



การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
ด้วยกระบวนการสปาร์คเพื่อประยุกต์ใช้ในงานเซลล์แสงอาทิตย์

THE SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLE DEPOSITED TITANIUM DIOXIDE
NANOTUBES BY SPARKING PROCESS FOR SOLAR CELLS APPLICATION

พลอยหยก นาคปาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบนทองคำโนไทเทเนียมไดออกไซด์
ด้วยกระบวนการสปาร์คเพื่อประยุกต์ใช้ในงานเซลล์แสงอาทิตย์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLE DEPOSITED TITANIUM DIOXIDE
NANOTUBES BY SPARKING PROCESS FOR SOLAR CELLS APPLICATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Materials Science)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบนทองคำโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยกระบวนการสปาร์คเพื่อประยุกต์ใช้ในงานเซลล์แสงอาทิตย์

ของ

พลอยหยก นาคปาน

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารียา เข็มมณี)

(ศาสตราจารย์ ดร.นราธิป วิทยากร)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมาศ บิณฑจิตต์)

ชื่อเรื่อง	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบนทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการสปาร์คเพื่อประยุกต์ใช้ในงานเซลล์แสงอาทิตย์
ผู้วิจัย	พลอยหยก นาคปาน
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาริยา เขียมบุญ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ควบคุมการโตของทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยที่เงื่อนไขของค่าความต่างศักย์ในกระบวนการแอโนไดเซชันอยู่ในช่วง 5 โวลต์ ถึง 50 โวลต์ ที่ระยะเวลาต่างๆ และสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินด้วยเทคนิคสปาร์ค โดยที่ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดรอบในการสปาร์คจะแปรผันตามผลของขนาดอนุภาคนาโนเงินที่มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พร้อมด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและองค์ประกอบธาตุของตัวอย่าง โครงสร้างผลึกจะถูกพิจารณาด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) และเครื่อง UV-Vis Spectroscopy (UV-Vis) จะถูกใช้ศึกษาการก่อกำเนิดของอนุภาคนาโนเงินบนทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ของเครื่อง FE-SEM และ EDX ค้นพบว่า ค่าความต่างศักย์คงที่ (potentiostatically) ของแผ่นฟรอยด์ไทเทเนียมในกระบวนการแอโนไดเซชันอยู่ที่ 20 โวลต์ และระยะเวลาในการแอโนไดเซชันที่ 2 ชั่วโมง พบว่าผลิตทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีคุณลักษณะดี ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินด้วยการสปาร์ค โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบธาตุและโครงสร้างผลึกแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเงินตกสะสมบนทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นผลสำเร็จ โดยที่สมบัติการดูดกลืนทางแสงของอนุภาคนาโนเงินปรากฏพีคในช่วง 400 นาโนเมตร ถึง 460 นาโนเมตร ด้วยรอบการสปาร์คที่ 50 รอบ และ 75 รอบ

คำสำคัญ : กระบวนการแอโนไดเซชัน, เส้นผ่าศูนย์กลางของทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

Title	THE SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLE DEPOSITED TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES BY SPARKING PROCESS FOR SOLAR CELLS APPLICATION
Author	PLOIYOK NAKPAN
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Areeya Aeimbhu

The objectives of this research are as follows: (1) to control the growth of the titanium dioxide nanotube arrays using an anodization process. The anodization process performed on a DC potential range varying from 5-50 volts, and with various anodization times; and (2) to deposit silver nanoparticles via sparking technique. The sparking parameters, namely the spark cycle varied accordingly in order to identify the optimum conditions for the production of nanosized of silver. Field Emission Scanning Electron microscopy (FE-SEM) with Energy Dispersive X-ray Analysis (EDX) was used to examine the morphology and the elemental composition of the samples. The crystal phases were identified by X-ray diffraction (XRD). UV-Vis Spectroscopy (UV-Vis) was used to study the formation of silver nanoparticles on titanium dioxide nanotube arrays. From the FE-SEM and EDX results, the anodization of titanium foil was carried out at 20 volts and an anodization time of two hours was required to produce good quality titanium dioxide nanotube arrays. Following successive silver nanoparticles sparking, the microstructural, elemental composition and crystal structural analysis revealed that silver nanoparticles were deposited on titanium dioxide nanotube arrays. The silver nanoparticles possessed an optical spectrum with an absorption peak in the range of 400-460 nm with the 50-75 sparking cycles.

Keyword : Anodization process, Nanotubes Titanium oxide Tube diameter

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและช่วยเหลือในด้านวิชาการ การดำเนินงานวิจัยจากบุคคลทั้งหลายและสถานที่ในการทำวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารียา เขี่ยมมู่ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำดี ๆ เพื่อเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาลดระยะเวลาในการทำวิจัย อีกทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. นราธิป วิทยากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นประธานกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์และได้ให้คำแนะนำ แก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมาศ บินทจิตต์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์และได้ให้คำแนะนำ แก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยให้ความรู้ การสนับสนุนและคำแนะนำมาโดยตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนเครื่องมือประกอบงานวิจัยต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาลดการดำเนินงานวิจัย

พลอยหยก นาคปาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1. ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอนุภาคเงิน	14
3. เซลล์แสงอาทิตย์.....	18
4. Dye-sensitized solar cell: DSSC	20
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมและการตกตะกอนอนุภาคเงิน	23
ลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	23
9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ประยุกต์ใช้ใน DSSC ...	27

6. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	29
6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของไทเทเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิวมิสชัน (Field emission scanning electron microscopy: FESEM)	29
6.3 การทดสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction: XRD)	31
6.4 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคป (UV-VIS spectroscopy: UV-VIS)	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	36
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	36
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	37
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	38
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	39
4.1 กลไกการสังเคราะห์ TNAs โดยใช้ Anodization Process	39
4.2 ผลของการสังเคราะห์ที่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน	40
4.3 ผลการวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่าง เวลา กับ ในระหว่างกระบวนการแอโนไดเซชัน ...	43
4.4 ผลลัพธ์ของการสังเคราะห์ที่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคเงินนาโนโดยใช้ กระบวนการสปาร์ค	44
4.5 ทดสอบปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เทคนิค Energy dispersive X-ray Spectroscopy (EDS).....	46
4.6 วิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่างๆในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโน โดยใช้เทคนิค Energy dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)	48
4.7 ศึกษาโครงสร้างผลึกของ TNAs และ Ag@TNAs โดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD)	51

4.8 ศึกษาสมบัติทางแสงของ TNAs และ Ag@TNAs ด้วยเทคนิค UV-Vis-NIR spectrophotometer (UV-Vis)	55
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	58
บรรณานุกรม	60
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
ตาราง 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียม ณ เวลาและค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน.....	43
ตาราง 3 เปรียบเทียบปริมาณธาตุในท่อนาโนไทเทเนียม	46
ตาราง 4 เปรียบเทียบปริมาณธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมที่เจือด้วยอนุภาคเงินนาโน	49



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
ภาพประกอบ 2 แถบช่องว่างพลังงานของวัสดุ	8
ภาพประกอบ 3 ลักษณะการทำงานของอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน.....	9
ภาพประกอบ 4 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์	10
ภาพประกอบ 5 อุปกรณ์ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียมด้วย Anodization Process	13
ภาพประกอบ 6 กลไกหลักในการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	14
ภาพประกอบ 7 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ทางแสง เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance: SPR).....	15
ภาพประกอบ 8 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคโลหะนาโนของโลหะชนิดต่างๆ	16
ภาพประกอบ 9 การเตรียมการสังเคราะห์ด้วยวิธีการสปาร์ค	17
ภาพประกอบ 10 หลักการเกิดสปาร์คอนุภาคนาโน.....	18
ภาพประกอบ 11 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบของ DSSC	20
ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวดิมิสชัน	29
ภาพประกอบ 14 สัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่าง	30
ภาพประกอบ 15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	32
ภาพประกอบ 16 ระดับพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลถูกกระตุ้นเมื่อได้รับพลังงาน	33
ภาพประกอบ 17 ส่วนประกอบของเครื่องยวี่-วิสิเบิลสเปกโทรสโคป	35
ภาพประกอบ 18 ผลการวิเคราะห์แผ่นฟรอมด์ TiO_2 โดยใช้กำลังขยายที่ 10,000 เท่า.....	40
ภาพประกอบ 19 ผลการวิเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ค่าความต่างศักย์ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 โวลต์ ด้วย FESEM โดยกำลังขยายที่ 100,000 เท่า	42

ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ ความหนาแน่นของกระแสที่ให้ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน	44
ภาพประกอบ 21 ผลการวิเคราะห์อนุภาคเงินนาโนที่สพาร์ค 25, 50, 75 และ 100 รอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายที่ 100,000 เท่า	45
ภาพประกอบ 22 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเงินนาโนสพาร์คที่ 25, 50, 75, 100 รอบ	45
ภาพประกอบ 23 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลา a) 30 และ b) 60 นาที ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping	47
ภาพประกอบ 24 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลา c) 120 นาที ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping	48
ภาพประกอบ 25 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนที่สพาร์ค a) 25 รอบ ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping	49
ภาพประกอบ 26 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนที่สพาร์ค b) 50 และ c) 75 รอบ ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping.....	50
ภาพประกอบ 27 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนที่สพาร์ค d) 100 รอบ ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping	51
ภาพประกอบ 28 ข้อมูลอ้างอิงแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ .52	
ภาพประกอบ 29 ข้อมูลอ้างอิงแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านการอบที่ 450°.....	53
ภาพประกอบ 30 ข้อมูลอ้างอิงแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโน	53
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อน/หลังผ่านการอบที่ 450° และเจือด้วยอนุภาคเงินนาโน	54
ภาพประกอบ 32 ภาพแสดงผลช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	55
ภาพประกอบ 33 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 25 รอบ	56

ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 50 รอบ.....	56
ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 75 รอบ.....	57
ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 100 รอบ.....	57



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

Titanium dioxide, TiO_2 นำมาอย่างแพร่หลาย เช่น การทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไว (O'Regan;&Grätzel. 1991; Grätzel. 2005) ตัวตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensors) (Peng; et al. 2007) ไฮโดรเจนเซ็นเซอร์ (Hydrogen sensors) (Paulose; et al. 2006) และการสลายโมเลกุลของน้ำ (Water photolysis) (Mor; et al. 2005) เพราะความมากมายของโครงสร้างระดับนาโน ความเสถียรทางเคมีและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี (Chandrasekharan;&Kamat. 2000; Park;Kim;&Bard. 2006; Wu; et al. 2008; Chu; et al. 2008) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงได้ดี

ในปี ค.ศ.1999 มีการศึกษาสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน (Anodisation process) (Zwilling;Aucouturier;&Darque-Ceretti. 1999) พบว่าสามารถสังเคราะห์โครงสร้างท่อนาโนที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์อื่นๆ เช่น วิธีโซล-เจล (Sol-gel method) (Flores; et al. 2007) วิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) (Tian; et al. 2003) และวิธีไฮโดรเทอร์มอลเทคนิค (Hydrothermal techniques) (Kasuga; et al. 1998) นอกจากนี้รูปร่างของท่อสามารถปรับให้เหมาะสมตามการนำไปใช้ โดยการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ใช้ ซึ่งกระบวนการทำได้ง่าย โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่หลากหลาย ทั้งแบบมีและไม่มีฟลูออรีนไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ (Su;&Zhou. 2011; Ghicov;&Schmuki. 2009; Adriana;María;&Cecilia Cuevas. 2011)

สารกึ่งตัวนำใน Dye-sensitized solar cell เนื่องจากสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มแรกการสังเคราะห์ไทเทเนียมจะมีโครงสร้างเป็นแผ่นฟิล์มบาง แต่เนื่องจากมักพบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว คือมีปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ จึงเกิดการพัฒนารูปแบบใหม่ โดยปรับเปลี่ยนจากรูปทรงแบบแผ่นให้มีรูปทรงเป็นท่อ แนวคิดดังกล่าวทำให้สามารถลดพื้นที่ในการปิดผนึกรอบเซลล์ได้ค่อนข้างมาก เนื่องจากมีการปิดผนึกเฉพาะ บริเวณปลายท่อเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้เซลล์แบบแผ่นที่จะต้องปิดผนึกรอบแผ่น ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการรั่วซึมได้ นอกจากนี้เซลล์แบบท่อมีข้อดีคือสามารถรับแสงได้ดีในทุกทิศทางจึงไม่ต้องการหมุนแผงตาม มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์เหมือนในกรณีที่เป็นแผงแบบแผ่นและหากเกิดการชำรุดก็สามารถซ่อมบำรุงแบบแยกชิ้นได้

(Rungnapa; et al. 2006) ต่อมาการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้สามารถบรรจุท่อนาโนไทเทเนียมที่มีปริมาณมาก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืน จึงกล่าวได้ว่าฐานของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสำคัญอย่างมาก (Park; et al. 2009; Yongbon-dong; et al. 2010; Hore; et al. 2006) โดยที่สมบัติของไทเทเนียม สามารถแปลงพลังงาน ร้อยละ 33 แต่งานวิจัยที่ผ่านมาการสังเคราะห์ฐานของ Dye-sensitized solar cell ที่สร้างขึ้นด้วยไทเทเนียมมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Conversion efficiency) ที่ ร้อยละ 11.3 (Fuke; et al. 2009; Xu; et al. 2010) เพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Conversion efficiency) นี้ให้สูงขึ้น โดยการศึกษาชั้นที่รับแสง (Photoelectrode) หรือชั้นแอโนด เช่น การปรับปรุงแถบพลังงานว่าง การศึกษาลักษณะของรูพรุนของท่อ (Tang; et al. 2010; Nair; et al. 2011) ความยาวของท่อนาโนที่เหมาะสมของ Dye-sensitized solar cell คือ ประมาณ 30 ไมโครเมตร (Sun; et al. 2010) การแพร่ของอิเล็กตรอนในท่อที่มีความยาวประมาณ 100 ไมโครเมตร ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นฐานใน Dye-sensitized solar cell (Jennings; et al. 2008) และศึกษาการเจืออนุภาคเงินลงบน TNAs เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนในช่วงที่กว้างขึ้นหรือช่วงคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็น ซึ่งคิดเป็น 43 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ดวงอาทิตย์ปล่อยออกมาต่อวัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อทำให้เกิดการแทรกสอดของอิเล็กตรอนในชั้นแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ขึ้น ซึ่งการแทรกสอดนี้เป็นปรากฏการณ์ทางแสงที่ถูกเรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance: SPR) โดยที่ปรากฏการณ์นี้จะเพิ่มช่วงการดูดกลืนพลังงานแสงให้กว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงแบบเดิม (Zhu; et al. 2007)

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อสังเคราะห์ TNAs ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน
2. เพื่อศึกษากระบวนการสปาร์คอนุภาคนาโนลงบน TNAs
3. เพื่อศึกษาการนำ TNAs ที่ผ่านกระบวนการสปาร์คอนุภาคนาโนลงบน TNAs เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

ขอบเขตของการวิจัย

1. สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน
2. สังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบนผิวของ TNT ด้วยวิธีการสปาร์ค

3. ศึกษาลักษณะพื้นฐานของ TNT และ TNT ที่ผ่านการตกตะกอนของอนุภาคเงิน
4. ศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD)
5. การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล สเปกโทรสโคป (UV-Vis Spectroscopy: UV-Vis)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน
2. สังเคราะห์อนุภาคนาโนลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการสปาร์คเพื่อเก็บข้อมูลนำไปประยุกต์ใช้ในงานเซลล์แสงอาทิตย์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการทำงานวิจัยนี้ ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์

- 1.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.2 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ
- 1.3 การดูดกลืนแสง
- 1.4 กลไกของการก่อตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอนุภาคเงิน

2.1 ปรากฏการณ์ทางแสง เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance: SPR)

- 2.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินด้วยกระบวนการสปาร์ค

3. เซลล์แสงอาทิตย์

- 3.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3.2 หลักการทำงานของ Solar Cell

4. Dye-sensitized solar cell: DSSC

- 4.1 DSSC มีองค์ประกอบ
- 4.2 กลไกการทำงานของ DSSC
- 4.3 การปรับปรุงคุณภาพ DSSC

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมและการตกตะกอนอนุภาคเงินลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

6. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

- 6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของไทเทเนียม
- 6.2 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS
- 6.3 การทดสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

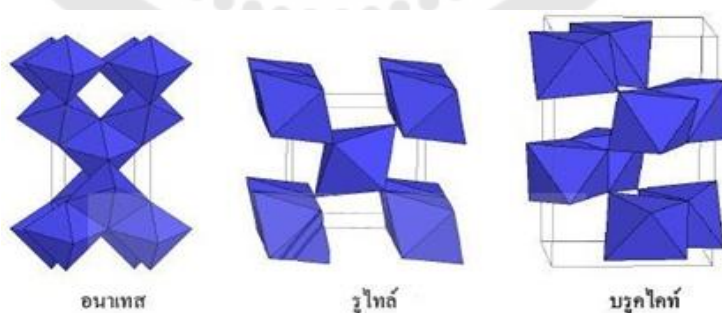
6.4 การทดสอบการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบิลสเปกโทรสโคป

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์

TiO_2 หรือ อีกชื่อเรียกหนึ่งคือ ไทเทเนีย (Titania) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรกของตารางธาตุ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์นี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะไทเทเนียมซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันกับออกซิเจน ไทเทเนียมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากสมบัติต่างๆ เช่น เป็นโลหะที่มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าโลหะชนิดอื่น มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีจุดเดือดที่ 2,500 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 1,830 องศาเซลเซียส (Abdelmoula. 2011)

1.1 โครงสร้างผลึก TiO_2

สามารถแบ่งตามโครงสร้างผลึกมี 3 เฟส ดังนี้ รูไทล์ (Rutile) บรูคไคล์ (Brookite) และอานาเทส (Anatase) ทุกโครงสร้างประกอบจากรูปทรงแปดหน้า มีจำนวนอะตอมไทเทเนียม 1 อะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน 6 อะตอม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1 (Natda. 2008) ผลึกของ anatase และ rutile พบอยู่ในรูปของเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนบรูคไคล์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ดังแสดงในตารางที่ 1 (Aakkarin. 2014; Diebold. 2003)



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: (Aakkarin. 2014)

โดยปกติจะพบไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบอานาเทสและรูไทล์ โดยที่โครงสร้างผลึกแบบอานาเทสสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปเป็นแบบรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกแบบอานาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ในการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสง เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบอานาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ นอกจากนี้โครงสร้างแบบ anatase สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำทำให้พื้นผิวมีไฮดรอกซิลเรดิคัลมากกว่า ซึ่งสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มาก สำหรับแถบช่องว่างของพลังงานนั้นโครงสร้างผลึกแบบ anatase และ rutile นั้นมีขนาดเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวล (eV) ทำให้โครงสร้างผลึกแบบอานาเทสและรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพในการเป็น photocatalysis นอกจากนี้โครงสร้างผลึกแบบ anatase ยังมีความสามารถในการดูดซับผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบ rutile (Panritdam. 2556)

ตาราง 1 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

ชื่อโครงสร้างผลึก			อานาเทส (Anatase)			
องค์ประกอบธาตุ			TiO ₂			
ระบบของโครงสร้างผลึก			เตตระโกนอล (Tetragonal)			
อุณหภูมิ (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			3.7842(13)	3.7842(13)	9.5146(15)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
ปริมาตรหน่วยเซลล์			136.3			
D _x (g/cm ³)			3.89			
กลุ่มปริภูมิ			P4 ₂ /mnm (No. 141)			
อะตอม	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	4a	1	0	0	0	0.390(63)
O	8e	1	0	0	0.2081(2)	0.613(90)

ตาราง 1 (ต่อ)

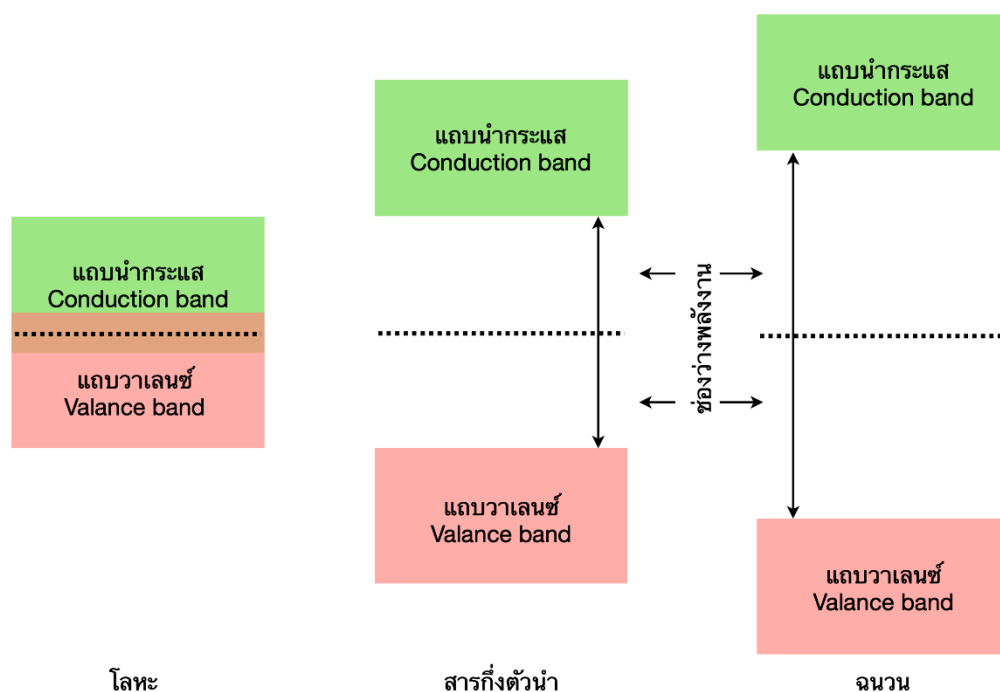
ชื่อโครงสร้างผลึก			รูไทล์ (Rutile)			
องค์ประกอบธาตุ			TiO ₂			
ระบบของโครงสร้างผลึก			เตตระโกนอล (Tetragonal)			
อุณหภูมิ (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			4.593(2)	4.593(2)	2.959(2)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
ปริมาตรหน่วยเซลล์			62.42			
D _x (g/cm ³)			4.25			
กลุ่มปริภูมิ			P4 ₂ /mnm (No. 136)			
อะตอม	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	2a	1	0	0	0	0.42(6)
O	4f	1	0.3051(7)	0.3051(7)	0	0.6(6)

ชื่อโครงสร้างผลึก			บรูคไคล์ (Brookite)			
องค์ประกอบธาตุ			TiO ₂			
ระบบของโครงสร้างผลึก			ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)			
อุณหภูมิ (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			9.174(2)	5.449(2)	5.138(2)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
ปริมาตรหน่วยเซลล์			257			
D _x (g/cm ³)			4.13			
กลุ่มปริภูมิ			Pbca (No. 61)			
อะตอม	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	8c	1	0.1289(1)	0.0972(1)	0.8628(1)	0.37(3)
O1	8c	1	0.0095(4)	0.1491(5)	0.1835(5)	0.46(6)
O2	8c	1	0.2314(4)	0.1110(4)	0.5366(6)	0.53(7)

ที่มา: (Meagher;&Lager. 1979)

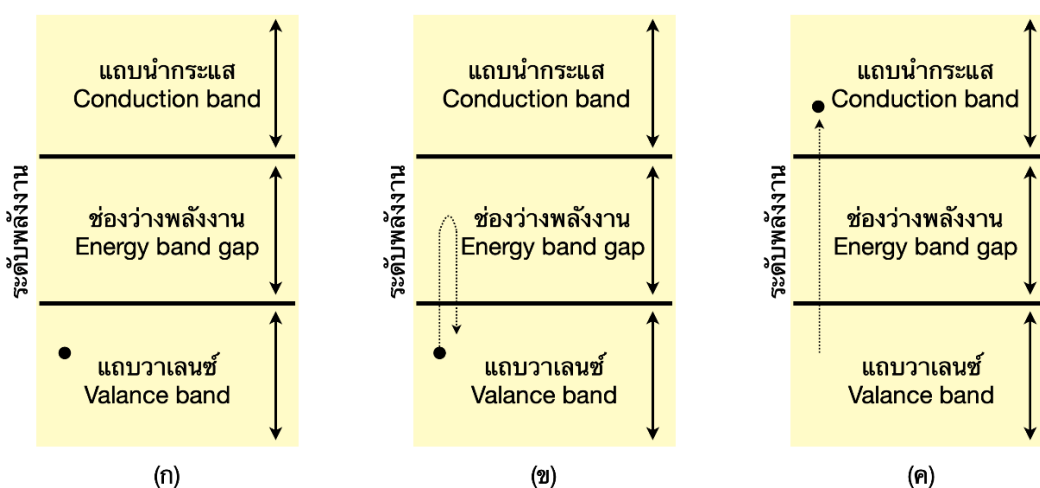
1.2 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าของผลึกของแข็งสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองระดับพลังงาน หรือที่เรียกว่า “ทฤษฎีแถบพลังงาน” ตามทฤษฎีสามารถแบ่งแถบพลังงานได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 แถบพลังงานต่ำ มีชื่อเรียกว่า “แถบวาเลนซ์” (Valance band) โดยในแถบพลังงานนี้ เป็นแบบยึดเหนี่ยว ซึ่งถูกยึดไว้โดยอะตอมใดๆ จึงกล่าวได้ว่า e^- คือ แถบช่องว่างพลังงาน หรือช่วงที่ 2 โดย gap นี้อยู่ระหว่างวงโคจรวาเลนซ์กับภายนอกอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบอะตอมเป็นวงโคจร และอิเล็กตรอนอยู่ ณ วงโคจรใดๆ ดังนั้นอิเล็กตรอนใดๆ จึงไม่สามารถเข้ามาอยู่ภายในแถบช่องว่างพลังงานได้จึงเกิดเป็นช่องว่างของพลังงานขึ้น ในช่วงที่ 3 เป็นแถบพลังงานสูง เรียกว่า “แถบนำกระแส” (Conduction band) electron ที่อยู่ ณ แถบพลังงานนี้เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากจนสามารถหลุดออกจากการยึดเหนี่ยวของอะตอมและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ จึงกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอน ณ แถบนำกระแสมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวต่ำมากและมีพลังงานจลน์สูง หากทำการกระตุ้นด้วยพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ (Nattaya. 2016) แถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ เป็นดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แถบช่องว่างพลังงานของวัสดุ

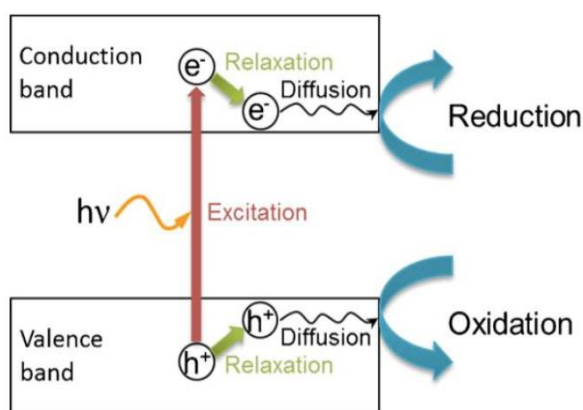
แถบพลังงาน insulation semiconductor และ conductor ตามลำดับ โดยในภาพประกอบที่ 3 (ก) จำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ให้พลังงานแก่ แต่อย่างไรก็ตามหากพลังงานที่ได้รับไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างของพลังงานได้ electron จะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับออกสู่ระดับพลังงานเดิม ในภาพต่อมาภาพประกอบที่ 3 (ค) energy เพียงพอจะทำให้สามารถข้ามผ่านช่องว่างของพลังงานได้ จะพบว่าอิเล็กตรอนเกิดพลังงานเข้าสู่แถบนำกระแส และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น จากภาพประกอบที่ 2 (โลหะ) จะเห็นได้ว่าแถบพลังงานของตัวนำ แถบวาเลนซ์และแถบนำกระแสมีความเหลื่อมล้ำกันอยู่ อีกทั้งยังไม่มีช่องว่างพลังงาน ดังนั้น e^- บางส่วนของแถบวาเลนซ์จึงเป็น e^- ในแถบนำกระแสด้วย โดยอิเล็กตรอนกลุ่มนี้จะพร้อมที่จะเคลื่อนที่ไประดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าวัสดุประเภทตัวนำ (โลหะ) มีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ง่าย ช่องว่างพลังงานกว้างมาก การที่จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้นั้นจำเป็นต้องให้พลังงานที่สูงมากจึงจะเกิดขึ้นได้ เช่น อากาศต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 30 กิโลโวลต์ ถึง 50 กิโลโวลต์ จึงจะทำให้เกิดกระแส ในวัตถุแข็ง โดยแรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) จะเป็นตัวทำให้จำนวนเกิดการนำกระแสและสูญเสียสภาพดั้งเดิมของของแข็งไปเมื่อเลิกนำกระแสแล้ว ในกรณีนี้มักเกิดขึ้นเมื่อมีฟ้าผ่าบริเวณใกล้กับเสาไฟฟ้า (อนุรักษณานท์.)



ภาพประกอบ 3 ลักษณะการทำงานของอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน

หลักการของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ semiconductor คือ อะตอมที่ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีความใกล้เคียงกับฉนวนในสถานะที่ยังไม่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานใดๆ อิเล็กตรอนจะอยู่ในช่วงของแถบวาเลนซ์ในสภาวะปกติสารกึ่งตัวนำจึงไม่

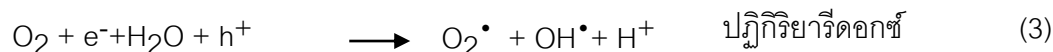
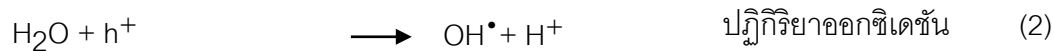
นำไฟฟ้าหรือมีสภาพเป็นฉนวน แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ามีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ให้เข้าไป สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปยัง แถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล จะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: (Nakata;&Fujishima. 2012)

ปฏิกิริยาแถบวาเลนซ์ ซึ่งมีโฮลอยู่ หมายถึง อิเล็กตรอนจากสารละลายหรือ ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) จะเคลื่อนไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ จะเกิด Oxidation โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำและ OH^- เกิดเป็นHydroxyl radical: $\text{OH}^\bullet$ ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) สามารถย่อยสลาย organic ชนิดต่างๆได้อีก ทางด้าน หนึ่งปฏิกิริยาที่เกิดที่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเจน (O_2) ที่ถูกดูดซับจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นไฮดรอกไซด์เปอร์ออกไซด์ ($\text{HO}_2^\bullet$) ในน้ำ ถ้า ($\text{HO}_2^\bullet$) รวมกันผลที่ได้คือHydrogen peroxide และออกซิเจน (O_2) ซึ่ง Hydrogen peroxide ละลายไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้ (Bessekhouad;Robert;&Weber. 2003; Natda. 2012) ซึ่งสามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเป็นดังนี้



1.3 การดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงเป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่จุดต่ำสุดของแถบนำกระแส ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Fundamental absorption) และเรียกตำแหน่งหรือความยาวคลื่นแสงของสเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงว่า Absorption edge การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก จึงต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานโดยให้เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (Wave number: k) ของ อิเล็กตรอน โดยโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$) ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่อะกิบพลังงานหนึ่งในลักษณะมีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นแต่ความแตกต่างของระดับพลังงานก่อนและหลังเปลี่ยนสถานะนั้นจะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่ดูดกลืน โดยเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน และเมื่อมีก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเรียกกฎนี้ว่ากฎอนุรักษ์โมเมนตัม

การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำเกิดจากที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่อะกิบนำกระแสได้ 2 ลักษณะ

1. Direct absorption เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่โมเมนตัมของอิเล็กตรอนของอิเล็กตรอนก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะไม่มีการปรับเปลี่ยน กล่าวคือไม่มีเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันของเลขคลื่นของอิเล็กตรอนเป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ณ ตำแหน่ง $k = 0$ และจุดต่ำสุดของแถบนำกระแส ณ ตำแหน่ง $k = 0$

2. Indirect absorption เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบนำกระแส โดยมีฟังก์ชันของเลขคลื่น k เปลี่ยน การดูดกลืนแสง

แบบนี้เป็นไปได้โดยให้อิเล็กตรอนรับหรือคายพลังงานโฟตอนเพื่อช่วยให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎอนุรักษ์โมเมนตัม ดังสมการต่อไปนี้

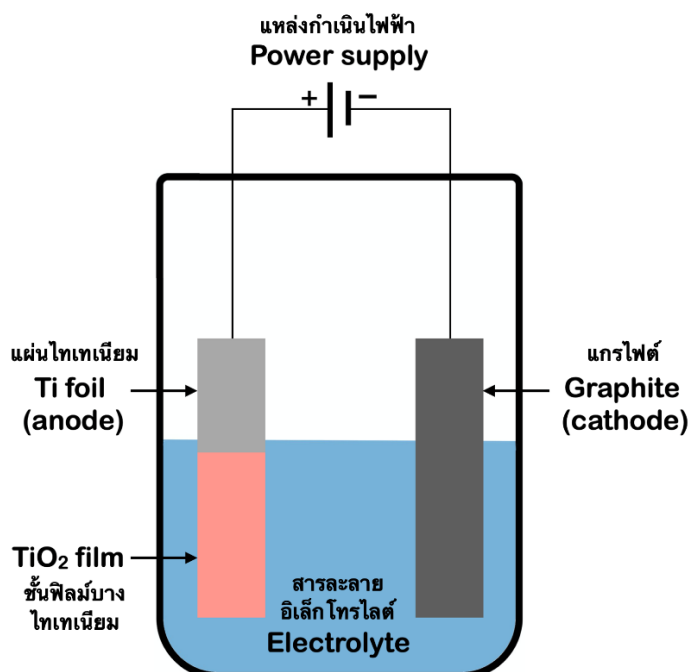
$$k_{CB} = k_{VB} \pm K_{\text{phonon}} \quad : \text{กฎอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (4)$$

$$\hbar\omega = E_g \pm \hbar\Omega \quad : \text{กฎอนุรักษ์พลังงาน} \quad (5)$$

1.4 กลไกของการก่อตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

โครงสร้างระดับนาโนของไทเทเนียมมีหลายแบบ ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติของ TiO_2 แตกต่างกัน ยกตัวอย่าง เส้นลวดนาโน (Nanowire) มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงมีทิศทางการเติบโตอย่างจำเพาะ ทางด้านข้างและเติบโตในแนวตั้ง แท่งนาโน (Nanorod) จะมีลักษณะโครงสร้างและการเติบโตเหมือนลวดนาโน แต่มีความยาวที่สั้นกว่าท่อนาโน (Nanotube) มีโครงสร้างแบบ 1 มิติ กลวงภายในมีลักษณะเหมือนท่อเข็มขัดนาโนหรือนาโนริบบอน (Nanobelt หรือ Nanoribbon) มีโครงสร้าง 1 มิติ โดยด้านข้างแบนเหลี่ยม Nanostructured (Chonlada. 2012) จำนวนอะตอมบริเวณผิวหน้าและสัมผัสของวัสดุเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุมีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแม่เหล็กและสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Bulk materials) โครงสร้างท่อนาโนไทเทเนียมขนถ่ายอิเล็กตรอนได้ดีภายในท่อนาโนเพราะอิเล็กตรอนและโฮล ภายในโครงสร้างท่อเคลื่อนที่ได้สะดวกและเร็วขึ้น

Anodization Process วิธีทางเคมีไฟฟ้า (Fu; et al. 2009) ที่เปลี่ยนสภาพพื้นผิวของโลหะ โดยการทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวโลหะ สร้างชั้นออกไซด์ที่พื้นผิวของโลหะ ชั้นออกไซด์ที่ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ระยะเวลาในการทำแอโนไดซ์กับกระแสไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ที่แตกต่างไป วิธีนี้จะใช้ Electrochemical cell ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด ขั้วบวกหรือขั้วแอโนด (Anode) หรือแผ่นไทเทเนียม และขั้วลบหรือขั้วแคโทด (Cathode) และไอออนเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในสารละลาย ดังแสดงในภาพประกอบ 5

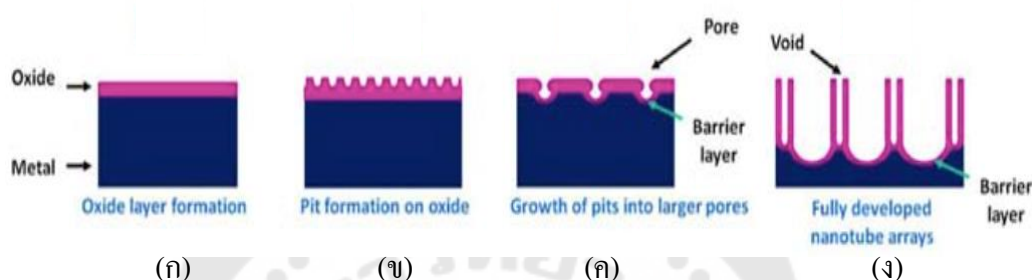


ภาพประกอบ 5 อุปกรณ์ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียมด้วย Anodization Process

หลักการ Anodization Process หรือแอโนดิก ออกซิเดชัน (Anodic oxidation) ของโลหะไทเทเนียม การทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า เกิดชั้นออกไซด์ที่เสถียรและมีรูพรุนขนาดเล็กมาเคลือบบนผิวของโลหะ อาจเรียกว่า วิธีเคลือบผิวโดยใช้ไฟฟ้า ในขณะที่ทำแอโนไดซ์ ไอออนบวกวิ่งเข้าหาขั้วแคโทดและเกิด reduction ที่ขั้วแคโทด ที่ขั้วแอโนดจะเกิดoxidation โดยไอออนลบที่วิ่งเข้าหาขั้วแอโนด เกิดเป็นออกไซด์เคลือบอยู่บนผิวของโลหะไทเทเนียม กลไกการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขั้วแอโนด แบ่ง 4 ขั้นตอน คือ

1. การเกิดชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบอยู่ที่ผิวของโลหะหลังจากที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 6(ก)
2. การเกิดรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วไป บนชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากภาวะการละลาย ไทเทเนียมจากการกัดเซาะของอนุภาคขนาดเล็กของฟลูออไรด์ไอออนจากอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 6(ข)
3. ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ขณะเกิดกระบวนการแอโนไดเซชัน เกิดการสร้างและสลายตัวของชั้นออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้รูพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิวของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 กลายเป็นรูที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 6(ค)

4. ใน Anodization Process แบบให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ระบบจะพยายามปรับตัวเข้าสู่สมดุล โดยชั้นออกไซด์กั้นขวาง (Barrier oxide layer) จะมีค่าคงที่หรือหนาเท่ากันทั่วพื้นผิวที่ถูก แอโนไดซ์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและการละลายก็จะเป็นไปอย่างสมดุลด้วยการเติบโตเป็นท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเท่ากันกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิว ดังแสดงในภาพประกอบ 6(ง)



ภาพประกอบ 6 กลไกหลักในการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: (Sorachon. 2011)

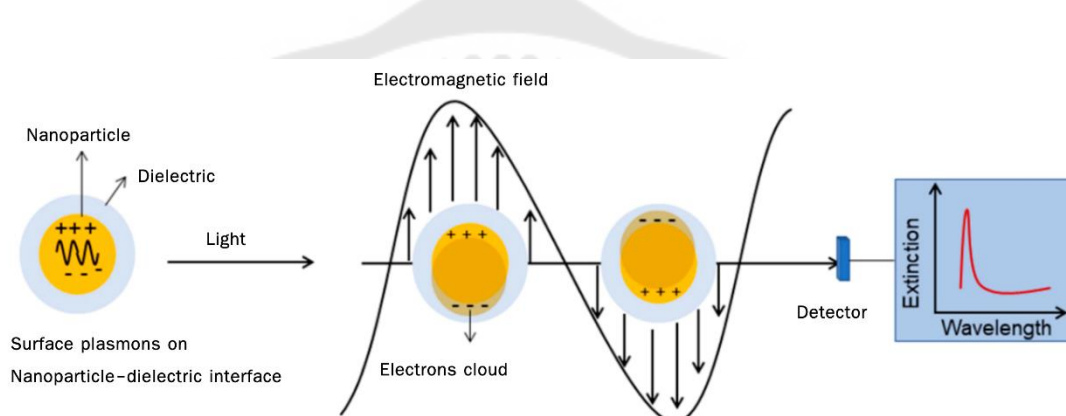
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอนุภาคเงิน

อนุภาคเงินนาโน คือ อนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก (1 นาโนเมตร : เศษ 1 ส่วน 1 พันล้านของหน่วยเมตร) จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จะเห็นเพียงตัวกลาง หรือเรียกว่า Medium ที่มีอนุภาคเงินนาโนกระจายตัวอยู่ภายในเท่านั้น เรียกสารที่มีสถานะในลักษณะนี้ว่า “คอลลอยด์” ปกติแล้ว ตัวกลาง คือ น้ำ จะเห็นอนุภาคเงินนาโนในรูปของน้ำสีเหลืองหรือน้ำตาล เนื่องจากการดูดแสงที่ความถี่ 400 นาโนเมตร เป็นช่วงแสงสีน้ำเงินและเพราะอนุภาคดูดกลืน แสงสีน้ำเงินไปปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า Localized surface plasmon resonance (LSPR) อนุภาคเงินนาโนที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น เป็นทรงกลมแบน แผ่นบาง ทรงกระบอก หรือรูปทรงสามเหลี่ยม การดูดกลืนแสงจะเกิดที่ช่วงความยาวคลื่นแสงต่างกันไป ทำให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนที่ไม่ใช่สีเหลืองออกมาได้ เช่น สีน้ำเงิน เขียว คราม ส้ม แดง ม่วง ชมพู (Pronk; et al. 2009; S.; et al. 2015)

2.1 ปรากฏการณ์ทางแสง เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance: SPR)

เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance; SPR) เป็นปรากฏการณ์เชิงแสงที่เป็นผลมาจากการสั่นรวม (Collective oscillation) ของอิเล็กตรอนอิสระ

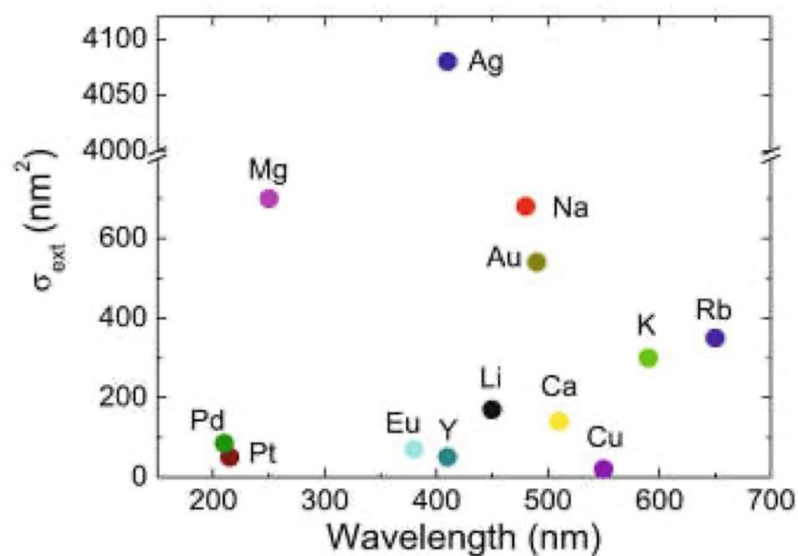
โดยจะเกิดขึ้นที่ผิวกับสารไดอิเล็กตริก เมื่ออนุภาคโลหะนาโนมีขนาดเล็กกว่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงจะทำให้อิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนเกิดการเคลื่อนที่มาบริเวณผิวหน้าของโลหะ โดยที่ประจุลบจะรวมตัวอยู่ที่ด้านหนึ่งของผิวหน้าและประจุบวกจะรวมตัวอยู่ด้านตรงข้ามดังแสดงในภาพประกอบ 7 ซึ่งสภาวะนี้จะทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) โดยไดโพลที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างอนุภาคนาโนและสารไดอิเล็กตริก โดยจะทำหน้าที่เป็นแรงดึงกลับมาที่ตำแหน่งสมดุล (Restoring force) วงจรกำเนิดสัญญาณเชิงเส้น (Linear oscillators) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกจากตำแหน่งสมดุลจะเกิดการสั่นที่มีความถี่พลาสมอน (Plasmonic frequency) สำหรับโลหะทรานซิชันส่วนใหญ่จะพบอยู่ในช่วงความถี่ UV-Vis (เรืองทวีป. 2016)



ภาพประกอบ 7 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ทางแสง เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance: SPR)

ที่มา : (Bhattacharai;Maruf;&Stine. 2020)

ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนของโลหะจะสัมพันธ์กับปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (SPR) กล่าวคือ ค่าการดูดกลืนแสงสามารถวัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนภาคตัดขวาง (Extinction cross section coefficient; σ_{ext}) โดยประมาณค่าจากสัดส่วนของโฟตอนที่ถูกรูดกลืนและกระเจิงแสงเมื่อแสงตกกระทบกับอนุภาคนาโน ค่า σ_{ext} ขึ้นอยู่กับขนาด รูปทรงทางเรขาคณิตและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของอนุภาคโลหะนาโน แสดงในภาพประกอบ 8

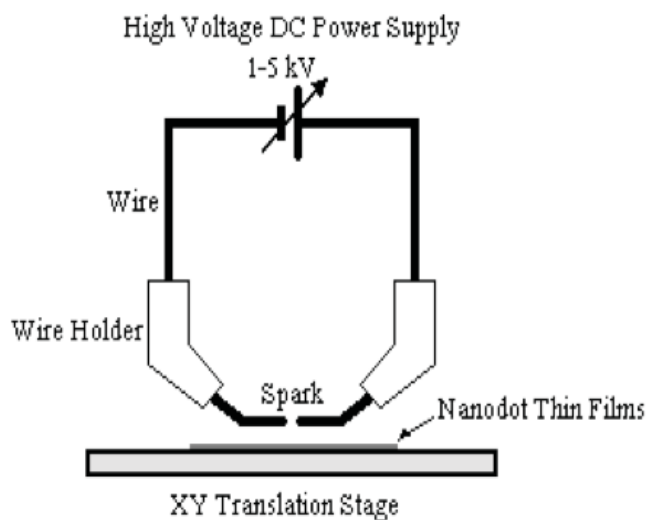


ภาพประกอบ 8 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคโลหะนาโนของโลหะชนิดต่างๆ

ที่มา : (เรืองทวีป. 2016)

2.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินด้วยกระบวนการสปาร์ค

สังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน ด้วยกระบวนการสปาร์ค (Jintakosol. 2015; Jintakosol. 2016; Thongsuwan;Kumpika;&Singjai. 2008; Kumpika;Thongsuwan;&Singjai. 2008) การเตรียมจัดให้มีช่องว่างระหว่างเส้นลวดตัวนำที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.26 มิลลิเมตรและมีความยาว 2 เซนติเมตร ให้มีระยะห่างจากกัน 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นวางเส้นลวดตัวนำอยู่บนผิวฐานรอง (Substrate) ให้มีระยะห่างกัน 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง 3000 โวลต์ขึ้นไปตกคร่อมระหว่างเส้นลวดตัวนำ ซึ่งจะทำให้เกิดการส-ปาร์ค กล่าวคือ เมื่อเส้นลวดตัวนำได้รับกระแสไฟฟ้า ทำให้เนื้อสารของลวดตัวนำบางส่วนหล่นลงบนผิวฐานรองเป็นอนุภาคเงินตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพประกอบ 9

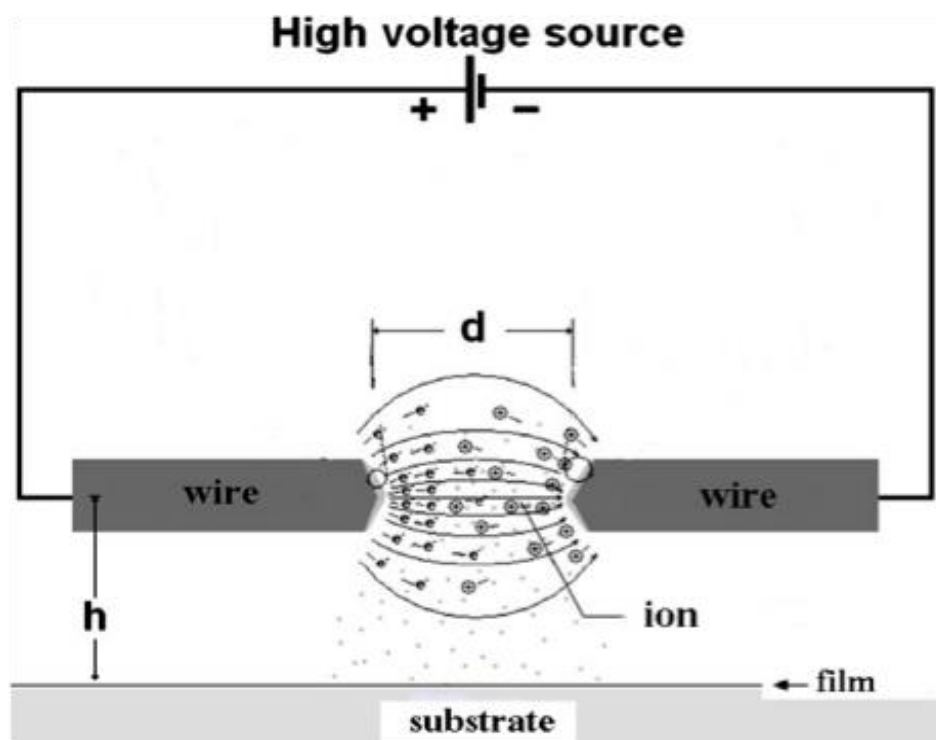


ภาพประกอบ 9 การเตรียมการสังเคราะห์ด้วยวิธีการสปาร์ค

ที่มา: (Kumpika;Thongsuwan;&Singjai. 2008)

เมื่อปลายเส้นลวดได้รับพลังงานศักย์ที่มาจากขั้วแคโทดและขั้วแอโนดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง จะทำให้อะตอมของอากาศบริเวณนั้นได้รับพลังงานเพียงพอ โดยอิเล็กตรอนของอะตอมจะถูกพลังงานศักย์ไฟฟ้าทางด้านขั้วแอโนดดึง ขณะที่ไอออนบวกจะถูกพลังงานศักย์ไฟฟ้าทางด้านขั้วแคโทดดึง (Jintakosol. 2014) จึงทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและ ion เมื่อ e^- และ ion บวกวิ่งชนกับปลายลวดโลหะทางด้านขั้วแคโทดและด้านขั้วแอโนดตามลำดับ ทำให้โลหะบริเวณปลายเส้นลวดหลุดออกมาเป็นก้อนอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่าจุดนาโน (Nanodots) ดังแสดงในภาพประกอบ 10

โดยที่ $V_{dc} \gg V_{bkdn} \rightarrow \text{ion} + e^-$ เมื่อ V_{dc} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจร และ V_{bkdn} คือ พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและอิเล็กตรอน



ภาพประกอบ 10 หลักการเกิดสปาร์คพลาสมา

ที่มา: (Kumpika;Thongsuwan;&Singjai. 2008)

3. เซลล์แสงอาทิตย์

3.1 ประเภทของ Solar Cell

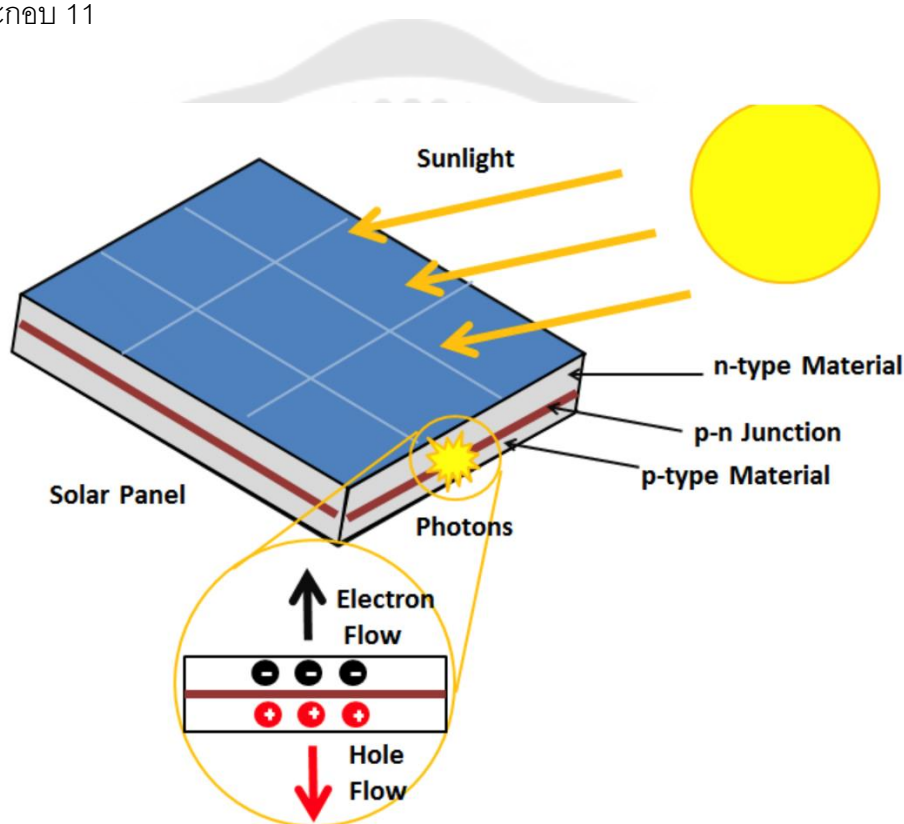
ในปัจจุบันที่ใช้กันอยู่จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่สังเคราะห์จากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอน แบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิด คือ
 - แบบที่เป็นรูปผลึก (Crystal) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) และผลึกรวมซิลิกอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell)
 - แบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) คือ ชนิดฟิล์มบาง อะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon Solar Cell)
2. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่สังเคราะห์จากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิกอน มีประสิทธิภาพสูงร้อยละ 25 ขึ้นไป แต่มีราคาสูงมาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาขบวนการผลิตสมัยใหม่จะทำให้มีราคาถูกลงและ

นำมาใช้มากขึ้นในอนาคต ซึ่งปัจจุบันใช้เพียง ร้อยละ 7 ของปริมาณที่มีใช้ทั้งหมด (วรารุณ. 2015)

3.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง เกิดจากแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมีพลังงานมาตกกระทบกับ semiconductor เกิดการถ่ายทอด energy ระหว่างกัน พลังงานจากแสงส่งผลกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ขึ้นภายใน ทำให้สามารถต่อกระแสไฟฟ้างดงกล่าวไปใช้งานได้ (กระทรวงพลังงาน. 2019) ดังแสดงในภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: (Technology. 2020)

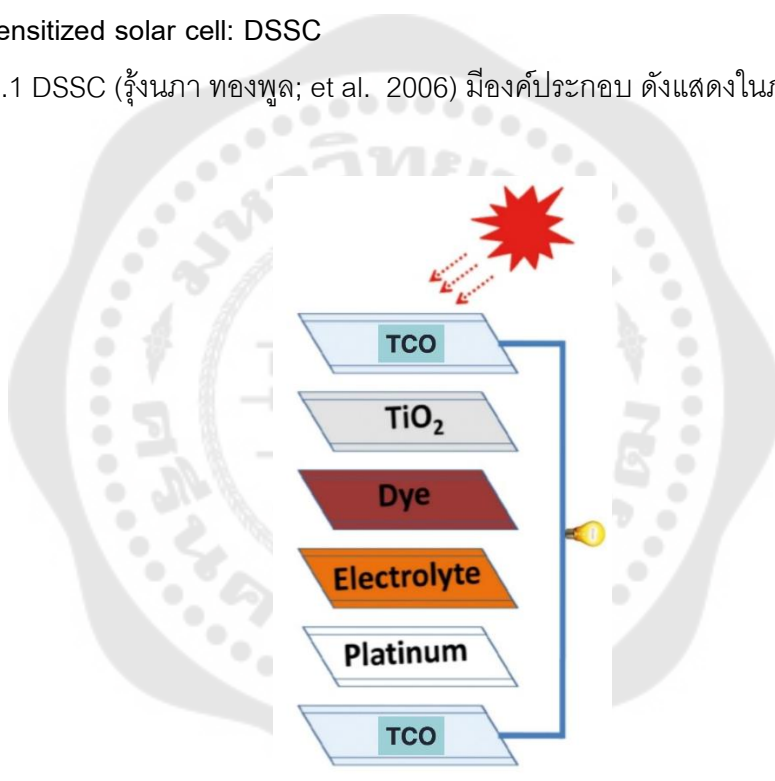
N - type ซิลิกอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเจือด้วยสารฟอสฟอรัส ทำให้มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานมาจากแสงอาทิตย์ ในขณะที่ P - type ซิลิกอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเจือด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นโฮล

ทำให้เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิกอนทั้ง 2 ชนิดมาประกบกันเกิดเป็น P – N junction หรือ รอยต่อ P - N ก่อให้เกิดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว โดยทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหากันเพื่อจับคู่ โดยที่อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น N – type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้นของ P – type ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจากการเคลื่อนที่ของทั้ง 2 (เครื่องาม. 2010)

4. Dye-sensitized solar cell: DSSC

4.1 DSSC (รุ่งนภา ทองพุด; et al. 2006) มีองค์ประกอบ ดังแสดงในภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบของ DSSC

1. กระแสไฟที่นำไฟฟ้าได้ ซึ่งได้มาจากการนำกระแสไฟไปเคลือบด้วยสารในกลุ่มออกไซด์ที่นำไฟฟ้าได้ (Transparent-conducting oxide, TCO) เพื่อส่งผ่านอิเล็กตรอนและยอมให้แสงผ่านเข้าถึงได้

2. ชั้นสารกึ่งตัวนำของกระแสไฟฟ้านำไฟฟ้าด้านบน (Semiconductor layer) เป็นสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal oxide semiconductor) ที่ช่องว่างแถบพลังงานสูง (Wide band-gap) และสามารถสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของสีย้อม สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาทำการศึกษาได้แก่ TiO_2 และ ZnO

3. สีย้อมไวแสง (sensitizing dye) ที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงเมื่อมาตกกระทบ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (ศรีสมานวัตร.)

- สีย้อมอินทรีย์ เป็นสีย้อมที่สังเคราะห์จากสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชชนิดต่างๆ เช่น คลอโรฟิลล์ จากดอกไม้ ใบไม้ และ ผลไม้ ของพืชบางชนิด ที่มีสี ส้ม ชมพู สีม่วงแดงและสีฟ้า เช่น น้ำคั้นจาก กระเจี๊ยบ ดอกอัญชัน บลูเบอร์รี่ และส้ม เป็นต้น ซึ่งในพืชเหล่านี้ จะมีเม็ดสีที่สำคัญ คือ แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) พบทั้งใน พืชดอกและพืชผล ให้สีแดง น้ำเงินหรือม่วง เป็นสารที่ละลายใน น้ำได้ดี มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของลิโปโปรตีน (ธรรมเจริญ. 2012)

ข้อดี คือ การสังเคราะห์ง่าย ราคาถูก เพราะมีในท้องถิ่น หรือหาซื้อง่าย

ข้อเสีย คือ ระยะเวลาในการเก็บรักษาสั้น ประสิทธิภาพต่ำ เมื่อเทียบกับ Inorganic dye

- สีย้อมอนินทรีย์ เป็นสีย้อมที่สังเคราะห์จากสารเคมี ประสิทธิภาพของสีย้อมขึ้นอยู่กับ ชนิดและอัตราส่วนของสารเคมีที่นำมาสังเคราะห์เป็นสีย้อม เช่น N3 dye (ruthenium II), cis-di (isothiocyanato), bis (4,4'-dicarboxy-2,2'-bi-pyridyl) เป็นต้น

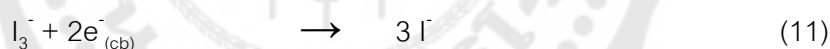
4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ที่ทำงาน ในวงจร ภายนอกกลับคืนสู่สีย้อม ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน

5. สารตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระจกนำไฟฟ้าด้านล่าง ที่จะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากวงจร ภายนอกมาส่งให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อส่งอิเล็กตรอนคืนให้สีย้อมไวแสง โดยวัสดุที่นิยมใช้ คือฟิล์มแกรไฟต์หรือแพลทินัม

4.2 กลไกการทำงาน

เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะ ออกไซด์ จะดูดกลืนพลังงานแสงแล้วกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state, S_0) จะถูกเร่งให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state, S^*) ดังสมการการดูดกลืนแสงที่ (6) จากนั้น อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปที่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ของอนุภาค โลหะออกไซด์ดังสมการส่งผ่านอิเล็กตรอนสมการที่ (7) แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่ง ตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมี อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรภายนอกเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วลบ แล้วจะ เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในสารอิเล็กโทรไลต์ โดยให้ e^- กับ dye ที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้ โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) ดังสมการที่ (8) ในขณะเดียวกันสารละลาย จะรับ e^- จากขั้ว ลบ ดังสมการที่ (9) แต่ในกระบวนการก็อาจมีปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบ ประกอบด้วย การรวมกัน

ใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สภาวะพื้น โดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์ จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (10) และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กโทรไลต์ ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังสมการที่ (11) (สุรมิตร. 2011; แสนทวีสุข. 2010; สามารถ มุลน้อย;&อินทนิเวศน. 2015)



4.3 การปรับปรุงคุณภาพเซลล์

การพัฒนา Dye-sensitized solar cell ให้มีคุณภาพมากขึ้นสามารถทำได้ใน 3 ส่วนด้วยกัน กล่าวคือ การพัฒนาสีย้อมไวแสง การพัฒนาอิเล็กโทรไลต์และการพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

1. การพัฒนาสีย้อมไวแสง สามารถทำได้ใน 3 รูปแบบด้วยกัน (พรมอาร์ักษ์.; et al. 2007) คือ

- หาสีย้อมไวแสงชนิดใหม่ที่มีความสามารถในการดูดกลืนในช่วงที่กว้างหรือเจือธาตุที่ช่วงเพิ่มช่วงการดูดกลืนให้มากขึ้น กล่าวคือตั้งแต่ช่วงคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้จนถึงช่วงคลื่นอินฟราเรด

- เพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะของสีย้อมไวแสงกับพื้นผิวของโลหะออกไซด์เพื่อให้มีปริมาณของสีย้อมไวแสงมากขึ้น

- เพิ่มความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอน

2. การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์ในระนาบที่ใช้เป็นของเหลวที่สามารถจัดเตรียมได้ง่าย ซึ่งเป็นช่วงประกอบของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ของ ไอโอดีน (I^-) กับ ไตรไอโอดีน (I_3^-) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ข้อเสียคือตัวทำละลายที่ใช้จะเหวี่ยงง่ายจึงทำให้ส่งผลต่อการรั่วซึมและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นของเหลวไอออนิกที่มีจุดเดือดสูง มีการนำไฟฟ้าที่ดีและมีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อน (แสนทวีสุข. 2015)

3. อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ คุณสมบัติของของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ มีเสถียรภาพสูง มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง มีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้สามารถบรรจุสีย้อมไวแสงในปริมาณมาก มีพื้นที่ให้สีย้อมไวแสงเกาะอย่างทั่วถึงจึงจำเป็นจะต้องมีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอ นอกจากนี้รูพรุนยังช่วยให้ไอออนของอิเล็กทรอนิกส์แพร่ผ่านได้ดี (Law; et al. 2005)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมและการตกสะสมอนุภาคเงินลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ค.ศ.2006 Gopal และคณะ (MOR; ET AL. 2006) ศึกษาผลของสภาวะความเป็นเบสของสารละลาย และค่าศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการแอโนไดเซชัน ต่อการเกิด TNAs บนฟิล์ม TiO_2 จากผลการทดลองพบว่า ทั้งความเป็นเบสของสารละลาย และค่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อขนาดของรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์

ค.ศ. 2010 Hai-chao และคณะ (Liang;Li;&Nowotny. 2010) สังเคราะห์ TNT ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน พบว่าเมื่อใช้แผ่นฟรอสต์ไทเทเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและใช้แพลตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองวางห่างกัน 2 เซนติเมตร โดยใช้แอมโมเนียมฟลูออไรด์เมื่อเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะสามารถสังเคราะห์ TNAs ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฟรอสต์ไทเทเนียม หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 300, 500 และ 800 แล้วนำท่อนาโนไดเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยศึกษาอัตราการย่อยสลายของสารไดแอส พบว่าคุณภาพของตัวเร่งขึ้นอยู่กับความยาว ความหนาของผนังและลักษณะความเป็นผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ค.ศ. 2010 Han และคณะ (Yang;&Pan. 2010) สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ คือ เอทิลีนไกลคอล น้ำและไฮโดรฟลูออไรด์ โดยให้ความเข้มข้นฟลูออริกที่ 0.1-0.5 โมล เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นฟลูออไรด์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยให้ความต่างศักย์ 30 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าค่าความเข้มข้นฟลูออริกส่งผลต่อความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ค.ศ. 2009 Lidong และคณะ (Sun; et al. 2009) สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์ เพื่อศึกษาความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อความยาวท่อ โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ คือ เอทิลีนไกลคอล น้ำ ร้อยละ 2 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ร้อยละ 0.3 ให้ความต่างศักย์ 25, 40, 50 และ 60 โวลต์ วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ค่าความต่างศักย์และเวลาส่งผลต่อความหนาและความยาวของท่อ

ค.ศ. 2008 ทองสุวรรณและคณะ (Thongsuwan;Kumpika;&Singjai. 2008) ศึกษาสมบัติการเกิดปฏิกิริยา สังเคราะห์แสง ของอนุภาคแขวนลอย NP TiO_2 ที่ทำการผลิตด้วยวิธีการสปาร์ก โดยใช้แท่งไทเทเนียมปลายแหลมบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.5 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแท่ง 3 มิลลิเมตร วางเหนือ น้ำ 2 มิลลิเมตร โดยให้ค่าความต่างศักย์ 3 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 30 1-5 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้ตกผลึกบนควอทซ์ แล้วจึงทำการอบอ่อนที่ 250 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ระยะเวลาในการสปาร์กเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น

ค.ศ. 2008 คำพิกาและคณะ (Kumpika;Thongsuwan;&Singjai. 2008) ศึกษาสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ ออกไซด์ ในลักษณะฟิล์มบางบนผลึกควอทซ์ด้วยวิธีการสปาร์ก โดยใช้แท่งสังกะสีปลายแหลมบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.97 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.38 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแท่ง 3 มิลลิเมตร วางเหนือ แผ่นรองรับ 2 มิลลิเมตร โดยให้ค่าความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ แล้วจึงทำการ อบก่อนการอบอ่อน ที่ 380 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ อบอ่อน ที่ 400-800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการสปาร์ก นอกจากนี้การอบอ่อนมีผลต่อขนาดของเกรน กล่าวคือเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นหากใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นผลให้ความขรุขระของผิวลดลง

ค.ศ. 2010 Chien-Cheng และคณะ (Tsai;Chu;&Teng. 2010) ศึกษาการสังเคราะห์นาโนริบบอน $\text{TiO}_2(\text{B})$ ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟเรติก (Electrophoresis) ตกตะกอนบนวัสดุรองรับ โดยสังเคราะห์ฟิล์มนาโนริบบอนไฮโดรเจนไททาเนต (Hydrogen titanate nanoribbons) ก่อน จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปให้ความร้อน เพื่อกำจัดหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่อยู่ในชั้นของน้ำ ได้นาโนริบบอน $\text{TiO}_2(\text{B})$ นำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอินดในเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ ร้อยละ 0.87 เมื่อใช้พลังงานเริ่มต้น 100 mW/cm^2 ทั้งนี้คุณภาพของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนา ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ พบว่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นในช่วง 5 ถึง 15 ไมครอน N_2 ดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มหนา 25 ไมครอน พบว่าประสิทธิภาพจะลดลง เพราะฟิล์มเริ่มแตกและไม่โปร่งแสง ทำให้การถ่ายโอนมวลและการถ่ายอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง

ค.ศ. 2010 Choongho และคณะ (Yu;&Park. 2010) สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนริบบอนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) พบว่าโครงสร้างของ TiO_2 ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใย ส่วนเรื่องความเร็วของไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนริบบอนขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) เมื่อศึกษาสัญญาณวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนริบบอนที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ และขนาดของเส้นใยมีขนาดใกล้เคียงกัน

ค.ศ. 2011 Yibing และคณะ (Xie. 2011) ศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนคอมเพล็กซ์ ประกอบด้วยการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบของนาโนริบบอน หรือลวดนาโน บนพื้นผิวของ TNAs ที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยสังเคราะห์จาก Anodization Process พบว่า วัสดุนาโนผสมมีความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงกว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพราะนาโนริบบอนและลวดนาโนสามารถรับแสงได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิว TNT พบว่า ลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เจือด้วย TNAs ให้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนริบบอน ที่เจือด้วยท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มีความยาวและพื้นที่ผิวมาก ทำให้ภายในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีช่องว่างเพื่อที่จะให้เกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน ระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ดี

ค.ศ. 2015 เอี่ยมบุ๋ และคณะ (Areeya; et al. 2015) ศึกษาการสังเคราะห์ TNT ในแอมโมเนีย ฟลูออไรด์ เอทิลีน ไกลคอล ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรด 2 จากนั้นได้สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยให้ความ

ต่างศักย์ไฟฟ้า 20-30 โวลต์ กรดแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 4 โดยปริมาณและเวลาที่ใช้ใน Anodization Process 1 ถึง 3 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของ TNT ความเข้มข้นและเวลาความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการผลิต พบว่า การแอโนไดซ์เซชันในสารละลายผสมของน้ำจะทำให้ได้ท่อนาโนไทเทเนียมที่สั้นและขรุขระ

ค.ศ. 2012 Regonini และคณะ (Regonini; et al. 2012) ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวท่อนาโนไทเทเนียมด้วย Anodization Process ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ คือ น้ำ ร้อยละ 2 และไฮเดียมฟลูออไรด์ ร้อยละ 0.5 ศึกษาโดยให้ค่าความต่างศักย์ ในช่วง 10 – 40 โวลต์ วิเคราะห์ด้วย SEM และ X-ray Photoelectron spectroscopy, XPS พบว่า ค่าความต่างศักย์ ปริมาณของน้ำในอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลต่อโครงสร้างท่อ

ค.ศ. 2013 Chen และคณะ (Chen;&Zhang. 2013) ทำการศึกษาการสังเคราะห์ TNT เฉพาะที่ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ คือ EG ร้อยละ 17.5 น้ำ และร้อยละ 3.5 ไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) ศึกษาโดยให้ค่าความต่างศักย์ 80 โวลต์ เป็นเวลา 2,6,8 ชั่วโมง และใช้แผ่นไทเทเนียม ปิดแผ่นฟรอยด์ไทเทเนียม แล้วทำการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า การนำแผ่นไทเทเนียมปิดในจุดที่ต้องการให้เกิดท่อจะทำให้เกิดท่อได้เร็วกว่าบริเวณอื่น

ค.ศ. 2015 Ahmed และคณะ (Al-Osta; et al. 2015) ศึกษาคุณสมบัติตัวเก็บประจุยิ่งยวดเซลล์ไฟฟ้าเคมี ด้วย Anodization Process บนฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียมขึ้นอยู่กับการเสียน้ำศูนย์กลาง โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิด คือ เอทิลีนไกลคอล, Polyethylene glycol: PG, Diethylene glycol: DEG ศึกษาโดยให้ค่าความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 15 ชั่วโมง วิเคราะห์ด้วย FESEM, เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) พบว่า ชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลต่อโครงสร้างท่อ

ค.ศ. 2016 Zhang และคณะ (Zhang; et al. 2016) ศึกษาท่อนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่มีความยาวท่อนามากเพื่อนำไปใช้ใน เพิ่มคุณภาพตัวเก็บประจุด้วย Anodization Process โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ คือ เอทิลีนไกลคอล, น้ำ ร้อยละ 2 และ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ร้อยละ 0.3 ศึกษาโดยให้ความหนาแน่นกระแส 5,10,20,40 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 0.5-6 ชั่วโมงและใน Anodization Process ครั้งที่ 2 ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ คือ เอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 5 กรดฟอสฟอริก เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปและทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสส่งผลต่อความยาวท่อ

ค.ศ. 2017 Oh และคณะ (Oh;Lee;&Choi. 2017) ศึกษาความแข็งแรงของ TNAs ที่ผลิตด้วยวิธีแอโนไดเซชัน โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์คือ เอทิลีนไกลคอล, น้ำ ร้อยละ 3 และร้อยละ 0.5 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ศึกษาโดยให้ค่าความต่างศักย์ 60 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 0, 15, 25, 35 องศาเซลเซียส แล้วทำการอบอ่อน ที่ 150 และ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, ทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vicker hardness พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความยาวท่อ และที่ 25 เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดท่อได้เร็วและยาวที่สุด นอกจากนี้ความยาวท่อมีผลต่อความแข็งแรงของท่อนาโน

ค.ศ. 2016 ทองสุวรรณ และคณะ (Hankhantod; et al. 2019) ทำการควบคุมรอยต่อระหว่างชั้นของ ไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น โดยใช้แท่งเหล็กและแท่งไทเทเนียมปลายแหลมบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.5 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแท่ง 1 มิลลิเมตร วางเหนือสารตั้งต้น 1 มิลลิเมตร โดยให้ค่าความต่างศักย์ 3 กิโลโวลต์ ทำให้ตกผลึกบนควอทซ์ แล้วจึงทำการอบอ่อน ที่ 250 และ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่ายิ่งฟิล์มหนามากขึ้นส่งผลให้ผิวมีความขรุขระมากขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มเกิดการแตกออกได้มากขึ้น

ค.ศ. 2017 คำพิกา และคณะ (Kumpika; et al. 2017) ทำการสังเคราะห์และควบคุมตำแหน่งของรูพรุนใน ZnO-TiO_2 ในลักษณะฟิล์มบางด้วยวิธีการสปาร์ค (Sparkling) โดยใช้ลวดสังกะสีบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.97 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.38 มิลลิเมตรและลวดไทเทเนียมบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.5 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแท่ง 1 มิลลิเมตร วางเหนือสารตั้งต้น 2 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในการทดลองมีการสลับขั้วไปมา โดยให้ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ในช่วง 4-10 กิโลโวลต์ แล้วจึงทำการ anneal ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1h พบว่าที่ความต่างศักย์ลดลง เปอร์เซ็นต์อะตอมของสารที่มีจุดหลอม เหลวต่ำจะมีปริมาณที่เยอะขึ้น แต่ในขณะที่เปอร์เซ็นต์อะตอมของสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะมีปริมาณที่ลดลง

9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ประยุกต์ใช้ใน DSSC

ค.ศ. 2013 Ammar และคณะ (Ammar; et al. 2013) ศึกษาการเรียงตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์และการนำไปประยุกต์ใช้ใน DSSC ด้วยวิธีแอโนไดเซชันในการสังเคราะห์ท่อไทเทเนียมจะสามารถสร้างได้ทั้งในรูปฟิล์มไทเทเนียมและบนแผ่นฟรอสต์ไทเทเนียม ทำการทดลองทั้ง 2 แบบแล้วทำการเปรียบเทียบ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ท่อไทเทเนียมบนแผ่นฟรอสต์ โดยใช้กรดแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นที่ร้อยละ 1.75 โดยปริมาตรและให้ค่าความต่างศักย์ที่ 60 โวลต์

เป็นเวลา 60 นาที แบบที่ 2 คือ สังเคราะห์ท่อไทเทเนียมให้อยู่ในรูปของฟิล์ม ความหนา 1 ไมโครเมตรบนกระจกเคลือบขั้วโลหะนำไฟฟ้าไฟฟ้าโปร่งแสง โดยใช้กรดแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นที่ร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรและให้ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 15 นาที นำทั้ง 2 ตัวอย่างไปทำการ anneal ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำทั้ง 2 ตัวไปแช่ในสารละลาย cis-di(thiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) (N-719, Solaronix Inc.) ในเอทานอล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ท่อไทเทเนียมที่สังเคราะห์บนแผ่นฟรอสต์ มีความกว้างท่อที่ 130 นาโนเมตรและความยาวอยู่ที่ 6 ไมโครเมตร ในขณะที่ท่อไทเทเนียมที่สังเคราะห์ในรูปฟิล์ม มีความกว้างท่อ 60 นาโนเมตรและความยาว 400 นาโนเมตร ในการนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่า แบบที่สังเคราะห์บนแผ่นฟรอสต์ไทเทเนียมให้ผลดีกว่า ความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมในการสังเคราะห์ในรูปฟิล์มมีผลให้การดูดกลืนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

ค.ศ. 2014 Swati และคณะ (Bhardwaj; et al. 2014) ศึกษาการเรียงตัวของ TiO_2 และประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสง ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์ โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นไทเทเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ขนาด 1x1 เซนติเมตร จากนั้นได้สังเคราะห์ TNT ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 50-57 โวลต์ กรดแอมโมเนียมฟลูออไรด์ถูกใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเวลาที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์ 30 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีขนาดเพิ่มขึ้นและลดความหนาของผนังท่อทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นในการดูดกลืนแสง

ค.ศ. 2014 Xiaoyan และคณะ (Wang; et al. 2014) ศึกษาการจัดเรียงตัวของ TNAs เกี่ยวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างแบบเพอร์ออฟสไกด์ โดยมีท่อนาโนคาร์บอนแบบโปร่งแสงเป็นขั้วอิเล็กโทรด ด้วยวิธีแอโนไดซ์ โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นฟรอสต์ไทเทเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนา 125 ไมโครเมตร และที่ 25 ไมโครเมตร สังเคราะห์ TNAs โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ กรดแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มี เวลาที่ใช้ใน Anodization Process 10 นาที แล้วนำตัวอย่างไปทำการอบ 3 ชม. เพื่อเปลี่ยนไทเทเนียมจากออกไซด์เป็นอะนาเทสเฟส หลังจากนั้นทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี พบว่าท่อไทเทเนียมจะเป็นฐานให้กับเพอร์ออฟสไกด์และท่อนาโนคาร์บอนทำหน้าที่เป็นโฮลเก็บ และปล่อยให้แสงผ่านที่แผ่นฟรอสต์ไทเทเนียมบริสุทธิ์ความหนา 25 ไมโครเมตร ให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 8.31

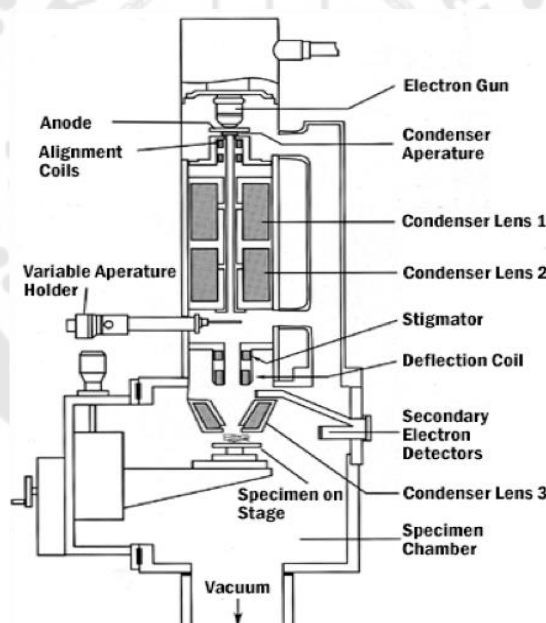
ค.ศ. 2015 Dong และคณะ (Yang; et al. 2015) ศึกษาการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และทำการเคลือบด้วยเงินในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดรอยต่อเฮเทโร พัฒนาให้สามารถ

ดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่มองเห็นทำการสังเคราะห์ท่อไทเทเนียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเตรียมผงรูทไทเทเนียม 2 กรัมและผสมกับ Sodium hydroxide แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า เงิน 3.8 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลให้ความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้นมากกว่าท่อไทเทเนียมนาโนธรรมดา

6. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของไทเทเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิสชัน (Field emission scanning electron microscopy: FESEM) (Werasak. 2000)

กล้องจุลทรรศน์ชนิดฟิวอิมิสชัน ดังแสดงในภาพประกอบ 13 เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยอาศัยหลักการทำงานของอิเล็กตรอนมองเห็นได้ถึง 100,000 เท่า



ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิสชัน

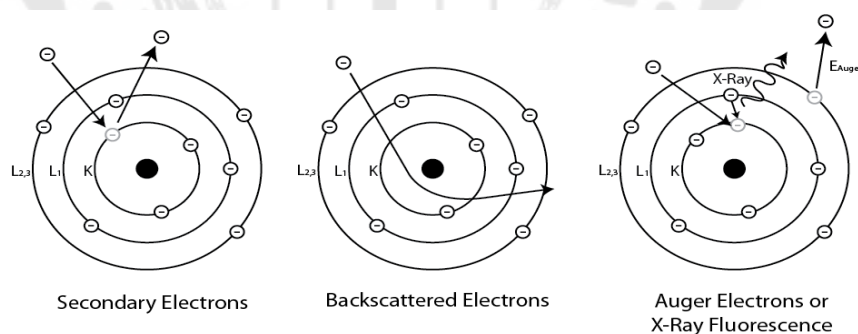
ที่มา: (Randy.)

จะเริ่มจากส่วนบนสุด ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิด e^- Electron gun อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพ Condenser lens ซึ่งทำหน้าที่บีบให้ Electron

beam หรือ Spot size ให้มีขนาดเล็กลง ส่วนเลนส์ชุดสุดท้าย คือ Objective lens ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนผิวหน้า ของชิ้นงานด้วยขนาดป้อมที่เล็ก ขนาดลำอิเล็กตรอน (Spot size/Probe size) ให้ Resolution ต่างกัน โดย Probe size เล็ก จะมี Resolution มากซึ่งจะให้รายละเอียดของภาพสูง การที่ Probe size มีขนาดใหญ่แสดงว่า Depth of field ต่ำ พื้นที่ผิวของชิ้นงานบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วส่งไป ประมวลผลเป็นภาพแสดงบน จอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้ จะให้สัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพ ภาพจากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ ส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวนอกจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอกซ์เรย์ (X-ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave), ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป ดังแสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 สัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่าง

ที่มา: (Patricio;&Goetz. 2012)

6.2 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS (Goldstein. 1992) (รุ่งธนเกียรติ.

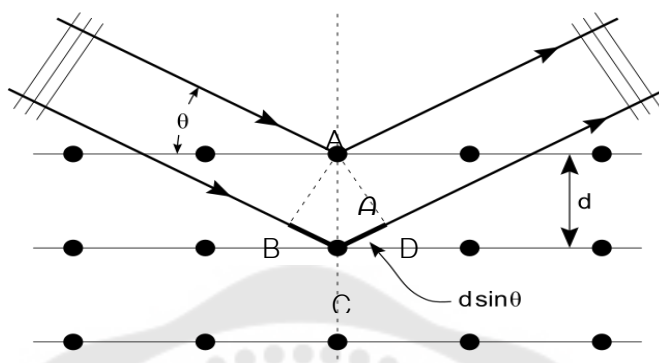
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรสโกปีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้อง SEM โดยหลักการของเทคนิคนี้คือเมื่อตัวอย่างชิ้นงานถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดรูปของรังสีเอกซ์ (X-ray) โดยจะเรียกรังสีที่ถูกปล่อยออกมาว่ารังสีเอกซ์แบบแคแวกเทอริสติก (Characteristic X-ray) ซึ่งปกติพลังงานของรังสีเอกซ์จะมีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ ทำให้เมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่ตำแหน่งวัดชนิด Silicon drift detectors (SSD) แล้วสร้างสัญญาณไฟฟ้าขึ้นตรงตามพลังงานของรังสีที่ตกกระทบหลังจากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณแล้วส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ โดยค่าสเปกตรัมที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แกน Y คือ จำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้และแกน X คือพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยของ keV และพีคที่เกิดขึ้นจะบ่งบอกถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างชิ้นงาน

6.3 การทดสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction: XRD) (Werasak. 2000)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเครื่องวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุล Crystal structure ของสารประกอบต่างๆการวิเคราะห์นี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผิวของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน และความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (Crystallography) เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive analysis) ผลการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิวัฒนาการองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยรังสีเอกซ์ ซึ่งมีสมบัติเป็นคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก คลื่นที่ใช้มีความยาวประมาณ 0.5-2.5 อังสตรอม ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม จะใช้รังสีเอกซ์ ความยาวคลื่นเดียวส่องไปที่ตัวอย่างวางไว้บนแท่นหมุนทำมุม $0-90^\circ$ กับตัวอย่างและเครื่องตรวจวัดจะหมุนตามไปด้วยความเร็วคงที่ ความเร็วในการหมุนนี้เป็นปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวิเคราะห์ตัวอย่างตัวตรวจวัดจะบันทึกมุมเป็น 2θ และ Scattering โดยการชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก โดยรังสีเอกซ์ที่กระเจิงนี้ยังคงมีค่าความยาวคลื่นที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและเกิดการเสริมสร้างและหักล้างกันของคลื่นการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบนี้เป็นการกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent scattering)

และเรียกการกระเจิงแบบนี้ว่า การกระเจิงแบบแบรกก์ (Bragg scattering) พิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังแสดงในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ที่มา: (อุดมพร. 2005)

เมื่อกระเจิงสำหรับระนาบสองระนาบ พบว่ารังสีทั้งสองมีความแตกต่างของทางเดิน (Path difference) เท่ากับ $BC + CD$ และถ้ารังสีเอกซ์ทั้งสองอยู่ในเฟสเดียวกันจะมีค่า $BC + CD$ เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ

$$BC + CD = n\lambda \quad (12)$$

เมื่อ n คือ เลขจำนวนเต็มที่มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, , 5

θ คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

เนื่องจาก

$$BC + CD = 2d \sin \theta \quad (13)$$

ดังนั้น

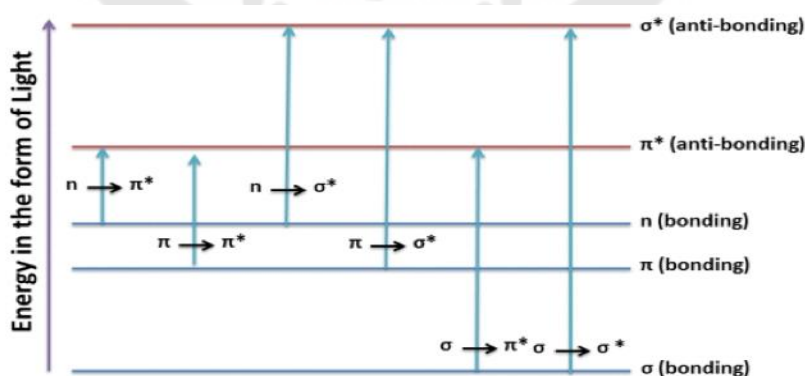
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (14)$$

ซึ่งสมการที่ (14) คือ สมการแบรกก์ (Bragg's equation) นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หามาพล็อตกราฟ ซึ่งประกอบด้วยพีคต่างๆ โดยที่พีคแต่ละพีคจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่างๆ จากความสัมพันธ์ของสมการแบรกก์จะสามารถหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (d หรือ d-spacing) ของแต่ละพีคแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS (Joint committee on powder diffraction)

6.4 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคป (UV-VIS spectroscopy: UV-VIS) (Supachai. 2009)

เครื่องสเปกโทรสโคป เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาความเชื่อมโยงกับปริมาณและสีงานซึ่งโดย สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

การวิเคราะห์โดย UV – Visible spectroscopy จะอาศัยหลักการพื้นฐาน คือ เมื่อแสงที่อยู่ในช่วงยูวีวิสิเบิล บางส่วนเกิดการกระเจิงวิสิเบิลผ่านเข้าไปในบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อนและบางส่วนทะลุออกไป ถ้าให้แสงทะลุออกป็นั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง จะพบว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า Absorption spectrum ส่วนที่ถูกดูดกลืนจะเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายในโมเลกุล จะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่า Antibonding orbitals ดังแสดงในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 ระดับพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลถูกกระตุ้นเมื่อได้รับพลังงาน

ที่มา : (Srinarin. 2004)

ในการวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนอาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer- Lambert's law) มีใจความว่ารังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (Parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) จะแปรผันตรงกับ ความเข้มข้นของตัวอย่าง (Concentration) และระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Path length) และเขียนเป็นสมการดังนี้

$$A = \epsilon bc \quad (15)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (Intensity of incident light)

I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (Intensity of transmitted light)

b คือ ความหนาของสารละลายหรือระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (cm)

C คือ ความเข้มข้นของตัวอย่าง (mol/L)

E คือ Molar absorptivity

เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง

ส่วนประกอบของเครื่องยูวี – วิสิเบิลสเปกโทรสโคป ดังแสดงในภาพประกอบ 17

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

Deuterium หรือ hydrogen lamp กำเนิดแสงทั้งช่วงยูวี มีความยาวคลื่น 160-400 นาโนเมตร) และช่วงวิสิเบิล (ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร)

Tungsten filament lamp หรือ Tungsten/halogen lamp กำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิล มีความยาวคลื่น 350-2500 นาโนเมตร

2. Monochromator (Wavelength selector)

ทำหน้าที่แยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโดยแสงจะผ่านเข้าที่ Entrance slit และจะแยกด้วยปริซึมหรือเกรตติง จากนั้น Monochromator โดยผ่านทาง Exit slit

3. Sample container (Cuvette)

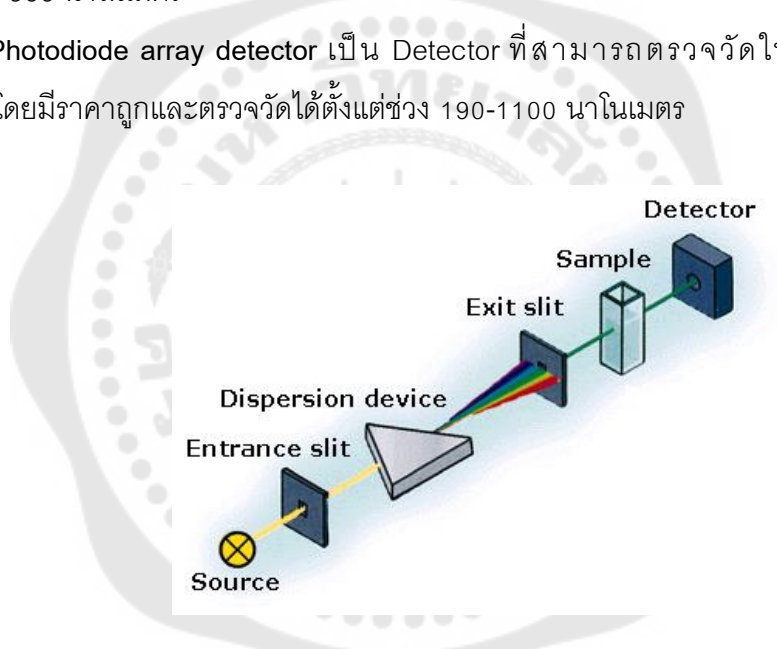
เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่ตัวอย่างโดยจะต้องมีลักษณะโปร่งแสง การวิเคราะห์ในช่วงยูวี วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ Quartz หรือ Fused silica และการวิเคราะห์ช่วงวิสิเบิล วัสดุที่เป็น Silicate glasses

4. Detector

เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดแสงที่ผ่านสารตัวอย่างออกมาโดย Detector ที่ใช้หลายชนิด คือ

Photomultiplier tube เป็น Detector ที่ไวต่อแสงทั้งในช่วงยูวีและวิสิเบิล โดยสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็วและตรวจวัดสารที่มีปริมาณต่างๆ ได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 190-900 นาโนเมตร

Photodiode array detector เป็น Detector ที่สามารถตรวจวัดในทุกเวลาเดียวกัน โดยมีราคาถูกและตรวจวัดได้ตั้งแต่ช่วง 190-1100 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 17 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคป

ที่มา: (Shane. 1998)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยที่ขั้นตอนงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนการสปาร์คและการวิเคราะห์ชิ้นงาน

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol: $C_2H_6O_2$)
2. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium fluoride: NH_4F)
3. อะซิโตน (Acetone: C_3H_6O)
4. น้ำ DI

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ฟรอยด์ไทเทเนียม ขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร
2. แท่งแกรไฟท์ทรงกระบอกพื้นที่ผิวขนาด 1 ตารางเซนติเมตร
3. กระดาษทรายสำหรับขัดเบอร์ 320 500 1200
4. กระบอกตวง
5. ปีกเกอร์
6. แท่งแก้วคนสาร
7. ช้อนตักสาร
8. คีมตัดลวด
9. แหนบ
10. เทปใส
11. ชุดสายไฟ
12. ลวดโลหะเงิน (Ag-Wire) ขนาด 0.26 มิลลิเมตร

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power supply)
2. เครื่องมัลติมิเตอร์ (Multimeter)
3. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
4. เครื่องล้างทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
6. เครื่องขัดละเอียด (Grinding & Polishing machine)
7. เครื่องสปาร์ค
8. เครื่องเป่าลม

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การเปิดพื้นผิวของฟรอยด์ไทเทเนียม
 - 1.1 ตัดแผ่นฟรอยด์ไทเทเนียมให้ได้ขนาด 5×10 ตารางเซนติเมตร
 - 1.2 ทำความสะอาดแผ่นฟรอยด์
 - 1.3 ทำการขัดเปิดผิวชิ้นงานด้วย เครื่องขัดละเอียด (Grinding & Polishing machine) ด้วยผงขัดอะลูมิเนียมขนาด 5, 1, 0.3, และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับจนพื้นผิวของชิ้นงานเรียบเป็นมันวาว
 - 1.4 ล้างด้วยน้ำสะอาดปราศจากไอออนและอะซิโตน จากนั้นเป่าให้แห้ง
2. กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน
 - 2.1 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดปราศจากไอออนและอะซิโตนเพื่อกำจัดชั้นของออกไซด์ที่เกิดโดยธรรมชาติ จากนั้นทำการเป่าให้แห้ง
 - 2.2 นำแผ่นไทเทเนียมหนีบเข้ากับด้านขั้วบวกหรือขั้วแอโนด (Anode) และหนีบแท่งคาร์บอนอยู่ด้านขั้วลบหรือขั้วแคโทด (Cathode) โดยทั้ง 2 ขั้วไฟฟ้าจะแช่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบไปด้วยเอทิลีนไกลคอลและแอมโมเนียมฟลูออไรด์
 - 2.3 ทำการให้ความต่างศักย์ตกคร่อมทั้ง 2 ขั้วไฟฟ้า โดยให้ค่าความต่างศักย์ที่ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที, 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
 - 2.4 นำชิ้นงานออกจากบีกเกอร์ ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดปราศจากไอออน จากนั้นทำการเป่าให้แห้ง

2.5 นำชิ้นงานที่ได้ทำการเผาเปลี่ยนเฟสเพื่อเพิ่มความเป็นผลึกที่อุณหภูมิ 450° เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. การเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการสปาร์ค

3.1 นำเม็ดเงินน้ำหนัก 35.5 กรัม ทำให้หลอมกลายเป็นแท่งที่อุณหภูมิ 962°C องศาเซลเซียส แล้วนำไปดึงจนกลายเป็นเส้นลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.26 มิลลิเมตร

3.2 ตัดลวดให้มีความยาวเท่ากับ 2 เซนติเมตร จำนวน 36 เส้น

3.3 ทำความสะอาดเส้นลวดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าให้แห้ง

3.4 นำเส้นลวดที่ได้ติดเข้ากับหัวสปาร์ค หลังจากนั้นทำการสปาร์คให้อนุภาคเงิน ตกลงบนแผ่นฟอยด์ไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการแอนโนไดให้เกิดท่อ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. วิเคราะห์สัณฐานของ TNAs ด้วย FESEM รุ่น JEOL-JSEM-7600F
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี รุ่น Bruker AXS D8 Discover
3. การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล สเปกโทรสโคป (UV-VIS spectroscopy: UV-VIS) รุ่น HITACHI UH1450

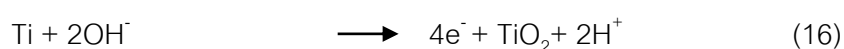
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบนทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย 2 กระบวนการ คือ Anodization Process และ สปาร์ค ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยการศึกษาตามขั้นตอนต่างๆ จนกระทั่งวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัยไว้ได้ดังนี้

4.1 กลไกการสังเคราะห์ TNAs โดยใช้ Anodization Process

การศึกษากลไกการสังเคราะห์ TNT โดยใช้ Anodization Process ดังภาพประกอบที่ 5 และ 6 โดยที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ได้แก่ ไทเทเนียมและขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ได้แก่ แกรไฟต์ นำไปแช่ลงในอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบไปด้วย แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) เอทาลีนไกลคอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) และน้ำปราศจากไอออน (Deionised water) ทำการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบจะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ทำให้ไอออนทั้งบวกและลบเกิดการเคลื่อนที่ โดยไอออนบวก (H^+) จะเคลื่อนตัวไปยังขั้วแคโทดและไอออนลบ (O^-) จะเคลื่อนตัวไปยังขั้วแอโนดหรือแผ่นฟรอสต์ไทเทเนียม ทำปฏิกิริยาเกิดการก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์บนชิ้นงาน ซึ่งในช่วงนี้กระแสจะมีค่าลดลงดังแสดงในสมการที่ 19 ต่อมาไอออนของฟลูออไรด์ (F^-) จะเคลื่อนที่ภายในชั้นฟิล์มออกไซด์แล้วไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ (Ti^{4+}) ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น จากการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและลบทำให้กระแสในช่วงนี้มีค่าสูงขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์ เนื่องจากสนามไฟฟ้างดสมการที่ 22 โดยการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณช่วงล่างของรูพูนนั้นทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ในขณะเดียวกันรูพูนจะกลายเป็นทองคำนาโนในช่วงนี้ โดยที่การสลายตัวของฟิล์มจะเริ่มช้าลง แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีการสร้างตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่โดยอัตราการโตของฟิล์มออกไซด์ที่บริเวณรอยต่อของโลหะต่อออกไซด์และอัตราการสลายตัวของออกไซด์ที่รอยต่อบริเวณกันของรูพูนมีอัตราที่เท่ากัน ดังนั้นในช่วงนี้จะ ถึงแม้ว่าไอออนอิสระจะเคลื่อนที่เข้าไปยังโลหะทำให้ความลึกของรูพูนเพิ่มขึ้นก็ตามทั้งนี้กลไกการเกิดทองคำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้





ดังนั้นปฏิกิริยาทั้งหมดที่ก่อตัวเป็นฟิล์มออกไซด์ตามสมการที่ 13



4.2 ผลของการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

ผลการวิเคราะห์แผ่นฟรอยด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอีมิสชัน โดยใช้กำลังขยายที่ 10,000 เท่า ก่อนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ลักษณะทางกายภาพมีความเรียบสม่ำเสมอแสดงในภาพประกอบที่ 18

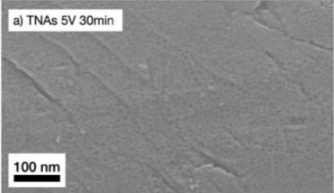
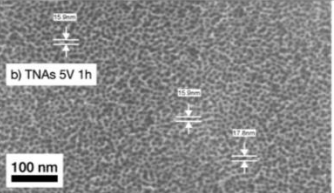
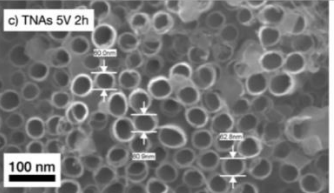
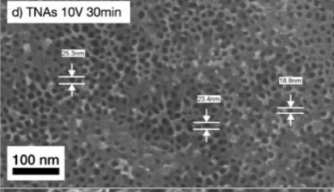
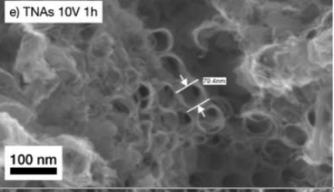
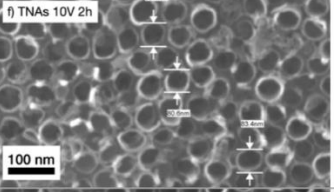
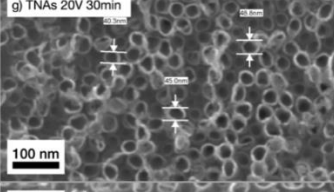
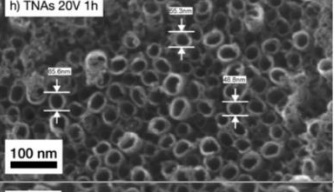
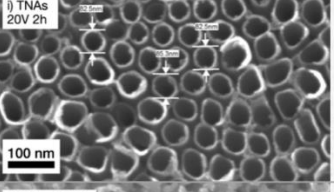
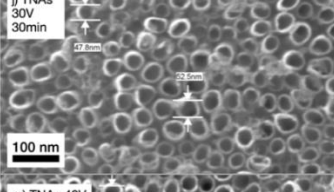
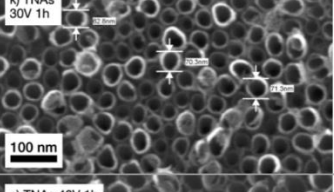
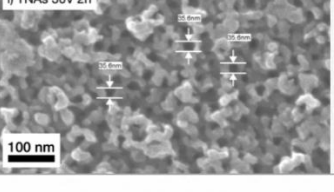
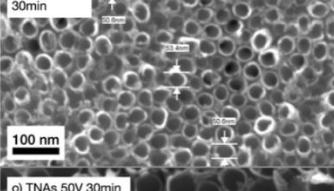
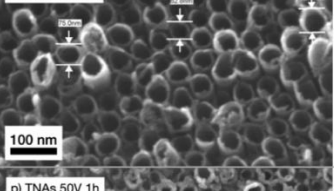
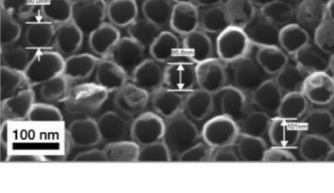
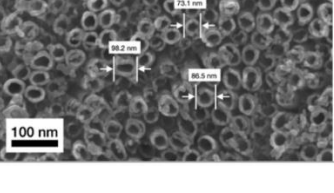


ภาพประกอบ 18 ผลการวิเคราะห์แผ่นฟรอยด์ TiO_2 โดยใช้กำลังขยายที่ 10,000 เท่า

ลักษณะพื้นฐานของ TNAs ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Anodization Process ที่ค่าความต่างศักย์ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที, 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยชิ้นงานมีขนาดพื้นที่ 50 ตารางเซนติเมตร แสดงในภาพประกอบ 19 โดยในภาพ a) แสดงภาพของชิ้นงานที่ให้ค่าความต่างศักย์ 5 โวลต์เป็นเวลา 30 นาที จากภาพแสดงให้เห็นถึง

การเกิดรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วบนชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียม โดยเกิดการกัดเซาะของอนุภาคฟลูออไรด์ไอออน ในภาพ b) แสดงภาพของชิ้นงานที่ 2 ที่ทำการแอนโนไดซ์เวลา 1 ชม. โดยให้ค่าความต่างศักย์ที่ 5 โวลต์ เวลาใน anodize ที่เพิ่มขึ้นทำให้สร้างและสลายตัวของชั้นฟิล์มเล็ก และมีลักษณะเป็นโครงข่ายคล้ายรังผึ้ง ในขณะที่ภาพ c) แสดงผลของชิ้นงานที่ถูกแอนโนไดซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าความต่างศักย์ 5 โวลต์ พื้นผิวของชิ้นงานปรากฏท่อนาโนไทเทเนียม ในขณะที่ภาพ d) ชิ้นงานถูกเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็น 10 โวลต์ ใช้เวลา 30 นาที พื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะโครงข่ายรังผึ้งของชั้นฟิล์มมากกว่าชิ้นงาน a) ในระยะเวลาที่เท่ากัน และที่เวลา 2 ชั่วโมงเท่ากัน (c และ f) ค่าความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ให้ความสมบูรณ์ของท่อที่มากกว่าเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็น 20 โวลต์ ในภาพ g), h) และ i) ที่เวลา 2 ชั่วโมง ท่อนาโนไทเทเนียมมีลักษณะความเป็นท่อที่สมบูรณ์และเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็น 30 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้กลับแตกต่างออกไปโดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีขนาดเล็กลดต่ำลงแสดงให้เห็นในภาพ j) และเมื่อเพิ่มเวลาในการแอนโนไดซ์ลักษณะท่อที่ได้กลับไม่สมบูรณ์จนกระทั่งไม่เหลือความเป็นท่ออีกต่อไปดังแสดงในภาพ k) และ l) ตามลำดับ

ดังนั้นหากใช้เวลาและค่าความต่างศักย์ที่มากเกินไปพบว่าแผ่นฟรอยด์ถูกกัดเซาะจนขาดออกจากระบบ จากภาพประกอบที่ 19 เปรียบเทียบลักษณะการเกิดท่อของไทเทเนียมที่เวลาและค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน พบว่าใน Anodization Process แบบให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะมีค่าความกว้างเฉลี่ยเท่ากันทั่วพื้นผิวที่ถูกแอนโนไดซ์ดังแสดงในตาราง 3 โดย oxidation และการเกิดการพัฒนาเป็นท่อนาโนไทเทเนียมที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากันทั่วพื้นที่ผิว โดยท่อจะเรียงตัวชิดติดกันอย่างเป็นระเบียบ โครงสร้างท่อมีลักษณะเป็นท่อกลวงทรงตรง แต่หากใช้เวลาและค่าความต่างศักย์ที่มากเกินไปจะไปทำลายท่อและแผ่นฟรอยด์ได้ จากการทดลองพบว่าเวลาและค่าความต่างศักย์ส่งผลต่ออัตราเร็วของการเกิดท่อและความสมบูรณ์ของท่อที่ได้ จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้เพื่อศึกษาการนำท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการสปาร์คด้วยอนุภาคเงินไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์จึงเลือกเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องด้วย TNAs ที่ผลิตมีความสมบูรณ์ของท่อและความกว้างขอบปากท่อเหมาะที่จะบรรจุอนุภาคเงินในขั้นตอนต่อไป

ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	เวลาในการสังเคราะห์		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
5 โวลต์	a) TNAs 5V 30min 	b) TNAs 5V 1h 	c) TNAs 5V 2h 
10 โวลต์	d) TNAs 10V 30min 	e) TNAs 10V 1h 	f) TNAs 10V 2h 
20 โวลต์	g) TNAs 20V 30min 	h) TNAs 20V 1h 	i) TNAs 20V 2h 
30 โวลต์	j) TNAs 30V 30min 	k) TNAs 30V 1h 	l) TNAs 30V 2h 
40 โวลต์	m) TNAs 40V 30min 	n) TNAs 40V 1h 	เสียหาย
50 โวลต์	o) TNAs 50V 30min 	p) TNAs 50V 1h 	เสียหาย

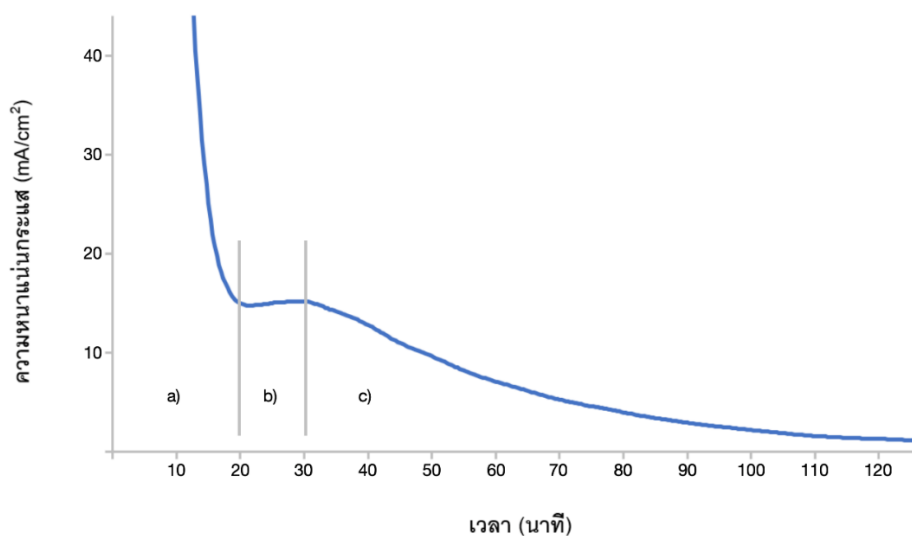
ภาพประกอบ 19 ผลการวิเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ค่าความต่างศักย์ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 โวลต์ ด้วย FESEM โดยกำลังขยายที่ 100,000 เท่า

ตาราง 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียม ณ เวลาและค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน

ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียม (นาโนเมตร)		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
5	-	16.5	61.2
10	22.5	60	82.5
20	44.7	56.6	85.3
30	49.4	90	35.6
40	51.5	109.3	-
50	95.3	65.9	-

4.3 ผลการวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่าง เวลา กับ ในระหว่างกระบวนการแอโนไดเซชัน

จากภาพประกอบที่ 20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับเวลา เมื่อให้ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ในเวลาต่างๆ ซึ่งกราฟมีความสอดคล้องกับลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และทฤษฎีการเกิดท่อ กล่าวคือในช่วงแรกเป็นช่วงที่เกิดการก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์ยังไม่มีเกิดการกัดกร่อนจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าของกระแสลดลง เนื่องจากไม่มีการไหลของกระแส ซึ่งเมื่อประกอบกับภาพแสดงลักษณะพื้นฐานของ TNAs พบเพียงชั้นฟิล์ม ในขณะที่ช่วงต่อมากราฟเกิดการเพิ่มขึ้นของกระแสหรือกล่าวได้ว่ามีการไหลของอิเล็กตรอนที่เข้าไปการกัดกร่อนบนชั้นฟิล์มออกไซด์ทำให้เกิดรูพรุนเมื่อเปรียบเทียบกับภาพแสดงลักษณะพื้นฐานจะพบว่าเกิดรูพรุนกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน เมื่อให้เวลามากขึ้นพบว่ารูพรุนเกิดการขยายตัวจนเกิดเป็นโครงสร้างลักษณะท่อยาว แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่ากราฟมีค่าการไหลของกระแสลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากในขณะที่ชั้นฟิล์มถูกกัดกร่อนก็มีการก่อตัวขึ้นใหม่ไปพร้อมๆ กัน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นวนซ้ำไปมาจนเข้าสู่ภาวะสมดุล

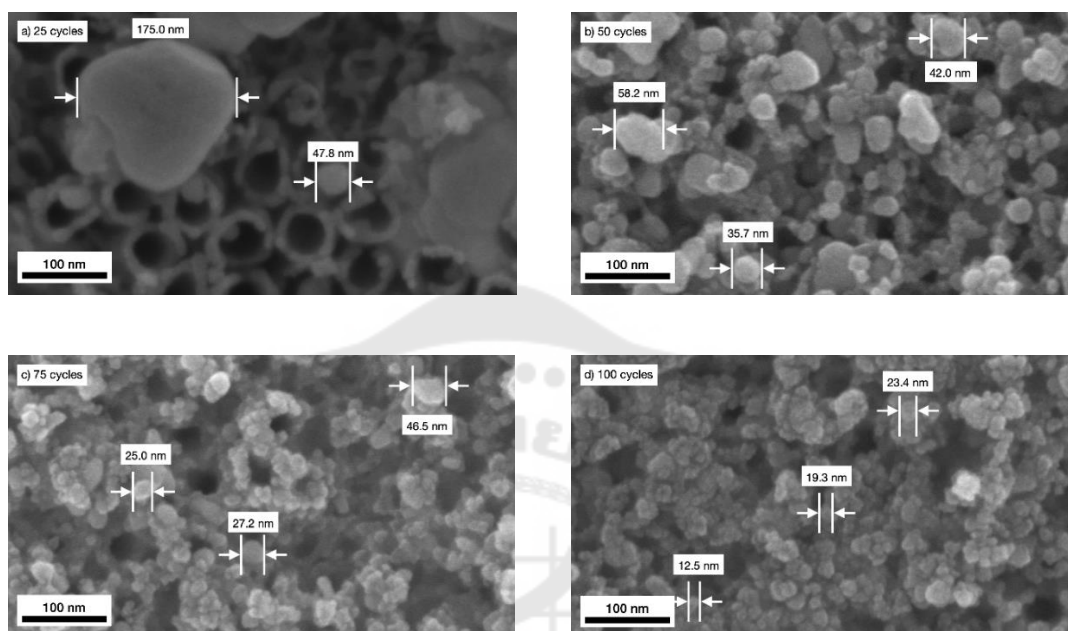


ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ ความหนาแน่นกระแสที่ให้ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

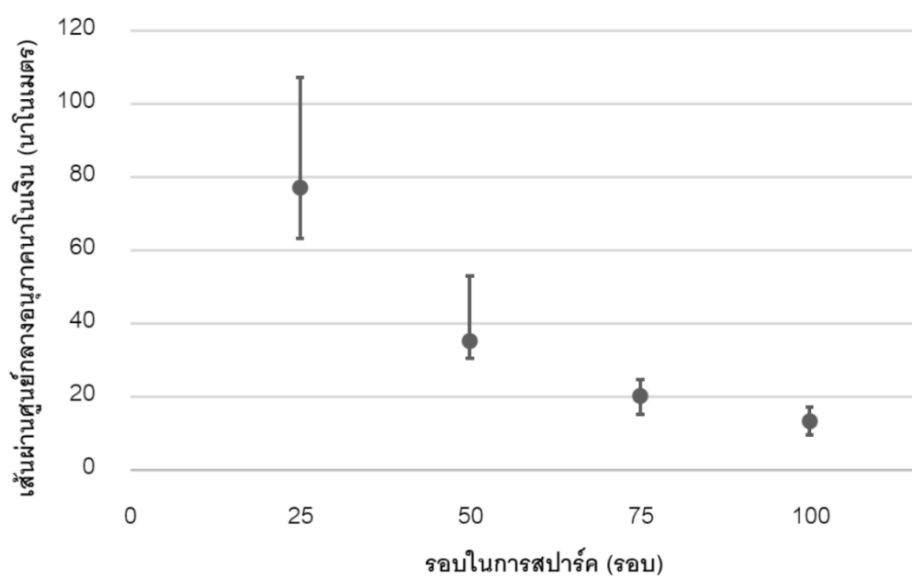
4.4 ผลลัพธ์ของการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคเงินนาโนโดยใช้กระบวนการสปาร์ค

การศึกษาลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของเงินที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการสปาร์คที่รอบสปาร์คตั้งแต่ 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175, 200 พบว่าการสปาร์ค 5-25 รอบ อนุภาคของเงินนาโนไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจะแสดงผลการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ 25, 50, 75 และ 100 รอบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21 และการผลการทดลองรอบของการสปาร์คมากขึ้นไปพบว่าอนุภาคของนาโนเงินเกาะกลุ่มหนาจนปิดโครงสร้างของ TNAs ดังนั้นจากภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเจือด้วยอนุภาคเงินนาโนบนพื้นผิวของท่อด้วยกระบวนการสปาร์ค โดยที่ภาพ a) แสดงถึงท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเจือด้วยอนุภาคเงินนาโนในกระบวนการสปาร์คเป็นจำนวน 25 รอบ จากภาพที่ไม่คงที่แต่กระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน ในขณะที่ภาพ b) ตัวอย่างต่อมาพบว่าอนุภาคเงินนาโนมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอหลังจากทำการสปาร์คเป็นจำนวน 50 รอบ หลังจากทดลองชิ้นงานต่อไปสปาร์คเป็นจำนวน 75 รอบ ดังแสดงในภาพ c) พบว่าอนุภาคเงินมีขนาดเล็กและแตกกลุ่มทั่วปากของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และเมื่อทดสอบการสปาร์คที่ 100 รอบ พบว่าอนุภาคเงินนาโนกระจายตัวหนาแน่นจนกระทั่งไม่สามารถมองเห็นปากของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อีกต่อไปดังแสดงให้เห็นในภาพ d) จาก

การทดลองพบว่าจำนวนรอบในการสปาร์คมีผลต่อขนาดของอนุภาคเงินนาโนดังแสดงในภาพประกอบที่ 22



ภาพประกอบ 21 ผลการวิเคราะห์อนุภาคเงินนาโนที่สปาร์ค 25, 50, 75 และ 100 รอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายที่ 100,000 เท่า



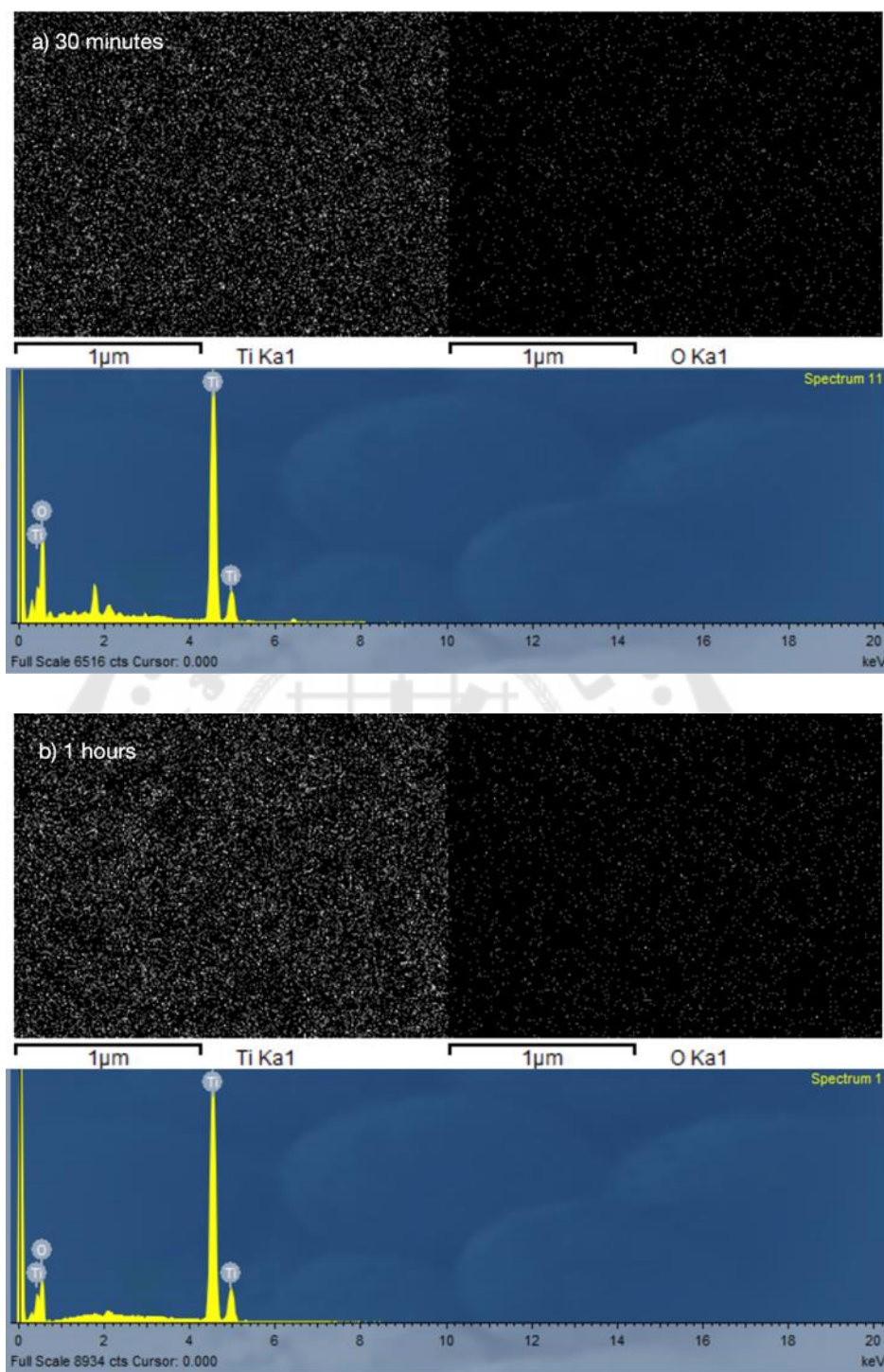
ภาพประกอบ 22 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเงินนาโนสปาร์คที่ 25, 50, 75, 100 รอบ

4.5 ทดสอบปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เทคนิค Energy dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

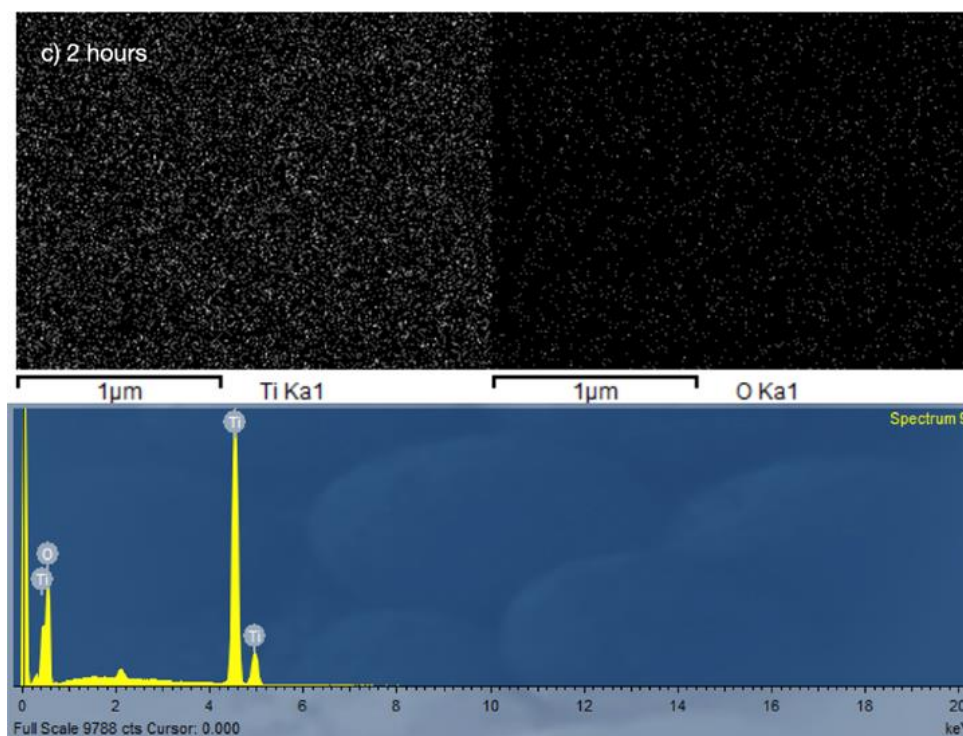
ภาพประกอบที่ 23 ถึง 24 แสดงผลวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่พบในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเงื่อนไขเวลาในการสังเคราะห์ที่ 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ โดยธาตุที่พบ Ti สามารถวัดระดับพลังงานอยู่ในชั้น K ดังแสดงปริมาณของธาตุในตารางเปรียบเทียบที่ 3 โดยสามารถระบุองค์ประกอบทางเคมีของธาตุได้ค่าพลังงาน แผ่นตัวอย่างชนกันจน จึงทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและหากพลังงานที่ได้รับนั้นมากพอจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสได้ ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าสามารถเข้ามาแทนที่และปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า รังสีเอ็กซ์ ซึ่งธาตุแต่ละตัวจะมีค่ารังสีเอ็กซ์ที่แน่นอน ทำให้สามารถระบุองค์ประกอบทางเคมีของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

ตาราง 3 เปรียบเทียบปริมาณธาตุในท่อนาโนไทเทเนียม

ตัวอย่างชิ้นงาน (นาที)	เปอร์เซ็นต์อะตอม (at%)	
	Ti	O
30	29.56	66.8
60	35.72	58.58
120	26.88	64.51



ภาพประกอบ 23 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลา a) 30 และ b) 60 นาที ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping



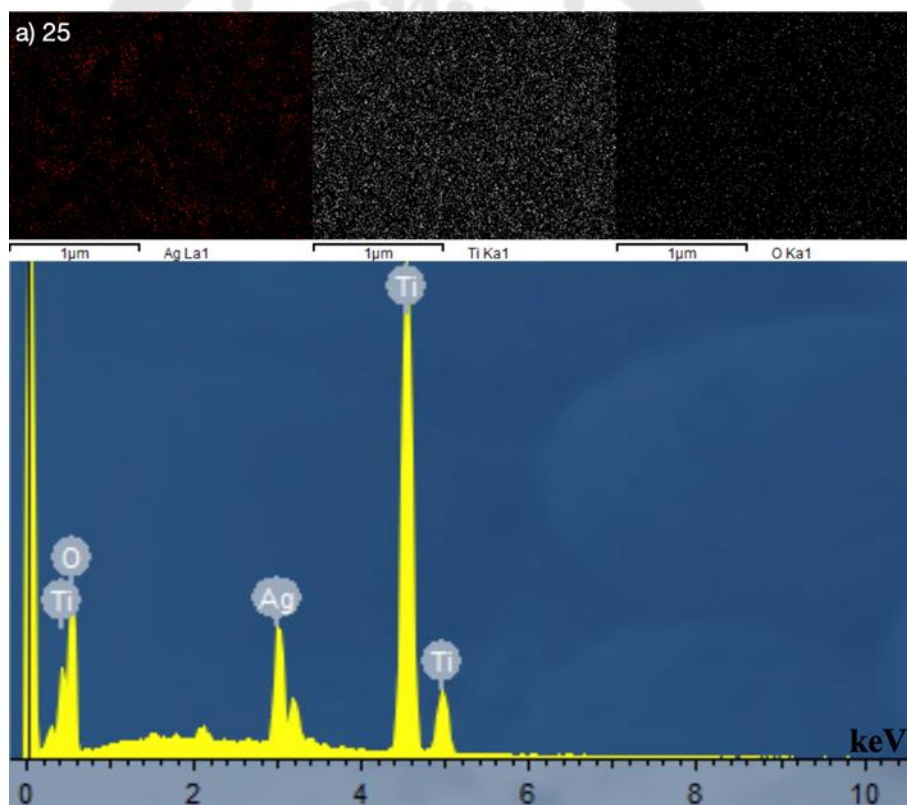
ภาพประกอบ 24 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลา c) 120 นาที ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping

4.6 วิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่างๆในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนโดยใช้เทคนิค Energy dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

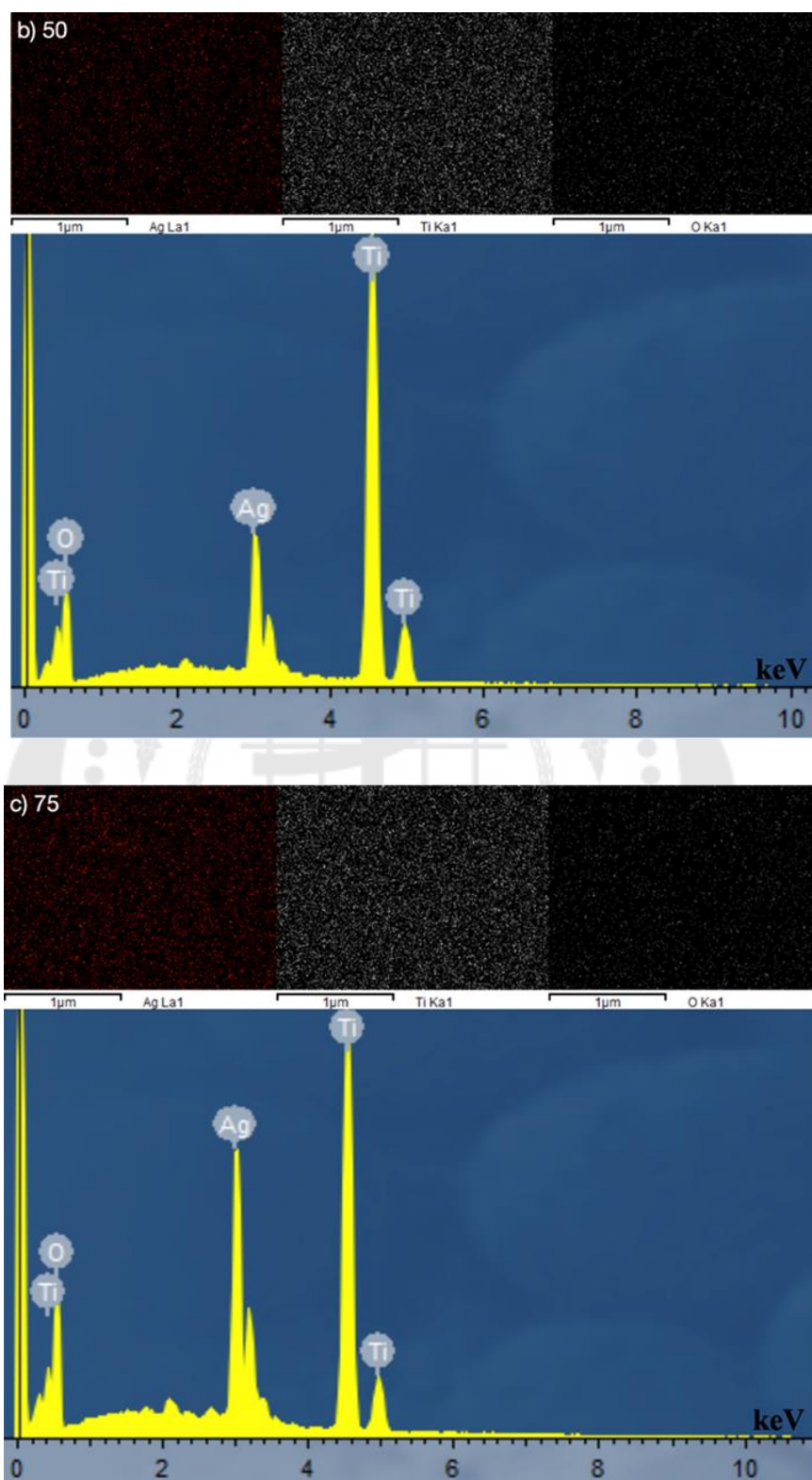
ภาพประกอบที่ 25 ถึง 27 แสดงผลวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่พบในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนในเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 25, 50, 75 และ 100 รอบตามลำดับ โดยธาตุที่พบประกอบไปด้วย ไทเทเนียม (Ti) โดยสามารถวัดระดับพลังงานได้อยู่ในชั้น K และพบธาตุเงิน (Ag) ที่ทำการเจือลงไป โดยสามารถวัดระดับพลังงานได้อยู่ในชั้น L ดังแสดงในตารางที่ 4 หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณของอนุภาคเงินนาโน (Ag) ที่พบในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการสปาร์คเป็นจำนวน 75 รอบ มีปริมาณเงินมากที่สุด

ตาราง 4 เปรียบเทียบปริมาณธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมที่เจือด้วยอนุภาคเงินนาโน

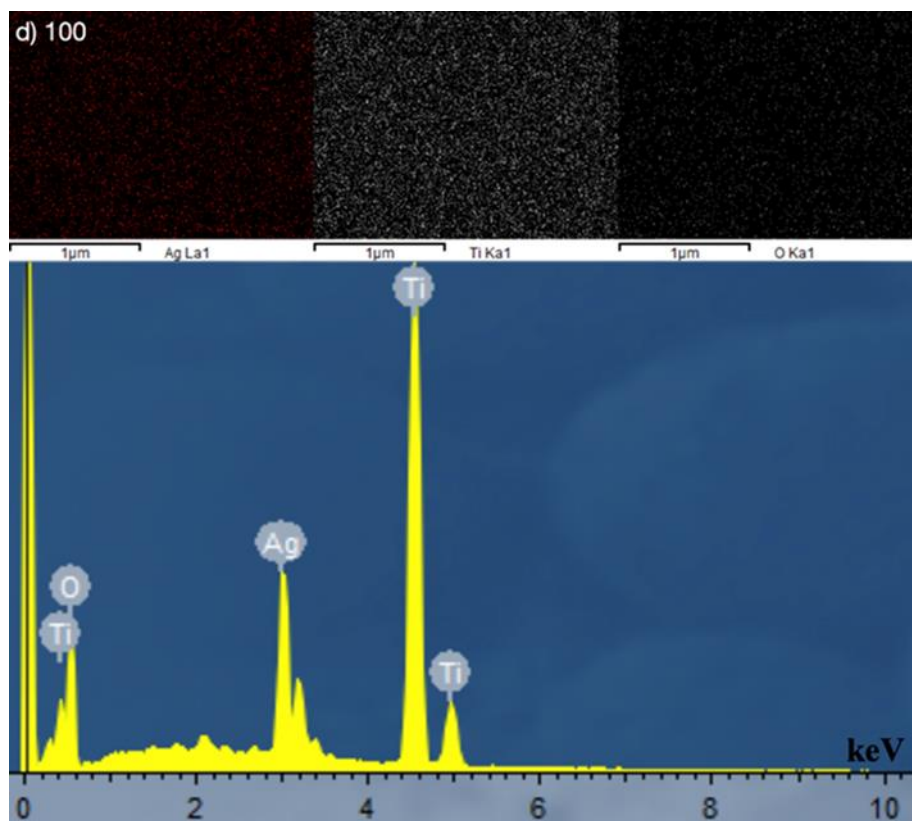
ตัวอย่างชิ้นงาน (รอบ)	เปอร์เซ็นต์อะตอม (at%)		
	Ag	Ti	O
25	3.63	29.56	66.8
50	5.7	35.72	58.58
75	8.61	26.88	64.51
100	6.02	31.68	62.3



ภาพประกอบ 25 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนที่สเปิร์ค a) 25 รอบ ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping



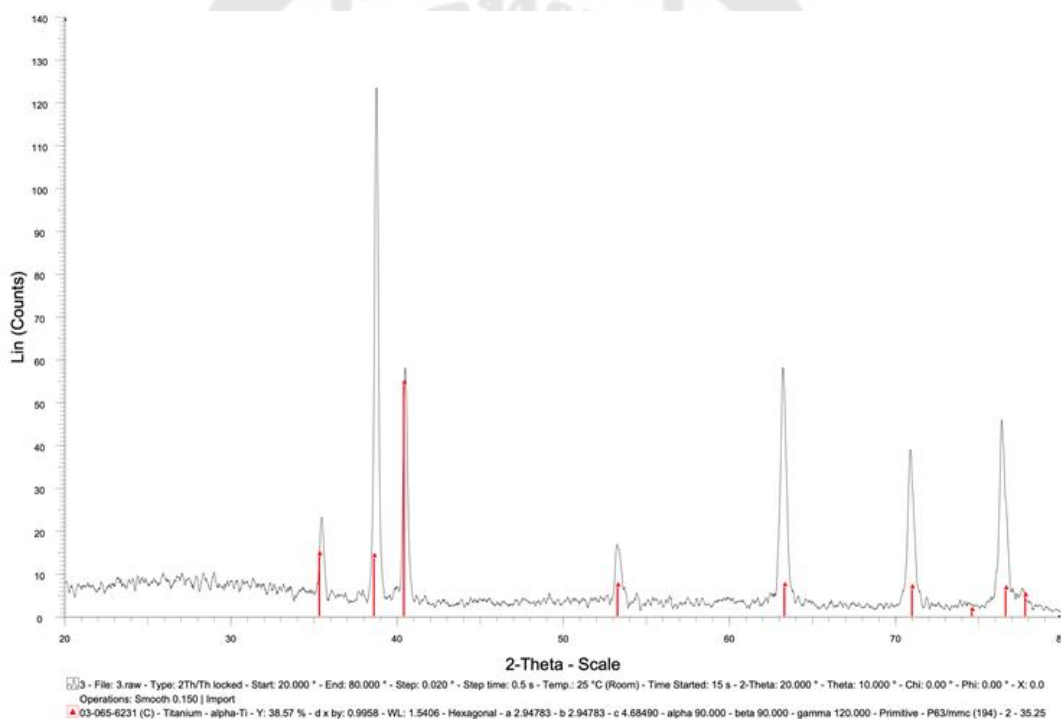
ภาพประกอบ 26 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนที่สเปิร์ด b) 50 และ c) 75 รอบ ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping



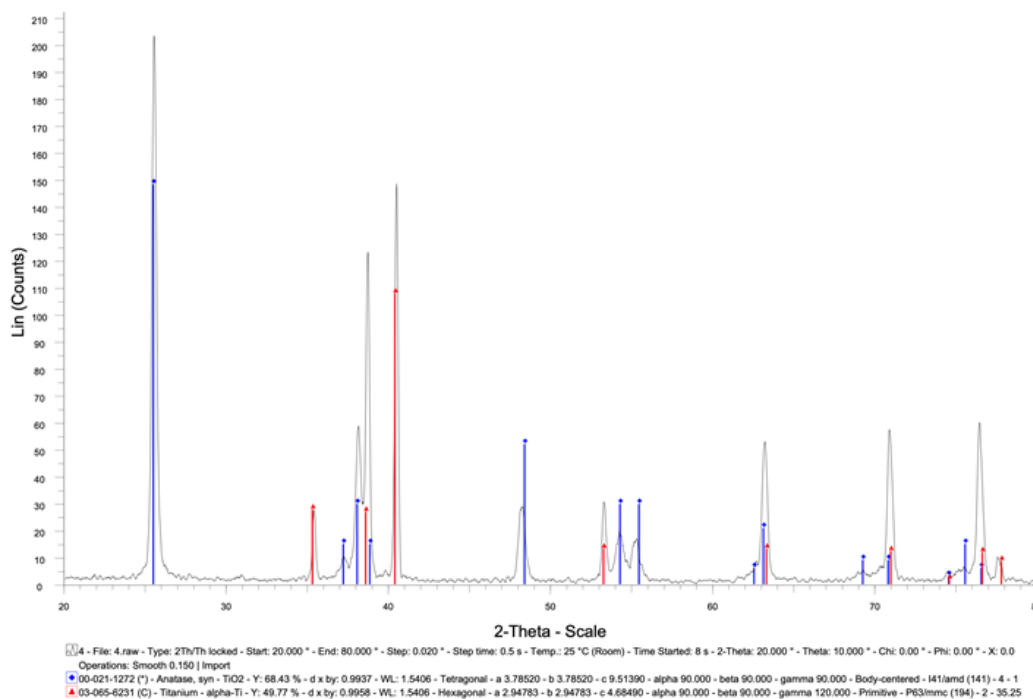
ภาพประกอบ 27 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนที่สปาร์ค d) 100 รอบ ด้วยเทคนิค EDS spectra และ mapping

4.7 ศึกษาโครงสร้างผลึกของ TNAs และ Ag@TNAs โดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

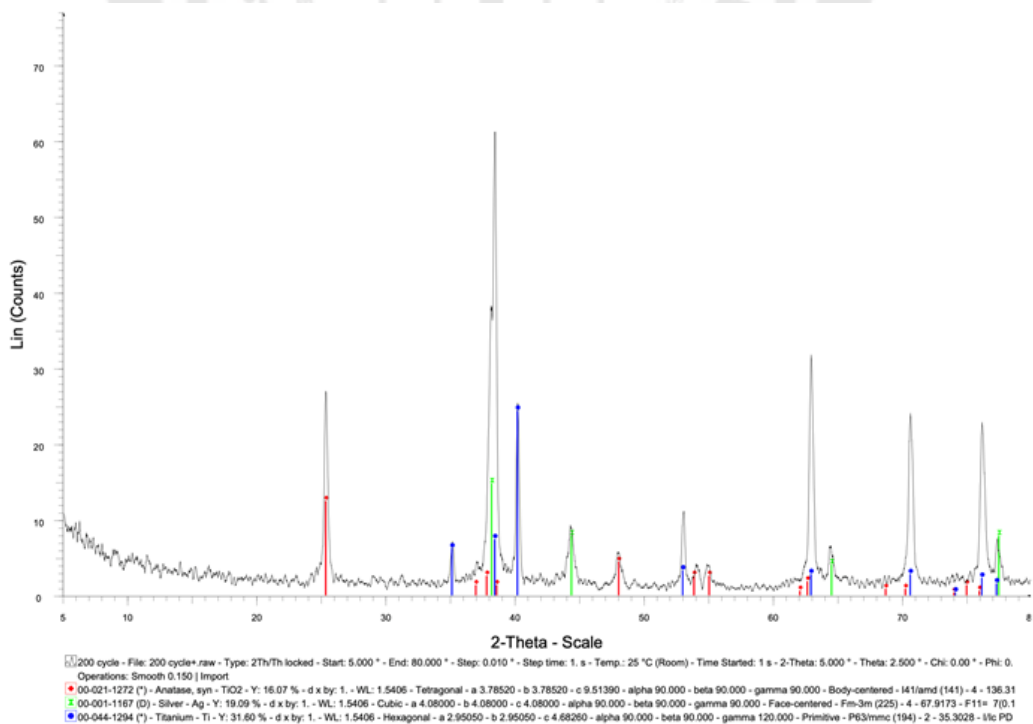
เนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์หรือที่เรียกว่า X-ray Diffraction (XRD) จากภาพประกอบที่ 28 และ 29 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction patterns) ของชิ้นงานก่อนทำการอบและหลังทำการอบได้สอดคล้องกับโครงสร้างผลึก 2 ระบบ คือ ไทเทเนียมอัลฟาโครงสร้างการบรรจุชิดที่สุดตาม JCPDS card no. 75-1537 และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส (Anatase TiO_2 phase) ตาม JCPDS card no. 9852 ในขณะที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคเงินนาโนบนชิ้นงานตัวอย่างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนได้ตาม JCPDS card no. 044387 แสดงในภาพประกอบที่ 30



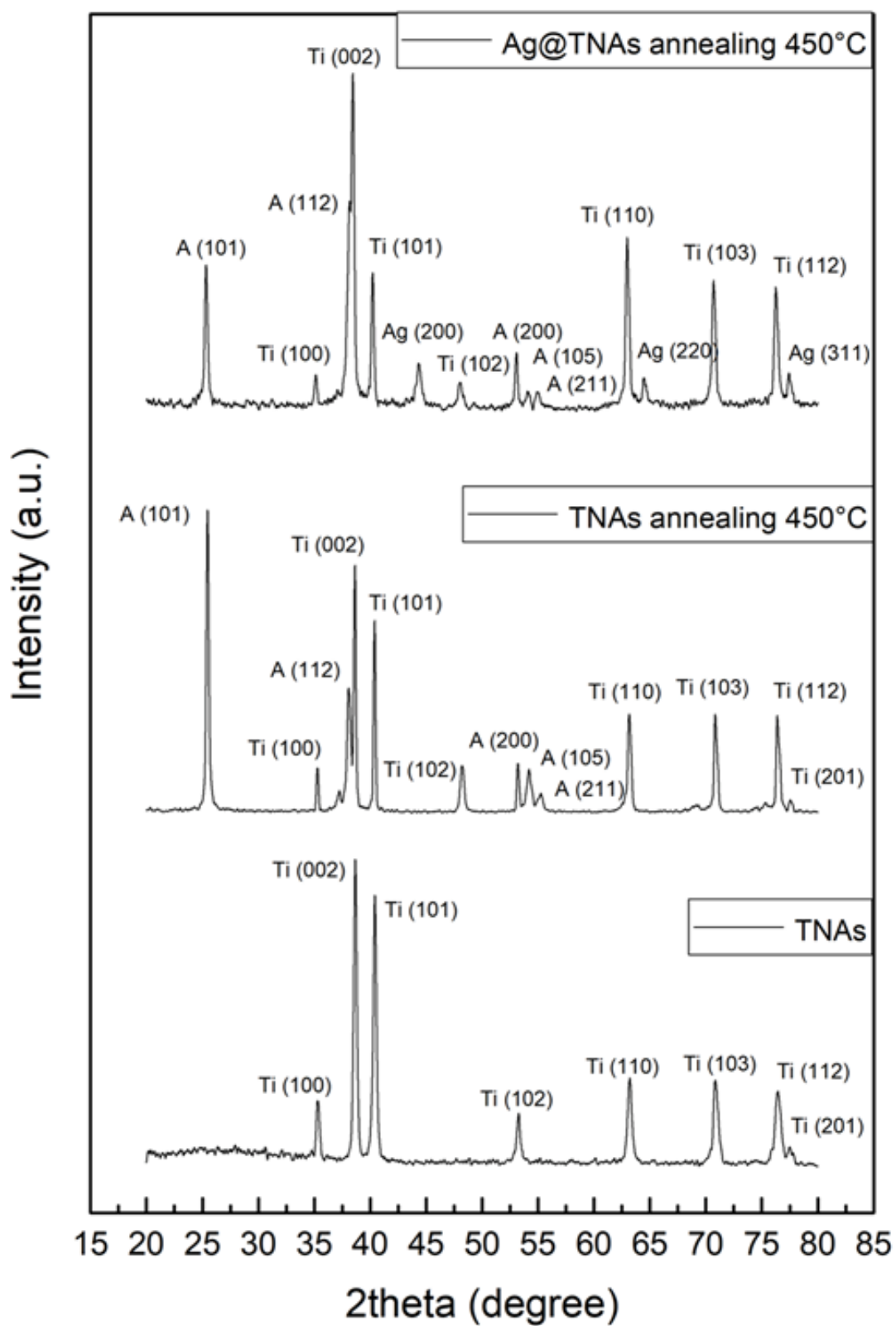
ภาพประกอบ 28 ข้อมูลอ้างอิงแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของไทเนเนียมไดออกไซด์



ภาพประกอบ 29 ข้อมูลอ้างอิงแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านการอบที่ 450°



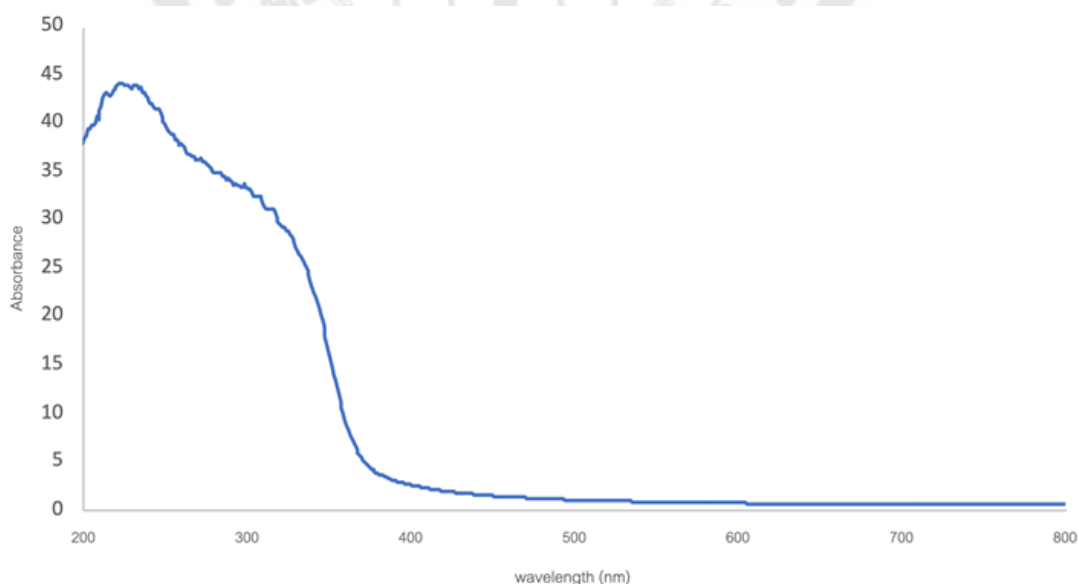
ภาพประกอบ 30 ข้อมูลอ้างอิงแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินนาโน



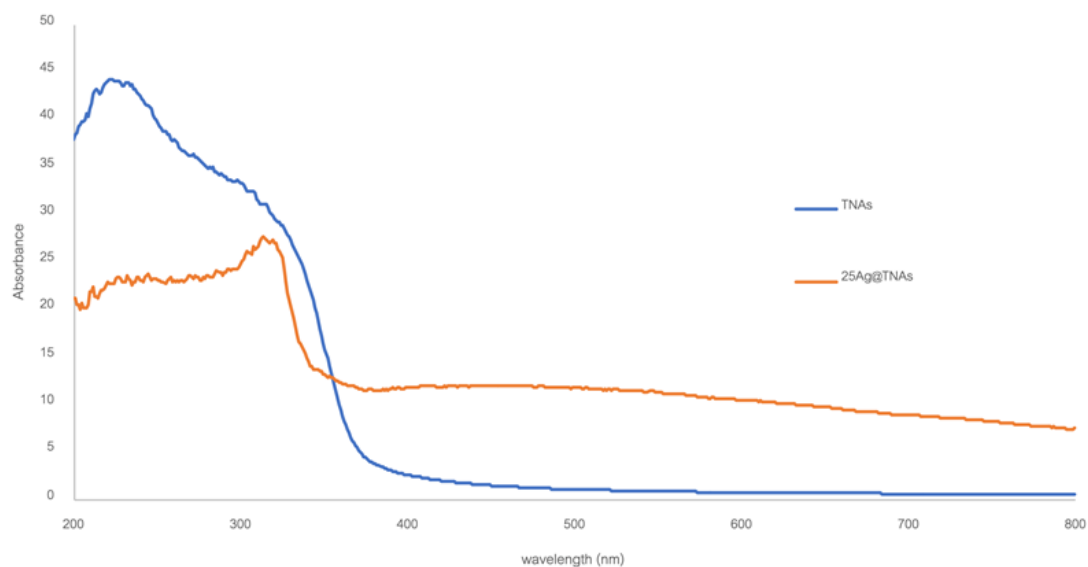
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อน/หลังผ่านการอบที่ 450° และเจือด้วยอนุภาคเงินนาโน

4.8 ศึกษาสมบัติทางแสงของ TNAs และ Ag@TNAs ด้วยเทคนิค UV-Vis-NIR spectrophotometer (UV-Vis)

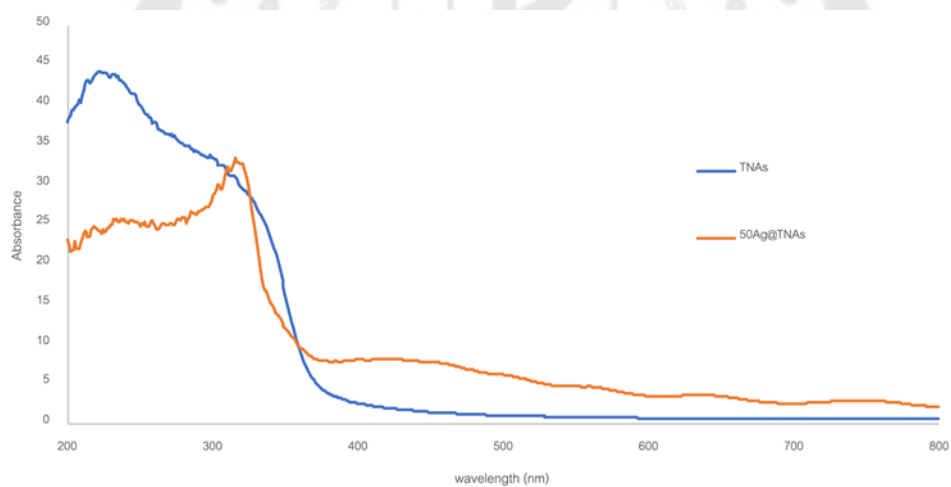
จากภาพประกอบที่ 32 ถึง 36 แสดงผลช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยสำหรับท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะแสดงผลของช่วงการดูดกลืนอยู่ที่น้อยกว่า 400 นาโนเมตร เนื่องจาก TNT ไม่สามารถดูดกลืนในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible light) เพราะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่กว้างประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (Lim; et al. 2014) ในขณะที่ช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคเงินนาโนปรากฏที่บริเวณ 400 ถึง 500 นาโนเมตร จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าท่อนาโนไทเทเนียมที่ถูกเจือด้วยอนุภาคเงินนาโนจะทำให้ช่วงการดูดกลืนสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible light) เนื่องจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance, SPR) ซึ่ง SPR ก็คือปรากฏการณ์เชิงแสง ที่เกิดจากพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคเงินนาโนได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบแล้วทำให้อิเล็กตรอนของชิ้นงานเกิดการสั่นรวม (Collective oscillation) และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมีความยาวคลื่นเท่ากันกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในชิ้นงาน จะทำให้เกิดการกำทอน (Eustis and El-Sayed, 2006)



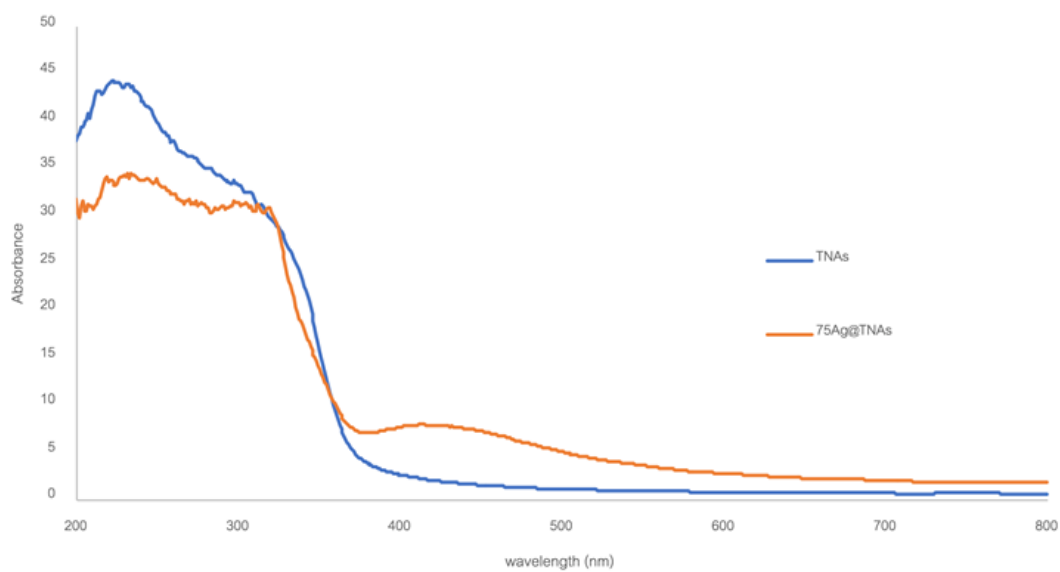
ภาพประกอบ 32 ภาพแสดงผลช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



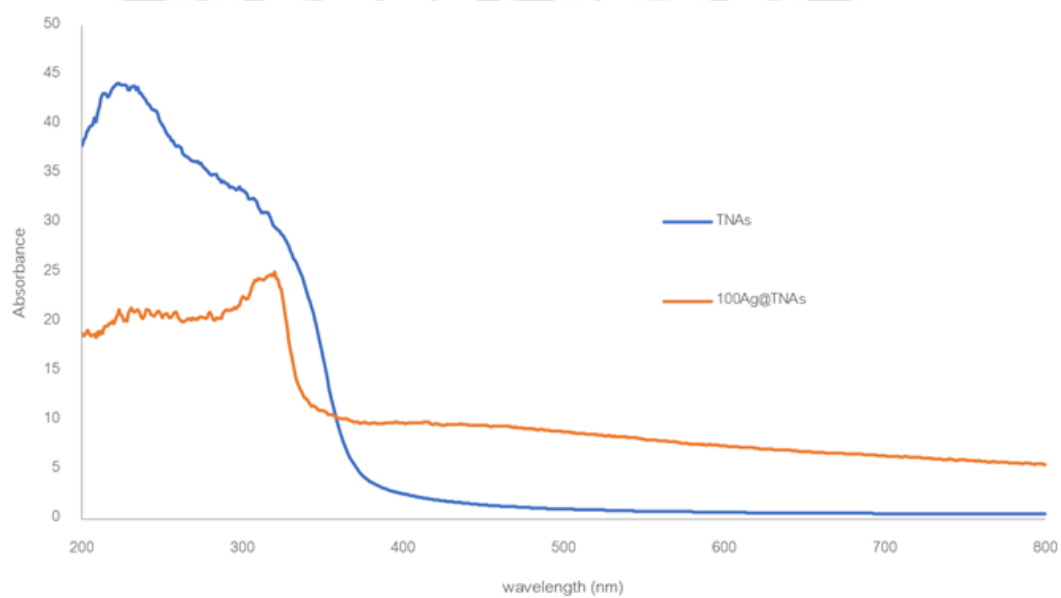
ภาพประกอบ 33 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 25 รอบ



ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 50 รอบ



ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 75 รอบ



ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงผลเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของ TNAs และ Ag@TNAs โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ 100 รอบ

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินลงบน TNAs ด้วย 2 คือ Anodization Process และ สปาร์ค พบว่าอนุภาคนาโนเงินส่งผลต่อลักษณะพื้นฐานและปรากฏการณ์เซอร์เฟซพลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance, SPR) โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เงื่อนไขของ Anodization Process ดังนี้ เวลา และความต่างศักย์ โดยสังเคราะห์ TNAs แผ่นฟรอยด์ไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้า เกรด 2 ในสารที่ผสมเอทิลีนไกลคอลและ ammonium fluoride จากผลการทดลองพบว่าทั้งเวลาและความต่างศักย์ มีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดท่อและความสมบูรณ์ของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือลักษณะท่อของไทเทเนียมกำหนดให้ความต่างศักย์คงที่ระหว่างกระบวนการแอโนไดเซชันในระยะเวลาต่าง ๆ กัน พบว่า เมื่อเวลาในกระบวนการแอโนไดเซชันมากขึ้น TNAs ที่สังเคราะห์ได้เป็นท่อชัดเจนและมีความยาวของท่อมากกว่าในกรณีที่เวลาที่ใช้ใน Anodization Process น้อย ๆ และพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ใน Anodization Process นานขึ้น ผนังท่อมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็นผลให้พื้นที่ภายในท่อน้อยลงจากการศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการแอโนไดเซชันต่อการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาเท่ากัน พบว่าชิ้นงานที่ให้ความต่างศักย์ 5 – 10 โวลต์ ชิ้นงานที่ได้ผ่านกระบวนการแอโนไดเซชัน มีลักษณะเป็นรูพรุน ยังไม่แสดงลักษณะที่เป็นท่อโดยสมบูรณ์ หากให้ความต่างศักย์ 20- 40 โวลต์ พบว่า ชิ้นงานที่ได้ผ่านกระบวนการแอโนไดเซชันมีท่อที่มีความยาวอย่างชัดเจน แต่หากใช้ความต่างศักย์ที่ 30 – 40 โวลต์ เวลา 2 ชั่วโมง แผ่น Ti ฟรอยด์ถูกกัดกร่อนจนเกิดความเสียหาย จากผลการทดลองนี้พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการแอโนไดซ์แผ่นฟรอยด์ไทเทเนียม คือ ให้ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. จำนวนรอบในกระบวนการสปาร์ค เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนเงินลงบน TNAs จากผลการทดลองพบว่าจำนวนรอบในการสปาร์คส่งผลต่อขนาดและปริมาณของอนุภาคนาโนเงิน โดยหากจำนวนรอบที่ทำการสปาร์คน้อย อนุภาคนาโนเงินที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่คงที่ และเฉลี่ย 80 นาโนเมตร แต่กระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน แต่เมื่อทำการสปาร์คที่จำนวนรอบมากขึ้นพบว่าอนุภาคนาโนเงินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง และ 20 นาโนเมตร และสม่ำเสมอปกคลุมทั่วปากของ TNAs หากทำการสปาร์คมากเกินไปพบว่าอนุภาคของนาโนเงินเกาะกลุ่มหนาจนเกิดเป็นชั้นฟิล์มหนาปกคลุมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

3. การศึกษาปรากฏการณ์เซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ ของ TNAs ที่มีอนุภาคนาโนเงินปกคลุมอยู่ เพื่อเป็นข้อมูลในการนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองแสดงว่า อนุภาคเงินที่ปกคลุมบน TNAs มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ และจากการทดลองนี้แสดงว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จะเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ เมื่อจำนวนรอบในการกระบวนการสปาร์คเท่ากับ 50 และ 75 รอบ



บรรณานุกรม

- Aakkarin, Bunprasert. (2014). Effects of Dimethylformamide Solution on Titanium Dioxide Nanotubes Fabricated by Anodisation Process. *Materials science, Srinakharinwirot university*.
- Abdelmoula, Mohamed. (2011). *Optical, Electrical and Catalytic Properties of Titania Nanotubes*. Retrieved
- Adriana, G. Reynaud Morales; María, O. Concha Guzmán; & Cecilia Cuevas, Arteaga. (2011). A Brief Review on Fabrication and Applications of Auto-Organized TiO₂ Nanotube Arrays. *Corrosion Reviews*. 29(1-2): 105-121.
- Al-Osta, Ahmed; et al. (2015). Diameter-Dependent Electrochemical Supercapacitive Properties of Anodized Titanium Oxide Nanotubes. *SMM Scripta Materialia*. 104: 60-63.
- Ammar, Elsanousia; et al. (2013). Highly Ordered TiO₂ Nanotubes and Their Application to Dye Sensitized Solar Cells. *Journal of Applied and Industrial Sciences*. 39-42.
- Areeya, Aeimbhu; et al. (2015). Characterisation of Titanium Dioxide Nanotube Arrays for Adsorption of Bovine Serum Albumin. *Journal of Science and Technology, Srinakharinwirot University*. 7: 97-109.
- Bessekhouad, Yassine; Robert, Didier; & Weber, Jean Victor. (2003). Synthesis of Photocatalytic TiO₂ Nanoparticles: Optimization of the Preparation Conditions. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 157(1): 47-53.
- Bhardwaj, Swati; et al. (2014). Study of Titanium Dioxide Nanotube Array for the Application in Dye-Sensitized Solar Cells. *IJMMM International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. 47-50.
- Bhattarai, Jay K.; Maruf, Md Helal Uddin; & Stine, Keith J. (2020). Plasmonic-Active Nanostructured Thin Films. *Processes*. 8(1): 115. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/1/115>
- Chandrasekharan, N.; & Kamat, P. V. (2000). Improving the Photoelectrochemical

- Performance of Nanostructured TiO_2 Films by Adsorption of Gold Nanoparticles. *JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY B*. 104: 10851-10857.
- Chen, Y.; & Zhang, H. (2013). Region-Specific Growth of TiO_2 Nanotube Arrays by Anodization. *Mater Lett Materials Letters*. 109: 5-7.
- Chonlada, Theerakarunwong. (2012). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Structures and Applications. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*. 14(1): 44-53
- Chu, D.; et al. (2008). Efficient Carbon-Doped Nanostructured TiO_2 (Anatase) Film for Photoelectrochemical Solar Cells. *JOURNAL OF NANOPARTICLE RESEARCH*. 10(2): 357-363.
- Diebold, Ulrike. (2003). The Surface Science of Titanium Dioxide. *Surface Science Reports Surface Science Reports*. 48(5-8): 53-229.
- Flores, Ismael C.; et al. (2007). Dye-Sensitized Solar Cells Based on TiO_2 Nanotubes and a Solid-State Electrolyte. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 189(2-3): 153-160.
- Fu, Y.; et al. (2009). Synthesis of Pd/ TiO_2 Nanotubes/Ti for Oxygen Reduction Reaction in Acidic Solution. *POWER Journal of Power Sources*. 189(2): 982-987.
- Fuke, Nobuhiro; et al. (2009). Influence of TiO_2 /Electrode Interface on Electron Transport Properties in Back Contact Dye-Sensitized Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells Solar Energy Materials and Solar Cells*. 93(6-7): 720-724.
- Ghicov, Andrei; & Schmuki, Patrik. (2009). Self-Ordering Electrochemistry: A Review on Growth and Functionality of TiO_2 Nanotubes and Other Self-Aligned Mo_x Structures. *Chemical Communications*. 2009(20): 2791-2808.
- Goldstein, Joseph I. (1992). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. *New York: Plenum Press*.
- Grätzel, M. (2005). Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells. *Inorganic chemistry*. 44(20): 6841-6851.
- Hankhantod, A.; et al. (2019). A Fe_2O_3 Modified TiO_2 Nanoparticulate Films Prepared by

- Sparking Off Fe Electroplated Ti Tips. *Applied surface science*. 477: 116-120.
- Hore, Sarmimala; et al. (2006). Influence of Scattering Layers on Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells. *SOLMAT Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90(9): 1176-1188.
- Jennings, J. R.; et al. (2008). Dye-Sensitized Solar Cells Based on Oriented TiO₂ Nanotube Arrays: Transport, Trapping, and Transfer of Electrons. *Journal of the American Chemical Society*. 130(40): 13364-13372.
- Jintakosol, T. (2014). Synthesis of Antimony-Doped Tin Oxide Thin Films by Sparking Process. *Faculty of science Srinakharinwirot university*.
- (2015). Optical Property of Sb-Doped SnO₂ Nanoparticle Thin Film by Sparking Process. *Applied Mechanics and Materials*. *Applied Mechanics and Materials*. 749: 141-145.
- Jintakosol, Thanut. (2016). Synthesis of Silver Nanoparticles by Sparking Process. *KEM Key Engineering Materials*. 675-676: 73-76.
- Kasuga, Tomoko; et al. (1998). Formation of Titanium Oxide Nanotube. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*. 14(12): 3160.
- Kumpika, T.; et al. (2017). Fabrication and Composition Control of Porous ZnO-TiO₂ Binary Oxide Thin Films Via a Sparking Method. *Optik*. 133: 114-121.
- Kumpika, T.; Thongsuwan, W.; & Singjai, P. (2008). Optical and Electrical Properties of ZnO Nanoparticle Thin Films Deposited on Quartz by Sparking Process. *Thin solid films*. 516(16): 5640.
- Law, Matt; et al. (2005). Nanowire Dye-Sensitized Solar Cells. *Nature materials*. 4(6): 455-459. <http://europepmc.org/abstract/MED/15895100>
<https://doi.org/10.1038/nmat1387>
- Liang, H. C.; Li, X. Z.; & Nowotny, J. (2010). Photocatalytical Properties of TiO₂ Nanotubes. *Diffusion and defect data. [Pt. B], Solid state phenomena : SSP*. 162: 295.
- Lim, Su Pei; et al. (2014). Enhanced Photovoltaic Performance of Silver@Titania Plasmonic Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells. *RSC Adv*. 4.

- Meagher, E. P.; & Lager, G. A. (1979). *Polyhedral Thermal Expansion in the Tio₂ Polymorphs: Refinement of the Crystal Structures of Rutile and Brookite at High Temperature Sample at 425 Degrees C.* Retrieved
- Mor, G. K.; et al. (2005). Enhanced Photocleavage of Water Using Titania Nanotube Arrays. *Nano letters*. 5(1): 191-195.
- Mor, G. K.; et al. (2006). A Review on Highly Ordered, Vertically Oriented Tio₂ Nanotube Arrays: Fabrication, Material Properties, and Solar Energy Applications. *SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS*. 90(14): 2011-2075.
- Nair, A. Sreekumaran; et al. (2011). A Simple Recipe for an Efficient Tio₂ Nanofiber-Based Dye-Sensitized Solar Cell. *Journal of Colloid and Interface Science Journal of Colloid and Interface Science*. 353(1): 39-45.
- Nakata, Kazuya; & Fujishima, Akira. (2012). Tio₂ Photocatalysis: Design and Applications. *JPR Journal of Photochemistry & Photobiology, C: Photochemistry Reviews*. 13(3): 169-189.
- Natda, Wetchakun. (2008). Synthesis and Characterization of Transition Metal Ion Doping on the Photocatalytic Activity of Tio₂ Nanoparticles. *International Nanoelectronics Conference*. 43-47.
- (2012). Wastewater Treatment Applications of Tio₂ by Photocatalysis *Energy & Environment*. 38(221): 53-55.
- Nattaya, Comsup. (2016). Effect of Non-Metal Doping on the Visible Light Photocatalytic Activity of Titanium Dioxide. *KKU Science Journal*. 44: 164-174.
- O'Regan, Brian; & Grätzel, Michael. (1991). A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal Tio₂ Films. *Nature Nature*. 353(6346): 737-740.
- Oh, Kiseok; Lee, Kiyoun; & Choi, Jinsub. (2017). Influence of Geometry and Crystal Structures of Tio₂ Nanotubes on Micro Vickers Hardness. *MLBLUE Materials Letters*. 192: 137-141.
- Panritdam, Hataitip. (2556). Synthesis of Titanium Dioxide Nanoparticles for Anti-Fungi Causing Leaf Fall of Rubber Tree. *Prince of Songkla University*.
- Park, J. H.; Kim, S.; & Bard, A. J. (2006). Novel Carbon-Doped Tio₂ Nanotube Arrays with

- High Aspect Ratios for Efficient Solar Water Splitting. *Nano letters*. 6(1): 24-28.
- Park, Kyung-Hee; et al. (2009). Effects of Hno₃ Treatment of Tio₂ Nanoparticles on the Photovoltaic Properties of Dye-Sensitized Solar Cells. *MLBLUE Materials Letters*. 63(26): 2208-2211.
- Patricio, Mendez; & Goetz, Dapp. (2012). Microscopy.
<https://sites.ualberta.ca/~ccwj/teaching/microscopy>
- Paulose, M.; et al. (2006). Unprecedented Ultra-High Hydrogen Gas Sensitivity in Undoped Titania Nanotubes. *Nanotechnology*. 17(2): 398-402.
- Peng, Xiao; et al. (2007). Tio₂ Nanotube Arrays Fabricated by Anodization in Different Electrolytes for Biosensing. *Electrochemistry Communications*. 9(9): 2441-2447.
- Pronk, MEJ; et al. (2009). Nanomaterials under Reach: Nanosilver as a Case Study. *National Institute for Public Health and the Environment*. 601780003: 105-132.
- Randy, Nessler. Scanning Electron Microscopy.
<https://cmrf.research.uiowa.edu/scanning-electron-microscopy>
- Regonini, D.; et al. (2012). Factors Influencing Surface Morphology of Anodized Tio₂ Nanotubes. *Electrochim Acta Electrochimica Acta*. 74: 244-253.
- Rungnapa, Tongpool; et al. (2006). Dye Sensitized Solar Cell (Dssc). *National Metal and Materials Technology Center*.
- S., Gurunathan; et al. (2015). Comparative Assessment of the Apoptotic Potential of Silver Nanoparticles Synthesized by Bacillus Tequilensis and Calocybe Indica in Mda-Mb-231 Human Breast Cancer Cells:Targeting P53 for Anticancer Therapy. *International Journal of Nanomedicine*. 10.2147(S83953): 4203–4222.
- Shane, Beck. (1998). Across the Spectrum: Instrumentation for Uv/Vis Spectrophotometry. *The scientist exploring life, inspiring innovation*.
<https://www.the-scientist.com/technology-profile/across-the-spectrum-instrumentation-for-uvvis-spectrophotometry-57141>
- Sorachon, Yoriya. (2011). Titanium Dioxide Nanotube. *National Science and Technology Development Agency*. 14-19.

Srinarin, Pimprasert. (2004). Science News.

http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=669&Itemid=4

Su, Zixue; & Zhou, Wuzong. (2011). Formation, Morphology Control and Applications of Anodic TiO_2 Nanotube Arrays. *Journal of Materials Chemistry*. 21(25): 8955-8970.

Sun, Lidong; et al. (2009). Effect of Electric Field Strength on the Length of Anodized Titania Nanotube Arrays. *JEC Journal of Electroanalytical Chemistry*. 637(1-2): 6-12.

Sun, Lidong; et al. (2010). Effect of the Geometry of the Anodized Titania Nanotube Array on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Nanosci. Nanotech. Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 10(7): 4551-4561.

Supachai, Junkaew. (2009). Effect of Zinc Phthalocyanine Sensitizer on Dye-Sensitized Solar Cells Efficiency. *Chiang Mai University*.

Tang, Y. B.; et al. (2010). Incorporation of Graphenes in Nanostructured TiO_2 Films Via Molecular Grafting for Dye-Sensitized Solar Cell Application. *ACS Nano ACS Nano*. 4(6): 3482-3488.

Technology, MonoSun. (2020). การทำงานของแผ่นโซลาร์เซลล์.
<https://monosun.net/th/author/monosunadmin/>

Thongsuwan, W.; Kumpika, T.; & Singjai, P. (2008). Photocatalytic Property of Colloidal TiO_2 Nanoparticles Prepared by Sparking Process. *Current Applied Physics*. 8(5): 563-568.

Tian, Zhengrong R.; et al. (2003). Large Oriented Arrays and Continuous Films of TiO_2 -Based Nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*. 125: 12384-12385.

Tsai, Chien-Cheng; Chu, Yen-Yu; & Teng, Hsisheng. (2010). A Simple Electrophoretic Deposition Method to Prepare TiO_2 -Based Nanoribbon Thin Films for Dye-Sensitized Solar Cells. *TSF Thin Solid Films*. 519(2): 662-665.

Wang, X.; et al. (2014). Ultralong, Small-Diameter TiO_2 Nanotubes Achieved by an Optimized Two-Step Anodization for Efficient Dye-Sensitized Solar

- Cells. *ACS applied materials & interfaces*. 6(3): 1361-1365.
- Werasak, Udomkichdecha. (2000). Research Instrument for Materials. *Chulalongkorn university*.
- Wu, G.; et al. (2008). Synthesis of F-Doped Flower-Like TiO_2 Nanostructures with High Photoelectrochemical Activity. *LANGMUIR*. 24(7): 3503-3509.
- Xie, Y. (2011). Preparation and Capacitance Properties of Titania Nanotube Arrays. *Adv. Mater. Res. Advanced Materials Research*. 148-149: 912-915.
- Xu, C.; et al. (2010). Ordered TiO_2 Nanotube Arrays on Transparent Conductive Oxide for Dye-Sensitized Solar Cells. *Chem. Mater. Chemistry of Materials*. 22(1): 143-148.
- Yang, D.; et al. (2015). Synthesis of Ag/TiO_2 Nanotube Heterojunction with Improved Visible-Light Photocatalytic Performance Inspired by Bioadhesion. *J. Phys. Chem. C Journal of Physical Chemistry C*. 119(11): 5827-5835.
- Yang, H.; & Pan, C. (2010). Diameter-Controlled Growth of TiO_2 Nanotube Arrays by Anodization and Its Photoelectric Property. *J Alloys Compd Journal of Alloys and Compounds*. 492(1-2): L33-L35.
- Yongbon-dong; et al. (2010). Photovoltaic Properties of TiO_2 Photoelectrode Prepared by Using Liquid Peg-Eem Binder. *Surface Review and Letters*. 17(1): 15-20.
- Yu, Choongho; & Park, Jongbok. (2010). Thermal Annealing Synthesis of Titanium-Dioxide Nanowire-Nanoparticle Hetero-Structures. *YJSSC Journal of Solid State Chemistry*. 183(10): 2268-2273.
- Zhang, He; et al. (2016). Fabrication and Supercapacitive Performance of Long Anodic TiO_2 Nanotube Arrays Using Constant Current Anodization. *ELECOM Electrochemistry Communications*. 68: 23-27.
- Zhu, K.; et al. (2007). Removing Structural Disorder from Oriented TiO_2 Nanotube Arrays: Reducing the Dimensionality of Transport and Recombination in Dye-Sensitized Solar Cells. *Nano letters*. 7(12): 3739.
- Zwilling, V.; Aucouturier, M.; & Darque-Ceretti, E. (1999). Anodic Oxidation of Titanium and Ta6v Alloy in Chromic Media. An Electrochemical Approach. *Electrochimica*

acta. 45(6): 921.

- กระทรวงพลังงาน. (2019). เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell). กองพัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่าย
แผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- เครื่องาม, ดุสิต. (2010). ความรู้พื้นฐานเซลล์แสงอาทิตย์.
- ธรรมเจริญ, กมลวรรณ. (2012). การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
(Dye-Sensitized Solar Cell, Dssc). ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- พรหมอารักษ์, วินิช; et al. (2007). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar
Cells, Dsscs). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2: 14-31.
- รุ่งนเกียรติ, นวลฉวี. (2545). วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รุ่งนภา ทองพูล; et al. (2006). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- เรืองทวีป, ยศกิต. (2016). การเพิ่มประสิทธิภาพผลผลิตทางแสงในช่วงตามองเห็นของแก้วที่เติม
ธาตุหายากโดยใช้อนุภาคนาโน. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- รวารุณี. (2015). เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual2/solar-cell/index.html>
- ศรีสมานวัตร, ชัยวัฒน์. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแผ่นเคลือบ.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สามารถ มูลน้อย; & อินทนิเวศน, อัครินทร์. (2015). การทดสอบความเหมาะสมของการใช้งาน
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริง. การประชุมสัมมนา
เชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8.
- สุรมิตร, ทรวงุณี. (2011). การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและอิเล็กทรอนิกส์ของสีย้อมไวแสงสำหรับ
เซลล์แสงอาทิตย์อนุพันธ์โพลิโกเมอร์พาราฟีนิลีนไวนิลีนคาร์บอกซิลิกแอซิดด้วยเทคนิค
การคำนวณทางทฤษฎีและการทดลอง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- แสนทวีสุข, สุรศักดิ์. (2010). การทำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยอิเล็ก
โทรไลต์กึ่งของแข็ง. มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร.
- (2015). การพัฒนาต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงอิเล็กโทรไลต์ สถานะของแข็งโดย
ไม่ต้องใช้ Clean Room. มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร.
- อนุรักษฐานนท์, วิชัย. อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. พิสิษฐราชมงคล.
- อุดมพร, อรวรรณ. (2005). การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของสารละลายของแข็ง Bao-Zeo.

15.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พลอยหยก นาคปาน
วัน เดือน ปี เกิด	20/09/36
สถานที่เกิด	ยะลา
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา อัญมณีและเครื่องประดับ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	98/273 คอนโด PG พระราม 9 อาคาร B ถ.พระราม 9 แขวง ห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310

