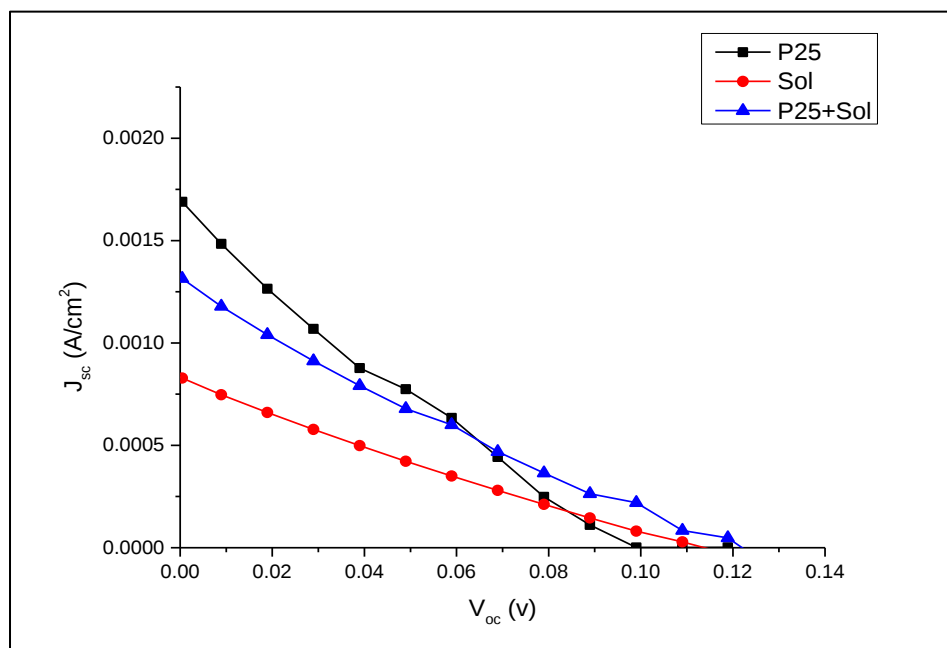
สีย้อมไวแสง

ชั้นฟิล์มของโฟโตอิเล็กโทรดทำการเตรียมโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชนิด คือ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ โซล-เจล แบ่งชนิดของฟิล์มตามการจุ่มเคลือบ ดังนี้

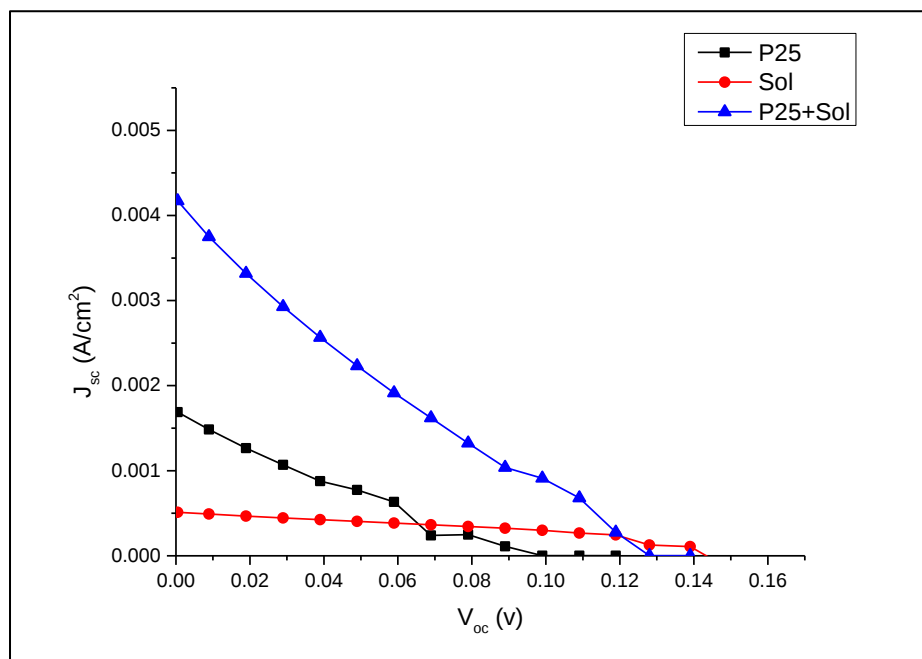
- ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ชื่อชิ้นงานคือ $\text{TiO}_2(\text{P25})$
- ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล ชื่อชิ้นงานคือ $\text{TiO}_2(\text{Sol})$
- ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล เคลือบบนไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ชื่อชิ้นงานคือ $\text{TiO}_2(\text{P25+Sol})$

ฟิล์มทั้ง 3 เจือนไขถูกเคลือบบนแผ่นรองรับตแกรงสแตนเลสให้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.5 - 4.8 และเคลือบบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.10 - 4.13

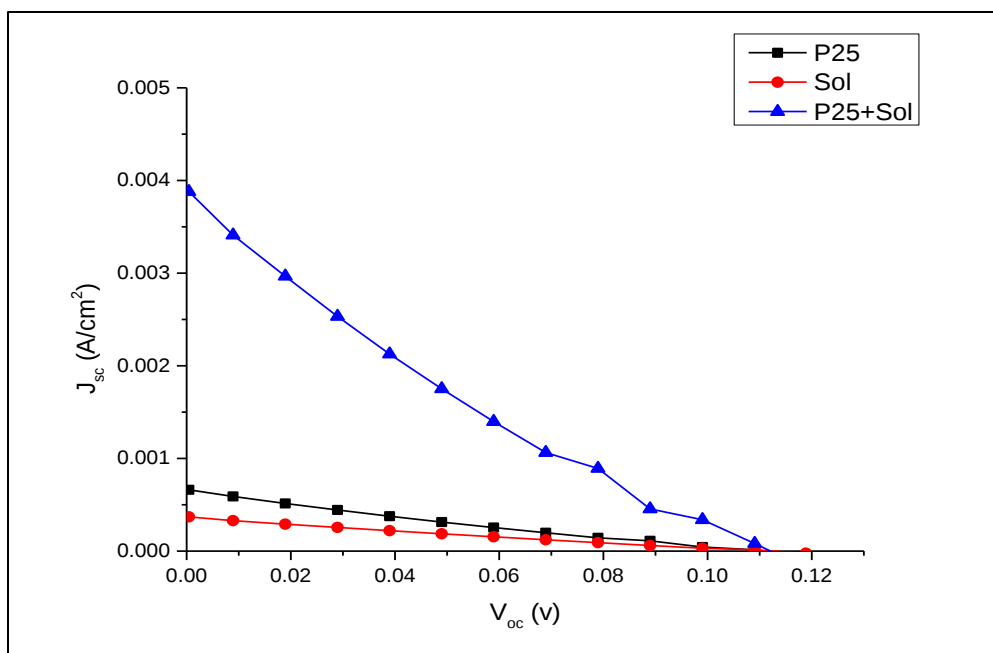
- ผลของชนิดฟิล์ม TiO_2 บนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสในการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



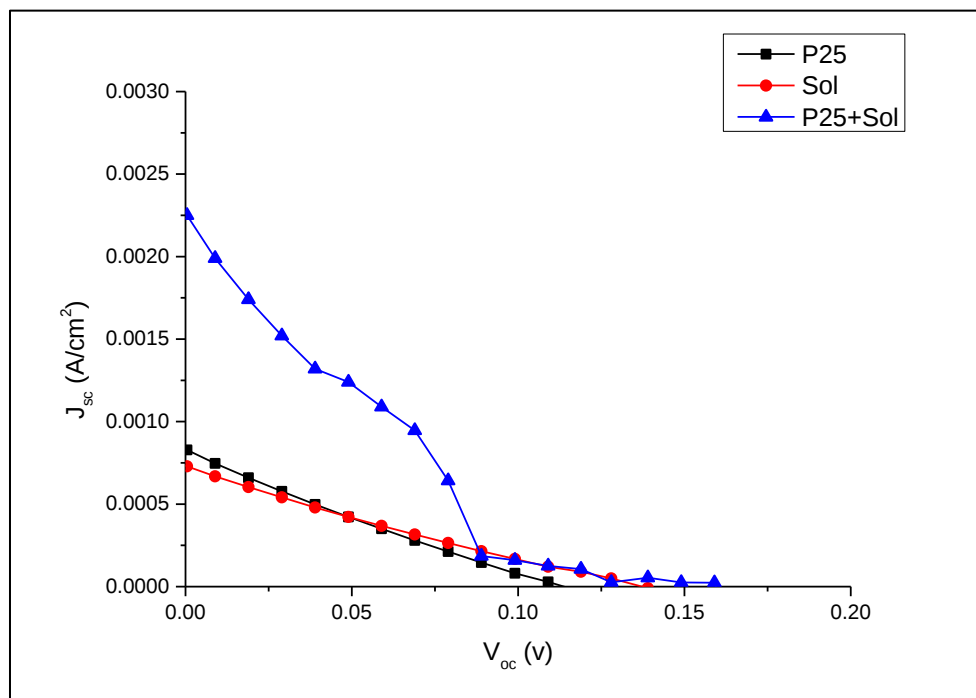
รูปที่ 4.5 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสขนาด 400 μm



รูปที่ 4.6 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสขนาด 250 μm



รูปที่ 4.7 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ
บนตาข่ายสแตนเลสขนาด $177 \mu\text{m}$

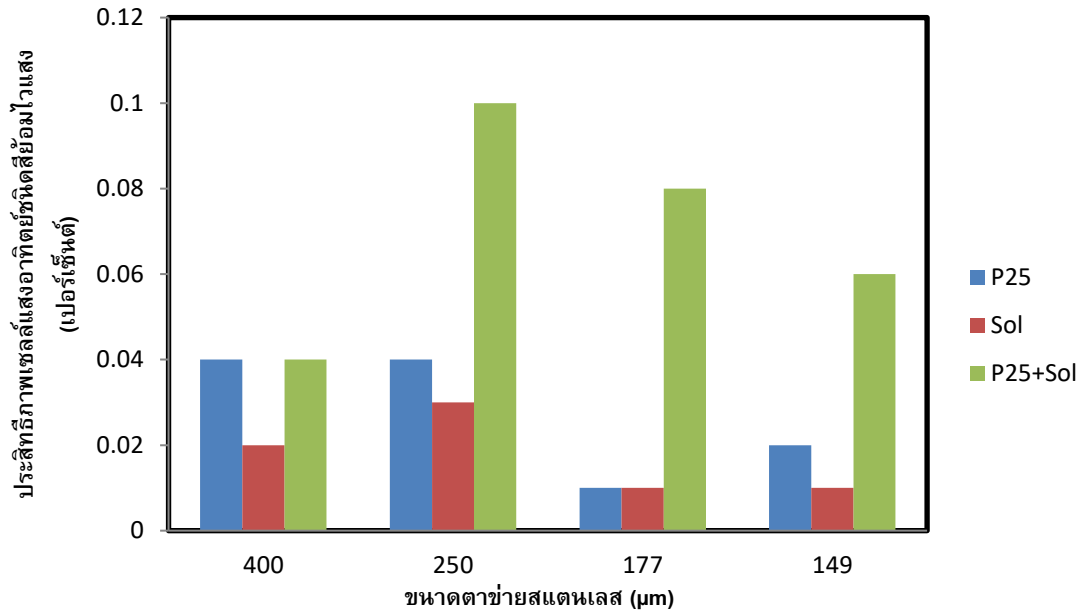


รูปที่ 4.8 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ
บนตาข่ายสแตนเลสขนาด $149 \mu\text{m}$

จากรูปกราฟ J-V 4.5 - 4.8 คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η)
ได้ดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η) ของชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส

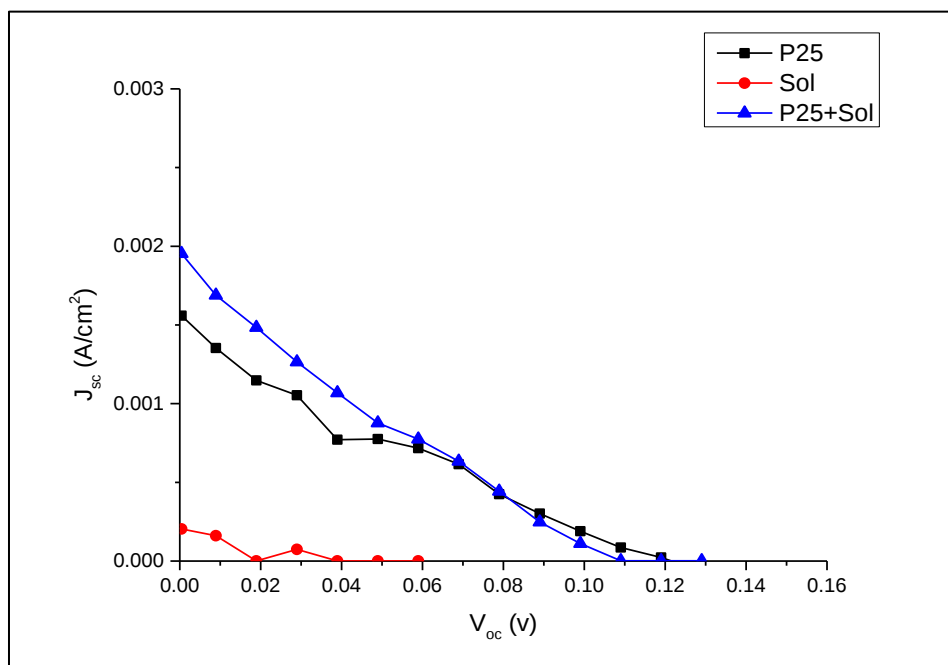
ขนาดตาข่าย (μm)	ฟิล์ม	J_{sc} (A cm^{-2})	V_{oc}	FF	$\eta\%$
400	P25	1.31×10^{-3}	0.12	0.23	0.04
	Sol	8.29×10^{-3}	0.11	0.25	0.02
	P25+Sol	1.69×10^{-3}	0.12	0.19	0.04
250	P25	1.69×10^{-3}	0.12	0.19	0.04
	Sol	5.12×10^{-4}	0.14	0.42	0.03
	P25+Sol	4.17×10^{-3}	0.15	0.19	0.10
177	P25	6.61×10^{-4}	0.11	0.21	0.01
	Sol	3.70×10^{-4}	0.12	0.24	0.01
	P25+Sol	3.88×10^{-3}	0.11	0.20	0.08
149	P25	8.29×10^{-4}	0.11	0.23	0.02
	Sol	6.61×10^{-4}	0.11	0.21	0.01
	P25+Sol	2.25×10^{-3}	0.16	0.18	0.06



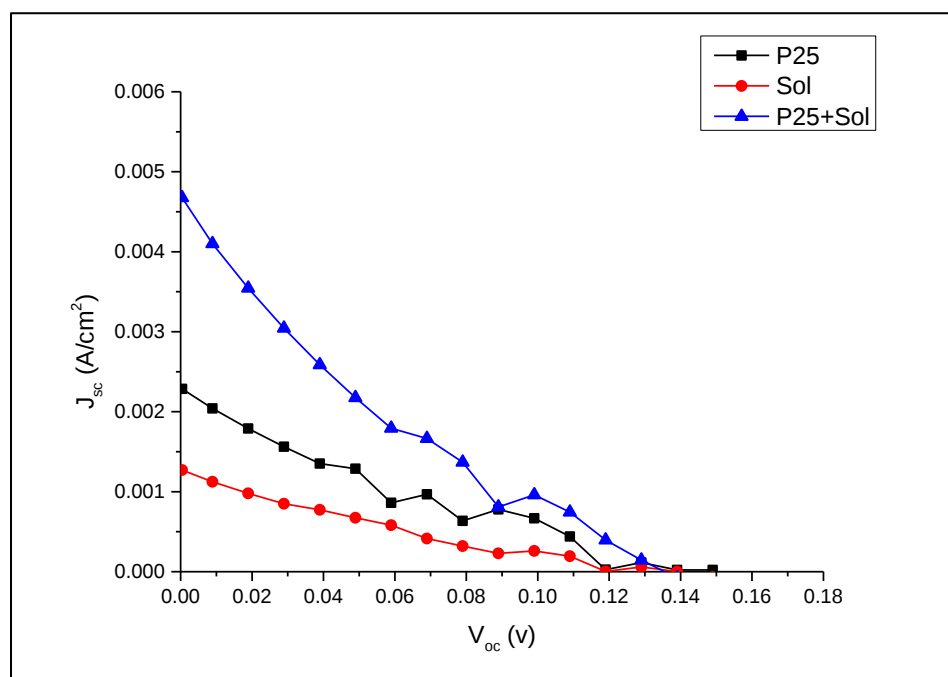
รูปที่ 4.9 แผนภูมิแท่งสรุปผลการเปรียบเทียบชนิดฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ

ตารางที่ 4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25})$ มีประสิทธิภาพ 0.04 เปอร์เซ็นต์ และ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{Sol})$ มีประสิทธิภาพ 0.03 เปอร์เซ็นต์ โดยชนิดของฟิล์ม TiO_2 ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ ฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25+Sol})$ ซึ่งเป็นการเคลือบชั้นฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{Sol})$ บนฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25})$ ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์

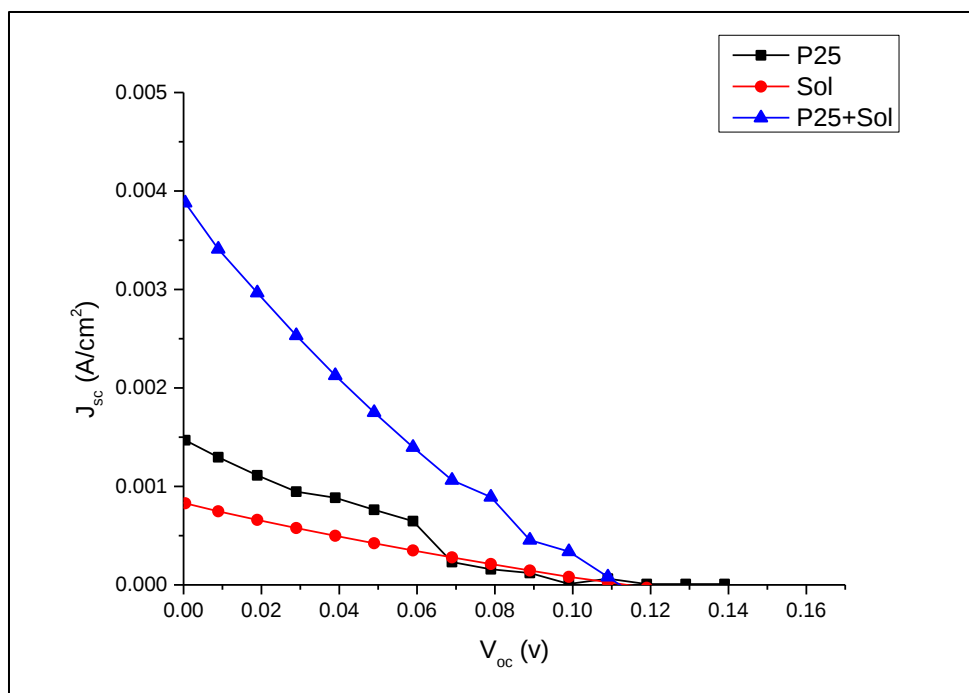
- ผลของชนิดฟิล์ม TiO_2 บนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนในการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



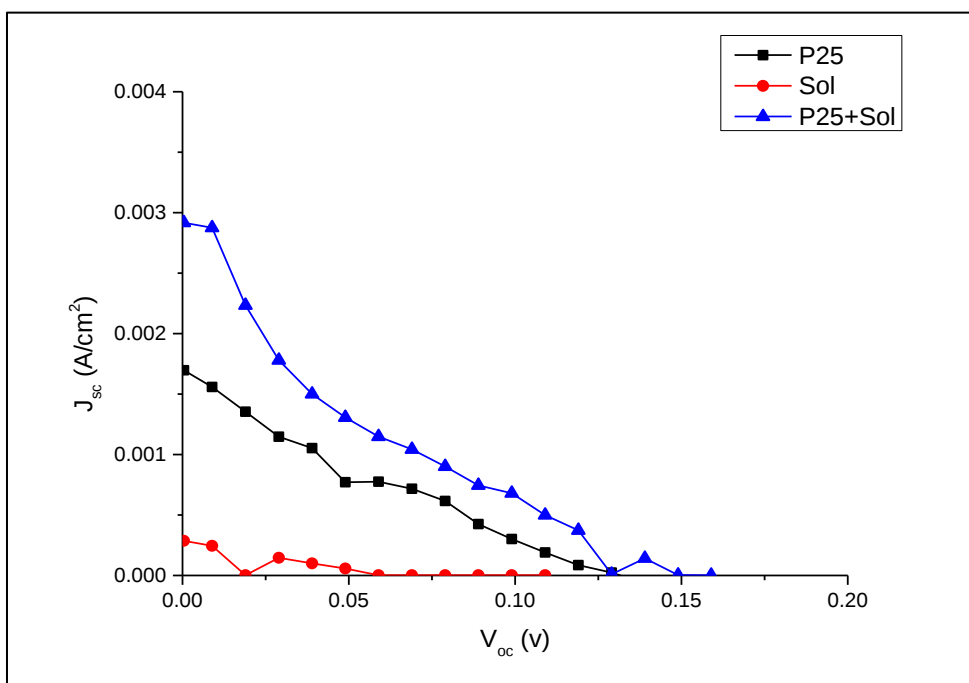
รูปที่ 4.10 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน ขนาดตาข่าย 400 μm



รูปที่ 4.11 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน ขนาดตาข่าย 250 μm



รูปที่ 4.12 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน ขนาดตาข่าย $177 \mu\text{m}$

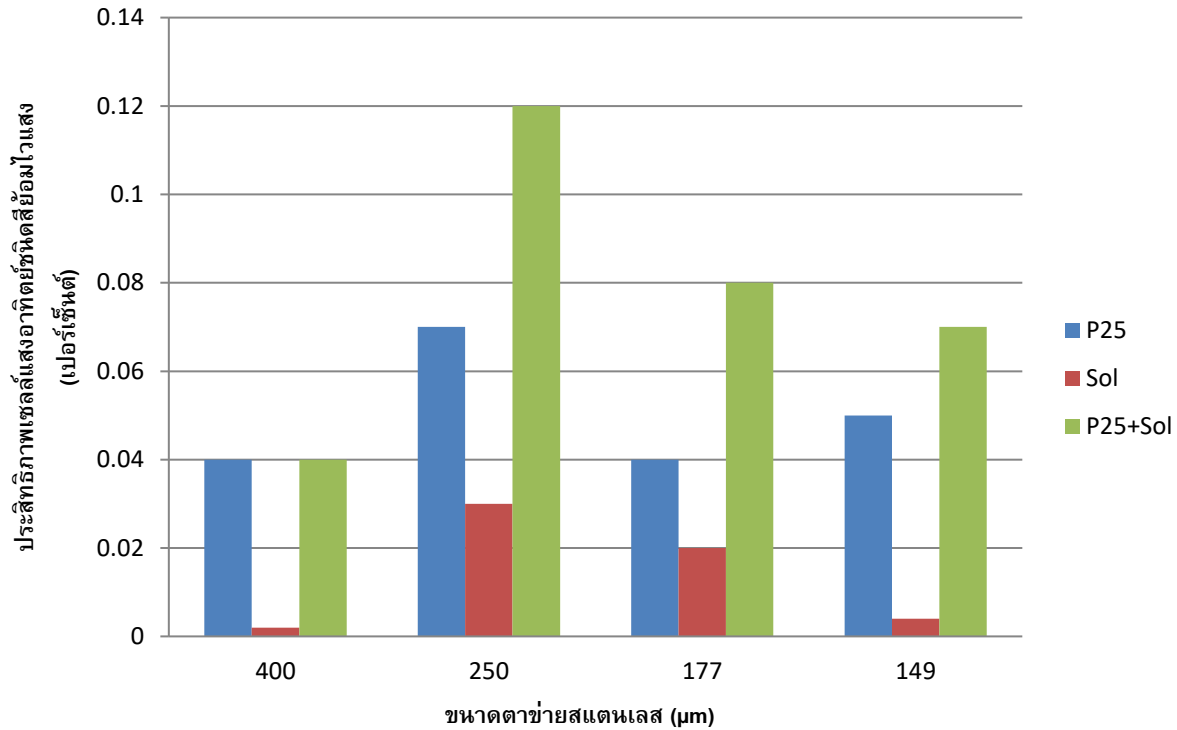


รูปที่ 4.13 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 ชนิดต่างๆ บนตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน ขนาดตาข่าย $149 \mu\text{m}$

จากกราฟ J-V แสดงในรูปที่ 4.10 - 4.13 คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η) ได้ดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , FF, V_{oc} และประสิทธิภาพ (η) ของชนิดฟิล์ม TiO_2 ต่อ ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน

ขนาดตาข่าย (μm)	ฟิล์ม	J_{sc} ($A\ cm^{-2}$)	V_{oc}	FF	$\eta\%$
400	P25	1.56×10^{-3}	0.12	0.23	0.04
	Sol	2.04×10^{-4}	0.06	0.18	0.002
	P25+Sol	1.95×10^{-3}	0.13	0.18	0.04
250	P25	2.29×10^{-3}	0.15	0.2	0.07
	Sol	1.27×10^{-3}	0.14	0.19	0.03
	P25+Sol	4.68×10^{-3}	0.13	0.19	0.11
177	P25	1.47×10^{-3}	0.14	0.19	0.04
	Sol	8.29×10^{-4}	0.11	0.23	0.02
	P25+Sol	3.88×10^{-3}	0.11	0.2	0.08
149	P25	1.7×10^{-3}	0.13	0.22	0.05
	Sol	2.87×10^{-4}	0.11	0.13	0.004
	P25+Sol	2.92×10^{-3}	0.16	0.15	0.07

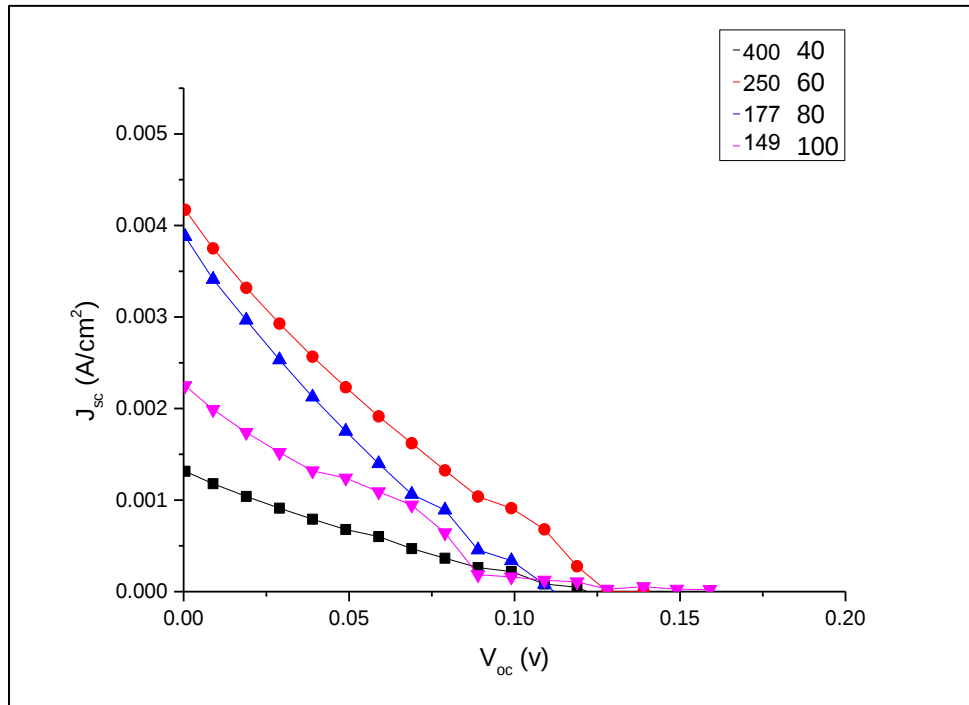


รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งสรุปผลการเปรียบเทียบชนิดฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากการเตรียมบนแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนขนาดต่างๆ

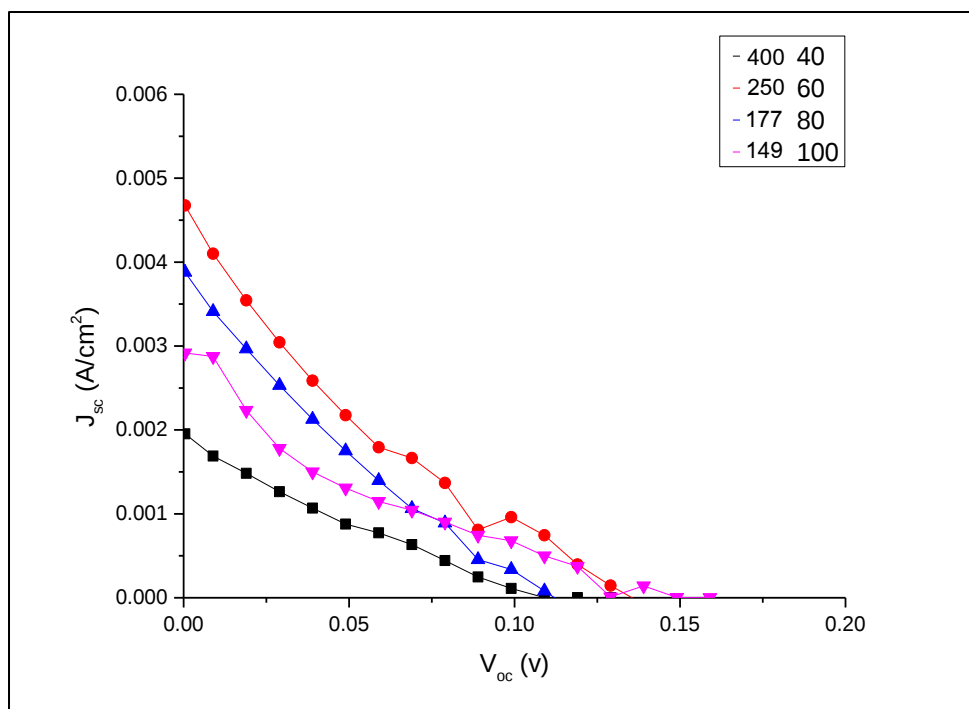
จากตารางที่ 4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25})$ มีประสิทธิภาพ 0.07 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{Sol})$ มีประสิทธิภาพ 0.03 เปอร์เซ็นต์ โดยชนิดของฟิล์ม TiO_2 ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ $\text{TiO}_2(\text{P25+Sol})$ ซึ่งเป็นการเคลือบชั้นฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{Sol})$ บนฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25})$ ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงถึง 0.11 เปอร์เซ็นต์ และยังให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ ในทุกขนาดตาข่ายสแตนเลส ซึ่งเป็นผลมาจากฟิล์มมีความหนาที่มากกว่า นอกจากนี้ยังมีการแทรกตัวของ $\text{TiO}_2(\text{Sol})$ เข้าไปในชั้นฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25})$ ทำให้มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังวงจรภายนอกได้ดีขึ้น [30]

4.5.2 ลักษณะแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด สีย้อมไวแสง

ในการทดลองนอกจากจะเตรียมฟิล์มที่ต่างชนิดกันแล้ว ยังมีขนาดตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาดต่างกัน คือ ขนาด 400 μm , 250 μm , 177 μm และ 149 μm จาก 4.5.1 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดีที่สุดคือ $\text{TiO}_2(\text{P25}+\text{Sol})$ เมื่อเปรียบเทียบขนาดตาข่ายสแตนเลสที่มีฟิล์ม $\text{TiO}_2(\text{P25}+\text{Sol})$ เคลือบต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 - 4.16



รูปที่ 4.15 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ

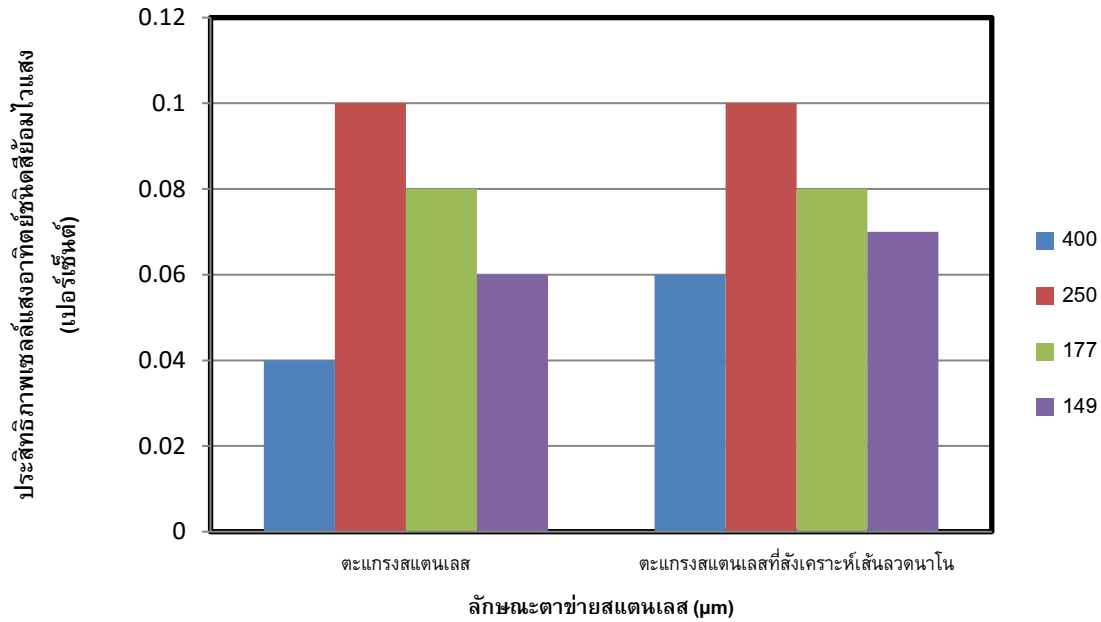


รูปที่ 4.16 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสขนาดต่างๆ ที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน

จากกราฟรูปที่ J-V 4.15 และ 4.16 คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η) ได้ดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , FF, V_{oc} และ ประสิทธิภาพ (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลส-ลักษณะต่างๆ

แผ่นรองรับ	ขนาดตาข่าย (μm)	J_{sc} (A cm^{-2})	$V_{(oc)}$	FF	$\eta\%$
ตาข่ายสแตนเลส	400	1.69×10^{-3}	0.12	0.19	0.04
	250	4.17×10^{-3}	0.15	0.19	0.10
	177	3.88×10^{-3}	0.11	0.20	0.08
	149	2.25×10^{-3}	0.16	0.18	0.06
ตาข่ายสแตนเลส ที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน	400	1.95×10^{-3}	0.13	0.18	0.06
	250	4.68×10^{-3}	0.13	0.19	0.11
	177	3.88×10^{-3}	0.11	0.20	0.08
	149	2.92×10^{-3}	0.16	0.15	0.07



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแท่งสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol) บนตาข่ายสแตนเลสลักษณะต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 ตาข่ายสแตนเลสขนาด 250 μm แสดงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงสุดถึง 0.11 เปอร์เซนต์ ทั้งแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส และแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโนที่เคลือบฟิล์ม TiO_2 (P25+Sol)

ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากขนาดของตาข่ายสแตนเลสที่เล็กลง ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น จึงมีปริมาณการยึดเกาะของ TiO_2 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

นอกจากนี้ขนาดที่แตกต่างกันของเส้นลวดสแตนเลสที่ใช้สานตาข่ายส่งผลต่อความต้านทาน [31] โดยอาศัยกฎของโอห์ม สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) สภาพต้านทาน (ρ) ความยาว (l) และ พื้นที่หน้าตัด (A) ตามสมการที่ 4.1

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4.1)$$

ดังนั้น ตาข่ายสแตนเลสที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยจะมีความต้านทานที่สูง ความสามารถในการนำไฟฟ้าทำได้ไม่ดีจากเหตุผลทั้งในเรื่องพื้นที่ผิวสัมผัสของปริมาณการเคลือบ TiO_2 และความต้านทาน พบว่าตาข่ายสแตนเลสที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแผ่นรองรับคือ ตาข่ายสแตนเลสขนาด 250 μm

เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส และแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน มีแนวโน้มด้านประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ที่ไม่ชัดเจน จึงยังไม่สามารถสรุปในเงื่อนไขนี้ได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากผลของการปรับเปลี่ยนแผ่นรองรับสำหรับโฟโตอิเล็กโทรด ในการทดลองได้ค่าประสิทธิภาพที่มากที่สุด คือ 0.11 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองใช้แผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสขนาด 250 μm เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล เคลือบบนไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ($\text{TiO}_2(\text{P25}+\text{Sol})$) โดยปัจจัยในการทดลองที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวคือ

1.1 ชนิดของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

1.2 ลักษณะแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส

2. ผลของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับในการทดลองนี้ ฟิล์มที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โซล-เจล เคลือบบนไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ($\text{TiO}_2(\text{P25}+\text{Sol})$) ให้ผลประสิทธิภาพที่มากที่สุด และยังให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าฟิล์มชนิดอื่น ในทุกลักษณะแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส

3. ผลของแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลส และแผ่นรองรับตาข่ายสแตนเลสที่สังเคราะห์เส้นลวดนาโน มีแนวโน้มด้านประสิทธิภาพของ DSSC ที่ไม่ชัดเจน จึงยังไม่สามารถสรุปในเงื่อนไขนี้ได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาสารยึดเกาะในการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมกับฐานรองรับโลหะเพื่อไม่ให้เกิดการแตกและได้ฟิล์มที่หนา ซึ่งจะลดความต้านทาน จึงน่าจะทำให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงขึ้นได้

2. ในการทดลองปรับเปลี่ยนแผ่นรองรับเป็นตาข่ายสแตนเลส นั้น ขั้นตอนการประกอบถือเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างยาก เนื่องจากตาข่ายสแตนเลสไม่ยึดติดได้ดีกับพาราฟิล์ม ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ จึงต้องใช้ความประณีตและความฝึกฝนก่อนการประกอบ เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาด

3. การติดพาราฟิล์มบางเกินไปเมื่อพาราฟิล์มหลอม ตาข่ายสแตนเลสจึงทะลุจากพาราฟิล์ม และชนกับขั้วของแพลทินัม และเมื่อเซลล์ทั้ง 2 ขั้วชนกันจะเกิดการลัดวงจรภายในเซลล์ จึงไม่ควรติดพาราฟิล์มที่บางจนเกินไป และควรทดสอบการลัดวงจรของเซลล์ก่อนนำไปทดสอบทุกครั้งด้วยมัลติมิเตอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Winich, Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs. J. M.ab. 2550, 1-2.
- [2] Chapin, K.R., Clarifying Kirk's confusion about quantum coherent solar cell physics via simple examples and analysis. *Physica B: Condensed Matter*, **423** (2013) 45-47.
- [3] Daibin Kuang, Jeremie Brillet, Peter Chen, Masakazu Takata, Satoshi Uchida, Hidetoshi Miura, Kohichi Sumioka, Shaik. M. Zakeeruddin, and Michael Graetzel, Application of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays in Flexible Dye-Sensitized Solar Cells, *ACS Nano* , 2:6 (2008) 1113–1116
- [4] บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร, การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม, วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2548.
- [5] Horn, M., Schwerdtfeger, C.F. and Meagher, E.P., Refinement of the Structure of Anatase at Several Temperatures, *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, 139 (1972) 273-281.
- [6] ดวงหทัย แก้วใส, การเตรียมผิวพื้นเคลือบด้วยความร้อนเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างนาโนต่างชนิด, วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2552.
- [7] “เข้าใจสแตนเลสไม่ยากอย่างที่คิด” [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://www.bloggang.com>[ม.ป.ป.]. สืบค้น 12 มกราคม 2558.
- [8] Funabiki, K., Sugiyama, N., Iida H., Ring-fluorinated fluorescein as an organic photosensitizer for dye-sensitized solar cells using nanocrystalline zinc oxide, *Journal of Fluorine Chemistry* **127**, (2006), 257-262.
- [9] วินิช พรหมอารักษ์ ทวีศักดิ์ สุดยอดสุข สายันต์ แสงสุวรรณ และ ทินกร แก้วอินทร์, เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, อุบลราชธานี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [10] Tennakonea, K., Bandaranayakea, P.K.M., Jayaweera, P.V.V., Konnob, A., Kumarab, G.R.T.A., Dye-sensitized composite semiconductor nanostructures, *Physica E* **14** (2002)190-196.
- [11] “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.kmutt.ac.th/hyae/> [ม.ป.ป.]. สืบค้น 12 มกราคม 2558.

- [12] ณรรตธร คงเจริญ, ผลของอิเล็กโทรไลต์เจลพอลิเมอร์ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าและเสถียรภาพในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งก็ออกไซด์, วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2555.
- [13] ดาวประกาย ทาน้อย, การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เพื่อผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2553.
- [14] หทัยทิพย์ พันธุ์ฤทธิ์ดำ, การสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยาง, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2556.
- [15] มงคล กองทุ่งมน, ผลของตัวแปรเชิงกายภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณของการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์, วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2556.
- [16] ปรศนี อินศรีจันทร์, การวิเคราะห์องค์ประกอบของดินตามแนวทางนิติวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน, วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2553.
- [17] “X-ray diffractometer XRD” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http:// www.mfu.ac.th](http://www.mfu.ac.th) [ม.ป.ป.] สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2557.
- [18] Michael Grätzel, Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, **4** (2003) 145–153.
- [19] T. Miyasaka, W. Aihara, and Y. Kijitori, Fabrication of large-size plastic film dye sensitized solar cells by binder-free nanocrystalline TiO_2 paste coating.
- [20] Kang, M.G., Park, N. G., Ryu, K. S., Chang, S. H., Kim, K. J., A 4.2% efficient flexible dye-sensitized TiO_2 solar cells using stainless steel substrate. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **90** (2006) 574–581.
- [21] Miyasaka, T., Ho, K.C., Lee, K.M., Chiu, W.H., Lu, M.D., Hsieh, W.F., Improvement on the long-term stability of flexible plastic dye-sensitized solar cells, **196** (2011) 8897–8903.
- [22] Onoda, K., Ngamsinlapasathian, S., Fujieda, T., Yoshikawa, S., The superiority of Ti plate as the substrate of dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **91** (2007) 1176–1181.
- [23] Fan, X., Wang, F., Chu, Z., Chen, L., Zhang, C., Zou, D., Conductive mesh based flexible dye-sensitized solar cells. *Applied Physics Letters*, **90**, 073501 (2007).

- [24] Lee, K.M., Wu, S.J., Chen, C.Y., Wu, C.G., Ikegami, M., Miyoshi, K., Miyasaka, T., Ho, K.C., Efficient and stable plastic dye-sensitized solar cells based on a high light-harvesting ruthenium sensitizer. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, **19**, 5009–5015.
- [25] Yen, W.H., Hsieh, C.C., Hung, C.Y., Wang, H.W., Tsui, M.C., Flexible TiO₂ Working Electrode for Dye-sensitized Solar Cells. *Journal of the Chinese Chemical Society*, **57** (2007), 1162-1166.
- [26] Eryta, S.R., Muliani, L., Hidayat, J., Shobih, Qibtiyah, M., Fabrication of plastic dye-sensitized solar cells prepared by blade coating. *Proceeding of ICSEEA* (2012) 69 – 72.
- [27] Tsai, T.H., Chiou, S.C., Chen, S.M., Enhancement of dye-sensitized solar cells by using graphene TiO₂ composites as photoelectrochemical working electrode. *Journal of Materials Chemistry*, **6** (2011), 3333 – 3343.
- [28] Prabakar, K., Son, M.K., Ludeman, D., Kim, H.J., Visible light enhanced TiO₂ thin film bilayer dye sensitized solar cells. *Thin Solid Films*, **519** (2010) 894–899.
- [29] วีระชัย แสงฉาย, นิพนธ์ มณีโชติ, ผลของอุณหภูมิการเผาผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยดัดด้วยเหล็กต่อ ลักษณะโครงสร้างและการฆ่าเชื้อ, วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา 2558.
- [30] Chen, Y., Stathatos, E., Dionysios, D., Sol-gel modified TiO₂ power films for high performance dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, **203** (2009) 192-198.
- [31] Fan, X., Wang, F., Chu, Z., Chen, L., Zhang, C., Zou, D., Conductive mesh based flexible dye-sensitized solar cells. *Applied Physics Letters*, **90**, 073501 (2007).

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ

- Suphaporn Daothong, Characterization of Fe_2O_3 Nanowires and its Solar Cell Applications, Key Engineering Materials, Vol. 766, pp 217-222, 2018.

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

การพัฒนาการเรียนการสอน ในการสร้างโจทย์ปัญหาพิเศษให้นักศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรี ฝึกฝนในการทำการทดลอง ทำวิจัย และสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ได้แก่

- น.ส.ภาณุภา ดวงดอก รหัส
หัวข้อ การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี
ย้อมไวแสง
- นายวุฒินัน ทาจิณะ
หัวข้อ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงบนวัสดุรองรับโลหะ

3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

- การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ ดังนี้

- การนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์
เรื่อง The effect of the oxygen source on TiO_2 nanowires formation
งานประชุมวิชาการ The 29th annual conference of the microscopy society of Thailand (MST29) 30 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2557.
- การนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์
เรื่อง Improved the performance of dye-sensitized solar cell by polyethylene glycol
งานประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2559.

- การนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์

เรื่อง The effect of metal substrates on dye-sensitized solar cells

งานประชุมวิชาการ The 9th science research conference วันที่ 25-26 พฤษภาคม 2560.

ภาคผนวก

Key Engineering Materials
ISSN: 1662-9795, Vol. 766, pp 217-222
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.766.217
© 2018 Trans Tech Publications, Switzerland

Submitted: 2017-09-15
Revised: 2017-11-30
Accepted: 2018-01-27
Online: 2018-04-13

Characterization of Fe₂O₃ Nanowires and its Solar Cell Applications

Suphaporn Daothong^{1,a,*}

¹Program in Materials Science, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

^asd.daothong@gmail.com

Keywords: Iron oxide, Nanowires, Thermal oxidation.

Abstract. Iron oxide nanowires were synthesized on stainless steel mesh substrate using the thermal oxidation process at the temperature of 750°C for 60 min. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The XRD pattern showed that the iron oxide nanowires exhibited the structure of alpha-Fe₂O₃ (hematite). SEM images indicated that the diameter of the nanowires were 80-285 nm. The dye-sensitized solar cell (DSSC) properties based on the nanowires substrate was also studied. It was found that the power conversion efficiency (η) of the device was 0.11%.

1. Introduction

Recently, the one-dimensional (1D) metal oxide nanostructures, including nanowires [1], nanoribbon [2], nanotubes [3], nanorods [4], nanoneedles[5] have attracted tremendous both in scientific and technological investigation because of their high aspect ratio and various potential applications such as chemical sensors, gas sensors [6], photodetectors [7], supercapacitors, smart windows [8], field emissions[9] and solar cell [10]. To get their superior functional properties, the 1D metal oxide nanostructures can be effectively synthesized by numerous methods e.g. sol-gel, hydrothermal, solvothermal, sonochemical, electrodeposition, template-assisted, template-free processes, plasma-assisted methods, chemical vapor deposition (CVD) and thermal evaporation [11].

The dye-sensitized solar cells (DSSCs) can be considered to be a promising the third generation photovoltaic devices [12]. With the superior advantages of inexpensive, facile construction, non-toxic as well as high conversion efficiency [13], thus, their researchs have been blooming for past few decades [14]. Many studies have been focusing on the optimization of the efficiency of DSSC. By using the difference novel 1D metal oxide nanostructures, including SnO₂ [15], ZnO [16], TiO₂ and etc. Among them, the TiO₂ is known as the best available choice materials for using as the working electrodes. To enhance the efficiency of the TiO₂ base working electrode, Wide-ranging explorations have been extensively studying on modification of morphologies and the structures. Also, doping or adding some Fe₂O₃ or another metal oxide to the TiO₂ structure for improving the specific surface area, the light scattering properties, the interface qualities, the electron transport and the charge-collection capabilities [17]. Previously research, the Fe₂O₃ nanostructures were directly grown on FTO, ITO glass substrate and Fe foil via the thermal oxidation method and were applied in the DSSC applications [18-21]. However, a few investigational studies are carried out on the modification of metal-based substrate before dipped or coated with TiO₂ and utilizing as the DSSC working electrode. Also, due to the Fe₂O₃ are low cost, safe and excellent chemical stability. Therefore, in this work, we showed the synthesis of Fe₂O₃ nanowires on the low-cost stainless-steel mesh substrates by the facile thermal oxidation process without the templates and gas source. With varying of mesh number of the stainless substrates, their Fe₂O₃ nanowire structures are systematically characterized. All the Fe₂O₃ nanowires based substrate were dipped with the TiO₂. Then the obtained samples were investigated the photovoltaic efficiency.

2. Experimental

2.1 Synthesis of Fe_2O_3 nanowires

The Fe_2O_3 nanowires were grown on the low-cost stainless mesh substrates with varying mesh number of 40, 60, 80 and 100. In the previous synthesis, all stainless meshes were cut to $1.0 \times 3.0 \text{ cm}^2$. Subsequently, the meshes were cleaned with detergent, acetone, ethanol, and de-ionized (DI) water in an ultrasound bath for 15 min and then dried at room temperature. After that, the cleaned samples were treated with the concentrated hydrofluoric acid (Ajax Finechem, 37%) in ultrasonic bath for 15 min, following washed with DI water several times and dried. These samples were thermally oxidized at the temperature 750°C for 60 min in the ambient condition. The structure and morphology of the achieved samples were examined by X-ray diffractometry (XRD, model Rigaku Miniflex II, X-ray source is Cu K-alpha) and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, model JEOL, JSM-6335F), respectively.

2.2 Fabrication of the DSSC working electrode

The working electrodes were prepared by the dipping of the Fe_2O_3 nanowires substrate in the TiO_2 solution (P25, Sigma-Aldrich, 99.5%) with the speed of 3 cm/min and fixed active area of $\sim 1 \text{ cm}^2$ for testing the DSSC performance. The obtained working electrodes were then annealed at 450°C for 1 h in ambient air. After annealing, the attained sample were soaked in the dye solution N719 for 24 h.

The counter electrode with the area of $0.2 \times 1.0 \text{ cm}^2$ were prepared by coating with a drop of platinum (Pt) solution, comprising the mixture of chloroplatinic acid (H_2PtCl_6 , Sigma-Aldrich, 37.5%) and acetone (Labscan, AR Grade) on a fluorine doped tin oxide (FTO) glass followed by heating at 450°C for 1 h.

The dye solution, the working electrode and the counter electrode were assembled into complete cell, sealed with parafilm spacer. The schematic represents of the assembly of the DSSC are shown in Figure 1. In the sealed assembly, an electrolyte solution comprising the 0.3 M LiI mixing with 0.03 M I_2 in 4-Tert-Butylpyridine was inserted into the open cell. The DSSC performance were investigated immediately by the use of simulated AM 1.5 sunlight illumination with light source power of 100 mW/cm^2 . The photocurrent and voltage data were recorded with a DC voltage-current source which was controlled by a computer[22].

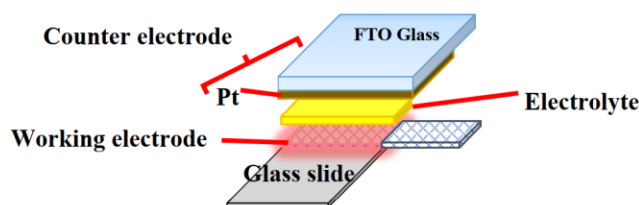


Figure 1 Assembly of the DSSC.

3. Results and Discussions

The morphology of nanowires on the stainless steel mesh number 40, 60, 80 and 100 were shown in Figure 2. The nanowires size of all samples were estimated the diameter of nanowires on the difference mesh number were presented in Figure 3. It is obviously seen that the mesh number 40, 60, 80 and 100, manufactured from the stainless steel wires with diameter of 170, 150, 115 and $100 \mu\text{m}$ [19] had the Fe_2O_3 nanowires with the average diameter of 218.15 ± 59.44 , 198.9 ± 59.40 , 121.61 ± 44.08 and 111.54 ± 27.19 , respectively. The smaller wires had a significant effect on the smaller grain or seed size of the stainless steel, which had an impact on their diameter of the nanowires. Therefore, the diameter of nanowires were decreased with a decreasing of stainless steel diameter. It could be said that this method had ability to produce the Fe_2O_3 nanowire structure with

well controlled the nanowires diameter by selecting the stainless steel number and a low-cost process.

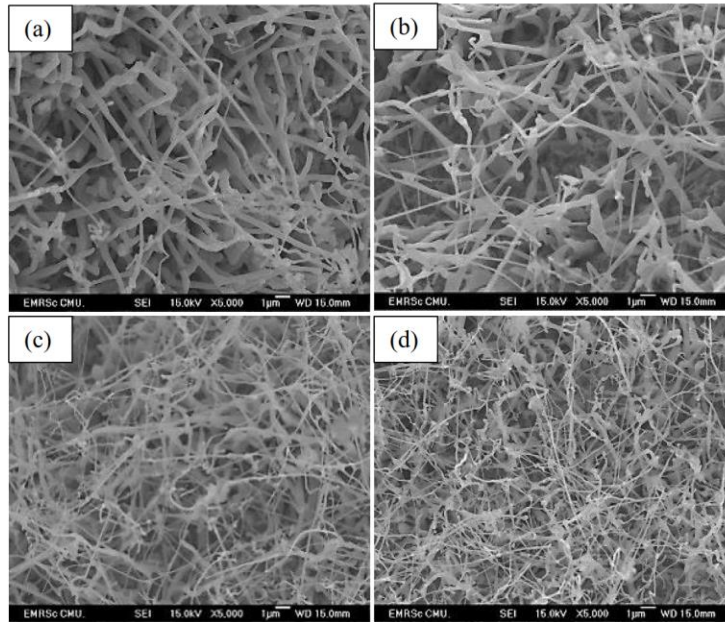


Figure 2 SEM images of nanowires growth on Mesh number (a) 40, (b) 60, (c) 80 and (d) 100.

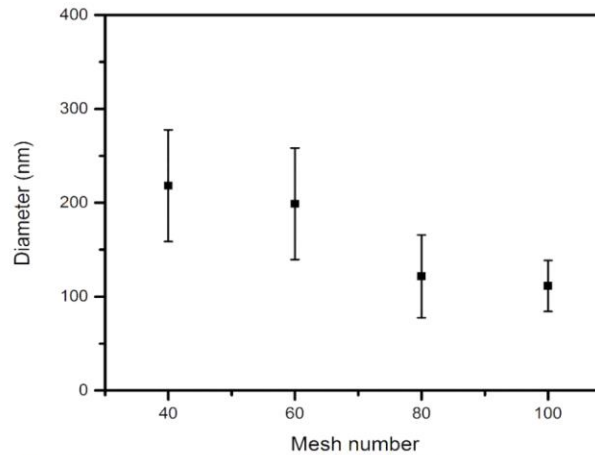
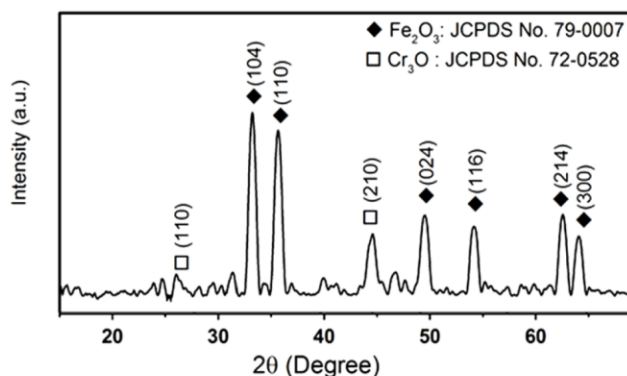


Figure 3 Diameter of Nanowires on the difference mesh number.

The XRD pattern of nanowires on the mesh number 60 was shown in Figure 4. The X-ray diffraction analysis was investigated in the range of angle (2θ) between 10° to 70° . It was found that the diffraction peaks related with crystalline phase of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (JCPDS card number 79-0007), and Cr_2O_3 (JCPDS card number 72-5028) from substrate, respectively.



Figures 4 X-ray diffraction (XRD) pattern of nanowires.

Table 1 Photovoltaic performance.

Mesh number	Jsc (A cm ⁻²)	V(oc)	FF	η%
40	1.95 x 10 ⁻³	0.13	0.18	0.04
60	4.68 x 10 ⁻³	0.13	0.19	0.11
80	3.88 x 10 ⁻³	0.11	0.20	0.08
100	2.92 x 10 ⁻³	0.16	0.15	0.07

The results of the DSSCs properties base on the Fe₂O₃ nanowires on difference mesh substrates can be observed in Table 1. The nanowires on mesh number 60 and 40 substrates were achieved the highest and the lowest efficiency value of 0.11% and 0.04%, respectively. It is seen that the efficiency ranging from 0.07% to 0.11% was still in a low region. This might be attributed to the large amount of Fe₂O₃ had the low carrier mobility and low optical absorption coefficient [20]. However, these efficiency values were higher than Fe₂O₃ nanowires, nanoflakes and film [21]. It should be noted that some work reported a high conversion efficiency value but with the use of TiO₂ or the FTO or ITO substrate or the modification counter electrode. Moreover, the wires mesh number 60 showed a relative high DSSC performance, which may be attributed to low the resistivity in the cross-section area of mesh. In this works, although the use of metal substrate limited the photovoltaic performance, the good quality Fe₂O₃ nanowire on the low-cost stainless steel could be achieved via a facile thermal oxidation method.

4. Summary

In summary, this study successfully synthesized the Fe₂O₃ nanowires on a low cost stainless mesh substrate by using the thermal oxidation method. The diameter of nanowires were decreased with decreasing of mesh wire diameter. Furthermore, the wires mesh number 60 showed a relative high DSSC performance, which achieved the optimum efficiency value as 0.11%.

5. Acknowledgements

This research was financially supported by the Thailand Research Fund (MRG5580076). The author gratefully acknowledges the Official Agricultural Research and Extension, Maejo University, Chiang Mai, Thailand and Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. Moreover, the author would like to thank: Miss Panukar Duangdok, Program in Materials Science, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. Asst. Prof. Dr. Supab Choopun and Dr. Kritsada Hongstith, Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.

References

- [1] E. Comini, Metal oxide nanowire chemical sensors: innovation and quality of life, *Materials Today*, 19 (2016) 559-567.
- [2] X. Gou, G. Wang, J. Yang, J. Park, D. Wexler, Chemical synthesis, characterisation and gas sensing performance of copper oxide nanoribbons, *Journal of Materials Chemistry*, 18 (2008) 965-969.
- [3] F. Riboni, N.T. Nguyen, S. So, P. Schmuki, Aligned metal oxide nanotube arrays: key-aspects of anodic TiO₂ nanotube formation and properties, *Nanoscale Horizons*, 1 (2016) 445-466.
- [4] H. Kloust, R. Zierold, J.-P. Merkl, C. Schmidtke, A. Feld, E. Pösel, A. Kornowski, K. Nielsch, H. Weller, Synthesis of Iron Oxide Nanorods Using a Template Mediated Approach, *Chemistry of Materials*, 27 (2015) 4914-4917.
- [5] P.M. Rao, X. Zheng, Rapid Catalyst-Free Flame Synthesis of Dense, Aligned α -Fe₂O₃ Nanoflake and CuO Nanoneedle Arrays, *Nano Letters*, 9 (2009) 3001-3006.
- [6] L.V. Thong, L.T.N. Loan, N. Van Hieu, Comparative study of gas sensor performance of SnO₂ nanowires and their hierarchical nanostructures, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 150 (2010) 112-119.
- [7] T. Zhai, X. Fang, M. Liao, X. Xu, H. Zeng, B. Yoshio, D. Golberg, A Comprehensive Review of One-Dimensional Metal-Oxide Nanostructure Photodetectors, *Sensors*, 9 (2009) 6504.
- [8] R.S. Devan, S.-Y. Gao, W.-D. Ho, J.-H. Lin, Y.-R. Ma, P.S. Patil, Y. Liou, Electrochromic properties of large-area and high-density arrays of transparent one-dimensional β -Ta₂O₅ nanorods on indium-tin-oxide thin-films, *Applied Physics Letters*, 98 (2011) 133117.
- [9] S.-Y. Kuo, H.-I. Lin, Field emission characteristics of zinc oxide nanowires synthesized by vapor-solid process, *Nanoscale Research Letters*, 9 (2014) 70-70.
- [10] R. Pietruszka, B.S. Witkowski, S. Gieraltowska, P. Caban, L. Wachnicki, E. Zielony, K. Gwozdz, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, M. Godlewski, New efficient solar cell structures based on zinc oxide nanorods, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 143 (2015) 99-104.
- [11] Y. Li, X.-Y. Yang, Y. Feng, Z.-Y. Yuan, B.-L. Su, One-Dimensional Metal Oxide Nanotubes, Nanowires, Nanoribbons, and Nanorods: Synthesis, Characterizations, Properties and Applications, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 37 (2012) 1-74.
- [12] M.Z.H. Khan, M.R. Al-Mamun, P.K. Halder, M.A. Aziz, Performance improvement of modified dye-sensitized solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71 (2017) 602-617.
- [13] R. Liu, Z. Sun, Y. Zhang, L. Xu, N. Li, Polyoxometalate-modified TiO₂ nanotube arrays photoanode materials for enhanced dye-sensitized solar cells, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 109 (2017) 64-69.
- [14] S.K. Balasingam, M.G. Kang, Y. Jun, Metal substrate based electrodes for flexible dye-sensitized solar cells: fabrication methods, progress and challenges, *Chemical Communications*, 49 (2013) 11457-11475.
- [15] S. Gubbala, H.B. Russell, H. Shah, B. Deb, J. Jasinski, H. Rypkema, M.K. Sunkara, Surface properties of SnO₂ nanowires for enhanced performance with dye-sensitized solar cells, *Energy & Environmental Science*, 2 (2009) 1302-1309.
- [16] D. Barpuzary, A.S. Patra, J.V. Vaghasiya, B.G. Solanki, S.S. Soni, M. Qureshi, Highly Efficient One-Dimensional ZnO Nanowire-Based Dye-Sensitized Solar Cell Using a Metal-Free, D- π -A-Type, Carbazole Derivative with More than 5% Power Conversion, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6 (2014) 12629-12639.

-
- [17] J. Fan, Z. Li, W. Zhou, Y. Miao, Y. Zhang, J. Hu, G. Shao, Dye-sensitized solar cells based on TiO₂ nanoparticles/nanobelts double-layered film with improved photovoltaic performance, *Applied Surface Science*, 319 (2014) 75-82.
- [18] P. Hiralal, S. Saremi-Yarahmadi, B.C. Bayer, H. Wang, S. Hofmann, K.G. Upul Wijayantha, G.A.J. Amaratunga, Nanostructured hematite photoelectrochemical electrodes prepared by the low temperature thermal oxidation of iron, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (2011) 1819-1825.
- [19] S.M. Bergin, Y.-H. Chen, A.R. Rathmell, P. Charbonneau, Z.-Y. Li, B.J. Wiley, The effect of nanowire length and diameter on the properties of transparent, conducting nanowire films, *Nanoscale*, 4 (2012) 1996-2004.
- [20] H. Niu, S. Zhang, Q. Ma, S. Qin, L. Wan, J. Xu, S. Miao, Dye-sensitized solar cells based on flower-shaped α -Fe₂O₃ as a photoanode and reduced graphene oxide-polyaniline composite as a counter electrode, *RSC Advances*, 3 (2013) 17228-17235.
- [21] N.M. Rashid, N. Kishi, T. Soga, Effects of nanostructures on iron oxide based dye sensitized solar cells fabricated on iron foils, *Materials Research Bulletin*, 77 (2016) 126-130.
- [22] K. Hongstith, N. Hongstith, D. Wongratanaphisan, A. Gardchareon, S. Phadungdhithidhada, P. Singjai, S. Choopun, Sparking deposited ZnO nanoparticles as double-layered photoelectrode in ZnO dye-sensitized solar cell, *Thin Solid Films*, 539 (2013) 260-266.