

สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2561

สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต



ปริญญานิพนธ์
ของ
อรนภา เกลาฉืด

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2561

อรนภา เกลาฉิด. (2561). สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทองจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต. ปรินญาณิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
อาจารย์ที่ปรึกษาปรินญาณิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารียา เอี่ยมบุญ,
อาจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล.

ในงานวิจัยนี้ เส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไฮโดรโพรพอกไซด์เป็นสารตั้งต้น และใช้ทองคลอไรด์ไฮเดรทเป็นสารตั้งต้นในการเจือทอง ซึ่งทองถูกเจือในปริมาณ 0.010 - 0.030 กรัม จากนั้นนำเส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทองที่ปั่นได้ มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างผลึกของเส้นใยเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบออสณฐานเป็นโครงสร้างผลึกเฟสอะนาเทส กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องวิเคราะห์ธาตุเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และ เครื่องตรวจวัดสารด้วยการสะท้อนแสง ถูกนำมาใช้ในการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใยที่ปั่นได้ ผลจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง เป็นเส้นยาวต่อเนื่องแบบไม่หักทอ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80-150 นาโนเมตร ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง พบว่ามีอนุภาคทองอยู่ภายในเส้นใย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-29 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน พบว่ามีอนุภาคทองอยู่ในเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ที่ปั่นได้มีโครงสร้างผลึกแบบออสณฐาน หลังจากการให้ความร้อนเส้นใยจะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นเฟสอะนาเทส และพบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคทอง ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยเครื่องตรวจวัดสารด้วยการสะท้อนแสงสามารถหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยได้ โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎี Kubelka-Munk จากการศึกษพบว่าแถบช่องว่างพลังงานแคบลงจาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ของเส้นใยไทเทเนียมเป็น 3.08 อิเล็กตรอนโวลต์ของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง

PHYSICAL PROPERTIES OF GOLD-DOPED TITANIA ELECTROSPUN FIBERS



AN ABSTRACT
BY
ONNAPA KLAOCHEED

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
May 2018

Onnapa Klaocheed. (2018). *Physical Properties of Gold-Doped Titania Electrospun Fibers*. Master's thesis, M.Sc. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Areeya Aeimbhu, Dr. Panitarn Wanakamol.

In this study, titania fibers (TFs) and gold-doped titania fibers (Au-TFs) were synthesized via the electrospinning process. Titanium tetraisopropoxide was used as a titanium precursor while gold (III) chloroauric hydrate was used as the source for gold doping. The gold dopant varied from 0.010 g to 0.030 g. The as-spun TFs and Au-TFs fibers were heated for 450°C for one hour in order to convert the as-prepared amorphous structure to the anatase phase. A Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM), Energy Dispersion X-ray Spectrometer (EDX), X-ray Diffractometer (XRD), Transmission Electron Microscope (TEM) and UV-Vis spectrophotometer (UV-Vis) were employed to characterize the fibers. As observed via FE-SEM, the TFs and Au-TFs appeared as continuous non-woven fibers, with fiber diameters in the range of 80-150 nm. TEM images of Au-TFs revealed that gold nanoparticles were incorporated to the fibers, whose size was in the range of 4-29 nm. The EDX results also confirmed the existence of Au in Au-TFs fibers. From the XRD analysis, as-spun TFs and Au-TFs were amorphous. After the heat treatment, the as-spun fibers were transformed into anatase and gold diffraction pattern was also detected. The Kubelka-Monk method was applied to UV-Vis reflection data, and energy gaps were obtained (E_g) for the fibers. A narrowing of the band gap from 3.2 eV for TFs fibers to approximately 3.08 eV for the Au-TFs was also observed.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
ของ
อรนภา เกลาฉืด

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2561

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาริยา เอี่ยมบู่)

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. นราธิป วิทยากร)

.....ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาริยา เอี่ยมบู่)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปวิภาณ อุทัยรัตน์)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย

จาก

งบประมาณเงินรายได้ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประจำปีงบประมาณ 2561

ประเภท ทุนการศึกษานับสนุนการเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานของนิสิตบัณฑิตศึกษา

รหัส GRAD S-3-61

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการให้การส่งเสริมสนับสนุนจาก คุณพ่อองอาจ เกลาณีต และ คุณแม่วัลภา เกลาณีต ผู้ซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเป็นอย่างดีตลอดการศึกษาและดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารียา เอี่ยมบุ๋ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและให้ คำแนะนำ ตลอดการทำงานวิจัย อีกทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้ ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ อุทัยรัตน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็น กรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และได้ให้คำแนะนำแก้ไขให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นราธิป วิทยากร จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และได้ ให้คำแนะนำแก้ไขให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

และขอขอบคุณ คุณน้อย หาบ้านแท่น คุณกรรณพร วงษ์งาม และ คุณเสริมสุข รัตเร่ง เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ผู้ให้การอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ดำเนินการทดลอง

อรนภา เกลาณีต

สารบัญ

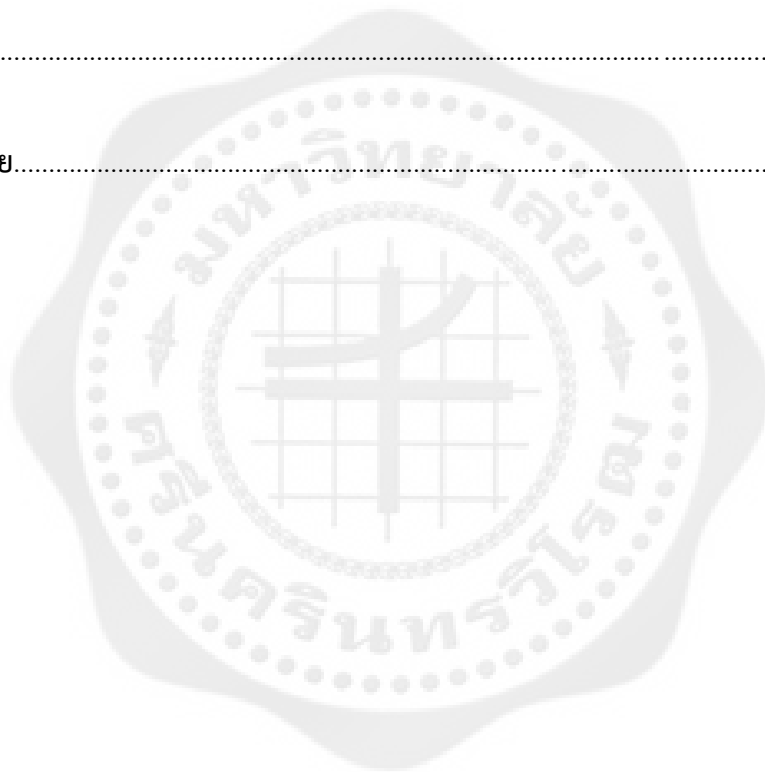
บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide: TiO_2).....	4
ทองคำ (Gold).....	6
ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	7
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	8
ทฤษฎี Kubelka และ Munk.....	11
กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process).....	16
การสังเคราะห์เส้นใยขนาดเล็กด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process).....	19
หลักการทำงานของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	20
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM).....	20
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM).....	25
เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX).....	27
เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	27
การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD).....	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	35
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัย.....	36
สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	37
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
4 ผลการวิจัย.....	40
ผลการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง.....	40
ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง....	41
ลักษณะสัณฐานของเส้นใย A-0 และเส้นใย A-450.....	41
ลักษณะสัณฐานของ Au-TFs.....	41
ผลการศึกษาขนาดของ TFs และ Au-TFs.....	44
ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ.....	45
การวิเคราะห์ธาตุของ TFs และ Au-TFs	45
การวิเคราะห์ธาตุโดยการกระจายของธาตุแบบแผนที่ (Mapping).....	46
ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของทองในเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง.....	52
ลักษณะสัณฐานทอง ใน Au-TFs	52
ผลการศึกษาขนาดของทอง ใน Au-TFs.....	55
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	56
โครงสร้างผลึกของ TFs และ Au-TFs ก่อนการเผา.....	56
โครงสร้างผลึกของ TFs และ Au-TFs หลังการเผา.....	60
ผลของทองที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงาน.....	64
ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TFs และ Au-TFs ก่อนการเผา.....	66
ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TFs และ Au-TFs หลังการเผา.....	72

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัย.....	78
สรุปผลการวิจัย.....	78
ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก.....	90
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	100



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมบัติต่างๆ ของไทเทเนียมที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน.....	5
2 สมบัติต่างๆ ของทอง.....	6
3 การกำหนดชื่อตัวอย่างชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้.....	40
4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ TFs และ Au-TFs.....	44
5 ผลการวิเคราะห์ธาตุของ TFs และ Au-TFs.....	45
6 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยเจือปนไอซ์ต่างๆ.....	65



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างผลึกไทเทเนีย.....	5
2 โครงสร้างผลึกของทองคำ (แบบ Face Centered Cubic: FCC).....	6
3 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($T=0$ เคลวิน).....	7
4 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ($T>0$ เคลวิน).....	8
5 การดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน.....	9
6 วัฏจักรการดูดกลืนและการเปล่งแสง.....	10
7 ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
8 การสะท้อนแสงและความเข้มข้น.....	12
9 แผนภาพแสดงกระบวนการโซล-เจล.....	17
10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและความแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไฮเลน.....	18
11 โครงสร้างไทเทเนีย (TiO_2) จากไฮโดรไลซิสและความแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไฮเลน.....	18
12 หลักการพื้นฐานกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต.....	20
13 แผนภาพอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	21
14 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งกับเครื่องมือจุล-วิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์.....	22
15 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากลำอิเล็กตรอนกระทบกับชิ้นงาน.....	23
16 แผนภาพอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	26
17 แผนภาพอย่างง่ายของเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง.....	28
18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก.....	30
19 ลักษณะสัญญาณจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ A-0 และ A-450.....	42
20 ลักษณะสัญญาณจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ B-0 และ B-450.....	42
21 ลักษณะสัญญาณจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ C-0 และ C-450.....	42
22 ลักษณะสัญญาณจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ D-0 และ D-450.....	43

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ E-0 และ E-450.....	43
24 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ F-0 และ F-450.....	43
25 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ A-0.....	46
26 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ A-450.....	46
27 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ B-0.....	47
28 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ B-450.....	47
29 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ C-0.....	48
30 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ C-450.....	48
31 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ D-0.....	49
32 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ D-450.....	49
33 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ E-0.....	50
34 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ E-450.....	50
35 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ F-0.....	51
36 แผนภาพการกระจายของธาตุ (Mapping) ของ F-450.....	51
37 ลักษณะของ A-0 และ A-450 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	53
38 ขนาดทองของ B-0 และ B-450 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	53
39 ขนาดทองของ C-0 และ C-450 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	53
40 ขนาดทองของ D-0 และ D-450 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	54
41 ขนาดทองของ E-0 และ E-450 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	54
42 ขนาดทองของ F-0 และ F-450 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	54
43 ขนาดทอง ของ Au-TFs ก่อนการเผา.....	55
44 ขนาดทอง ของ Au-TFs หลังการเผา.....	55
45 XRD pattern ของ A-0.....	57
46 XRD pattern ของ B-0.....	57
47 XRD pattern ของ C-0.....	58
48 XRD pattern ของ D-0.....	58
49 XRD pattern ของ E-0.....	59

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
50 XRD pattern ของ F-0.....	59
51 XRD pattern ของ A-450.....	61
52 XRD pattern ของ B-450.....	61
53 XRD pattern ของ C-450.....	62
54 XRD pattern ของ D-450.....	62
55 XRD pattern ของ E-450.....	63
56 XRD pattern ของ F-450.....	63
57 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$	66
58 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$	66
59 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$	67
60 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$	67
61 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$	68
62 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$	68
63 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-0 กรณี $n=2$	69
64 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-0 กรณี $n=2$	69
65 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-0 กรณี $n=2$	70
66 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-0 กรณี $n=2$	70
67 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-0 กรณี $n=2$	71
68 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-0 กรณี $n=2$	71
69 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$	72
70 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$	72
71 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$	73
72 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$	73

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
73 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$	74
74 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$	74
75 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-450 กรณี $n=2$	75
76 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-450 กรณี $n=2$	75
77 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-450 กรณี $n=2$	76
78 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-450 กรณี $n=2$	76
79 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-450 กรณี $n=2$	77
80 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-450 กรณี $n=2$	77



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

เส้นใยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TNFs) หรือ เส้นใยนาโนไทเทเนีย สามารถสังเคราะห์โดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process) โดยเส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะและขนาดเส้นใยที่หลากหลาย กระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีข้อดี คือ มีกระบวนการเตรียมเส้นใยที่ไม่ยุ่งยาก⁽¹⁾

ในปัจจุบันมีการศึกษาและประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนไทเทเนียใช้งานในด้านต่างๆ⁽²⁾ เช่น กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอาทิตย์ (Solar photocatalytic)⁽³⁻⁷⁾ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible light photocatalytic)⁽⁸⁻¹⁵⁾ ส่วนประกอบในแบตเตอรี่ (Lithium-ion batteries)⁽¹⁶⁻²⁰⁾ เครื่องมือตรวจวัด (Sensors)^(21,22) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)⁽²³⁻²⁸⁾ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells)^(29,30) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors)⁽³¹⁾

ด้วยเส้นใยไทเทเนียสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ดังที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นใยนาโนไทเทเนียให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานเฉพาะด้าน จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยนาโนไทเทเนีย ซึ่งการเติมสารเจือปนเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มสมบัติของเส้นใยนาโนไทเทเนียได้ สารเจือปนที่นำมาเติมในเส้นใยนาโนไทเทเนีย แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่ใช่โลหะทรานซิชัน เช่น ไนโตรเจน (N)⁽⁹⁾ ลิเทียม (Li) แคลเซียม (Ca)⁽³²⁾ อินเดียม (In)⁽¹⁰⁾ และกลุ่มโลหะทรานซิชัน เช่น รูทีเนียม (Ru)⁽³³⁾ ไนโอเบียม (Nb)⁽¹⁹⁾ ทองแดง (Cu)^(6,34) แพลทินัม (Pt)⁽⁷⁾ เงิน (Ag)^(5,16) ทอง (Au)^(3,16)

แพลทินัม เงิน และทอง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี แต่โลหะกลุ่มนี้เป็นกลุ่มโลหะมีค่า ราคาค่อนข้างสูง เพื่อให้มีต้นทุนที่ต่ำกว่า การนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงอยู่ในรูปแบบของสารเจือปนในสารตัวอื่นที่มีราคาถูก และจัดหาได้ง่ายกว่า เช่น ซิลิกา ไทเทเนีย ตัวอย่างเช่น การศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียเจืออนุภาคทอง⁽³⁵⁾ และการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนียเจืออนุภาคทอง⁽³⁶⁾ เพื่อศึกษาผลของทองที่มีต่อสมบัติการดูดกลืนแสง พบว่าชิ้นงานที่ไม่เจืออนุภาคทอง มีอัตราการดูดกลืนแสง (Absorbance) ต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเจืออนุภาคทอง แต่กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียเจืออนุภาคทองและการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนียเจืออนุภาคทอง ได้จากกระบวนการเตรียมชิ้นงานแล้ว

ใช้วิธีการจุ่มชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ลงในสารละลายที่มีส่วนผสมของทอง จึงได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเกาะที่ผิวของชิ้นงาน

ดังนั้น งานวิจัยนี้สนใจศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยเตรียมสารตั้งต้นที่เจือด้วยทองก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการปั่นโดยไฟฟ้าสถิต

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. สังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ศึกษาลักษณะสัณฐาน (Morphology) ของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystal structure) ของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
5. ศึกษาขนาดอนุภาคทองที่เจือในเส้นใยไทเทเนียม
6. ศึกษาผลของทองที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง

ความสำคัญของการวิจัย

การสังเคราะห์และวิเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ทำให้ทราบถึงผลของทองที่มีต่อลักษณะสัณฐานและการตอบสนองทางแสงของเส้นใย ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงที่ดีขึ้น

ขอบเขตของการวิจัย

1. สังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)
3. วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ด้วยเครื่องเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray: EDX)
4. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกในเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffactometer: XRD)

5. ศึกษาขนาดของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM)

6. ศึกษาผลของทองที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
2. ทราบลักษณะสัณฐานของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
3. ทราบธาตุองค์ประกอบในเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
4. ทราบโครงสร้างผลึกของเส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
5. ทราบขนาดของทองในเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง
6. ทราบผลของทอง ที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

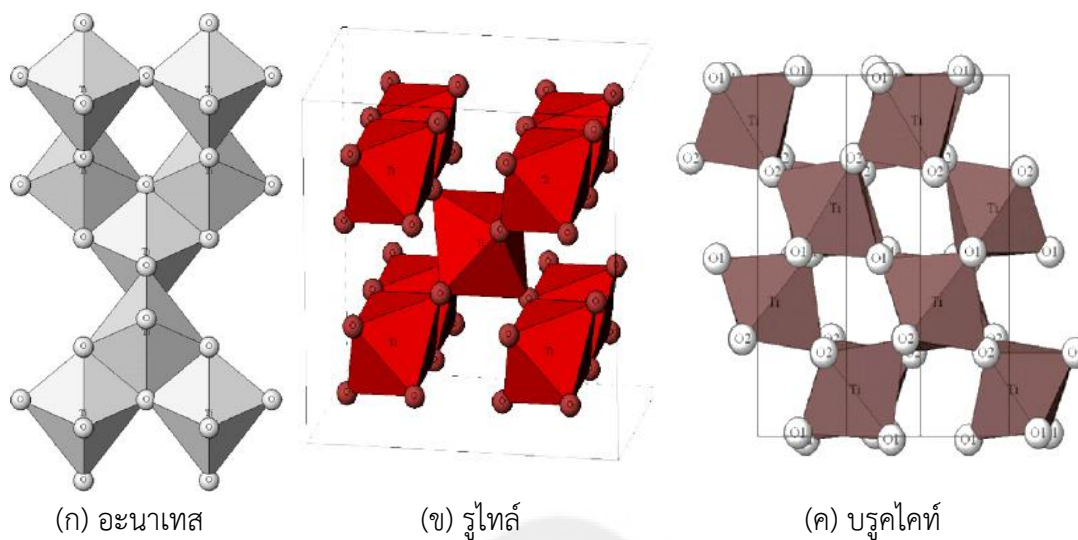
ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้เสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide: TiO_2)
2. ทองคำ (Gold)
3. ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ
4. การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ
5. ทฤษฎี Kubelka และ Munk
6. กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process)
7. การสังเคราะห์เส้นใยขนาดเล็กด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process)
8. หลักการทำงานของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide: TiO_2)⁽³⁷⁻³⁹⁾

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) หรือ ไทเทเนีย (Titania) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ลักษณะทั่วไปมีสีขาว ทึบแสง ไม่มีกลิ่น สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นสารไม่มีพิษ ราคาถูก ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรดต่างได้ดี ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทั้งทางด้านอาหาร ยา สี อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สารเคลือบผลิตภัณฑ์ การบำบัดมลพิษ และเครื่องสำอาง

ไทเทเนีย ประกอบด้วยไอออนไทเทเนีย (Ti^{4+}) จับตัวกับ 6 ไอออนออกซิเจน (O^{2-}) แบบออกตะฮีดรอล (Octahedral: TiO_6^{2-}) แบ่งตามลักษณะโครงสร้างผลึกได้ 3 ลักษณะ คือ อะนาเทส (Anatase) เสถียรภาพที่อุณหภูมิต่ำ รูไทล์ (Rutile) เสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง และบรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งแต่ละลักษณะมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 1 โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานและสมบัติเฉพาะอื่นๆ ต่างกัน ดังตาราง 1



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียม⁽⁴⁰⁾

(ก) อะนาเทส และ (ข) รูไทล์ โครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

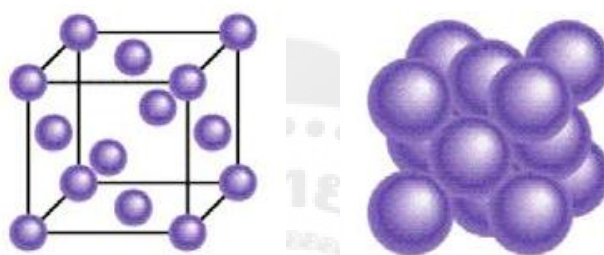
(ค) บรูคไคท์ โครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)

ตาราง 1 สมบัติต่างๆ ของไทเทเนียมที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน⁽⁴¹⁾

คุณสมบัติของ ไทเทเนียม	โครงสร้างผลึก		
	อะนาเทส	รูไทล์	บรูคไคท์
โครงสร้าง	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
มุมพันธะ O-Ti-O	81.2° 90.0°	77.7° 92.6°	77.0°~105°
อะตอมต่อหน่วยเซลล์	4	2	8
ปริมาตรหน่วยเซลล์ (nm ³)	0.1363	0.0624	0.2575
ความหนาแน่น (kg/m ³)	3894	4250	4120
แถบช่องว่างพลังงาน (eV)	3.2	3.0	1.9
ดูดกลืนความยาวคลื่น (nm)	~387	~413	~650
จุดหลอมเหลว (°C)	เปลี่ยนเป็นรูไทล์	1830 - 1850	เปลี่ยนเป็นรูไทล์

2. ทองคำ (Gold)⁽⁴²⁾

ทองคำ (Au) มาจากคำภาษาละติน "Aurum" แปลว่า "ทอง" ลักษณะที่พบโดยทั่วไปนั้น มีหลายลักษณะ เป็นเกร็ด เม็ดกลมแบน หรือมีลักษณะเป็นก้อน มีเนื้อแน่นอาจมีรูปร่างยาวแตกกิ่งก้านสาขาคลายกิ่งไม้ และมักจะมีหน้าผลักไม่สมบูรณ์ โครงสร้างผลึกอยู่ในระบบไอโซเมตริก (Isometric system) แบบลูกเต๋า (Cube) ดังภาพประกอบ 2 มีทั้งสีเหลืองเข้มหรืออ่อนจาง มีความวาวแบบโลหะ มีความแข็งตามมาตรฐานของโมห์¹ 2.5 - 3⁽⁴³⁾ มีค่าความถ่วงจำเพาะ อยู่ระหว่าง 15.6 - 19.3 สมบัติต่างๆ ของทอง ดังแสดงในตาราง 2



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างผลึกของทอง (แบบ Face Centered Cubic: FCC)⁽⁴⁴⁾

ตาราง 2 สมบัติต่างๆ ของทอง

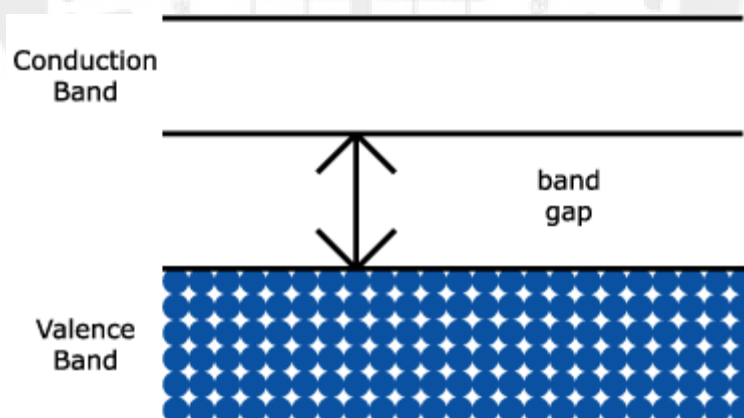
สมบัติ	
น้ำหนักอะตอม (Atomic Mass Unit: amu)	196.97
เลขอะตอม	79
จุดหลอมเหลว (°C)	1603
จุดเดือด (°C)	2860
โครงสร้างผลึก	FCC
ความหนาแน่น (g/cm ³)	19.3
การนำความร้อน (W m ⁻¹ K ⁻¹)	310
ความต้านทานไฟฟ้า (micro-ohm m) ที่ 20 °C	0.022

¹ ความแข็งแบบโมห์สเกล (Moh's hardness scale) เป็นการทดสอบเชิงคุณภาพ (Qualitative) ทำให้ได้ความแข็งโดยประมาณของวัสดุ โดยใช้เกณฑ์อ้างอิงตั้งขึ้น กล่าวคือ กำหนดให้ความแข็งที่ต่ำที่สุดเป็น 1 ไปสู่ความแข็งสูงสุดเป็น 10

3. ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ^(45,46)

การศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในกรณีที่อยู่ในสนามศักย์แบบคาบ เริ่มจากการพิจารณาอะตอมที่อยู่โดดเดี่ยว อิเล็กตรอนในอะตอมนั้นจะมีค่าระดับพลังงานแบบกระโดดไม่ต่อเนื่อง แต่เมื่อมีอะตอมจำนวน N อะตอม เข้ามาอยู่ใกล้กัน เช่นในโครงสร้างผลึก พลังงานศักย์ของอะตอมแต่ละอะตอมจะได้รับอิทธิพลจากอะตอมข้างเคียง เกิดอันตรกิริยาระหว่างอะตอม เป็นผลทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนออกเป็น N ระดับ ซึ่งมีหลายค่าและเรียงตัวกันเป็นแถบ ช่วงแถบที่มีอิเล็กตรอนเรียงกันอยู่ เรียกว่า แถบพลังงานยินยอม (Allowed energy band) ซึ่งจะมีแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden band) กั้นกลางระหว่างแถบพลังงานยินยอม หรือเรียกว่า แถบช่องว่าง (Band gap: E_g) บริเวณนี้จะไม่มียอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแถบพลังงานยินยอม

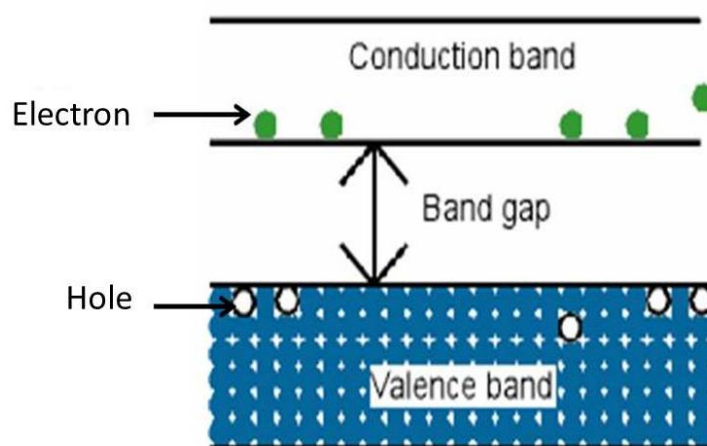
โครงสร้างแถบพลังงานยินยอมประกอบด้วย แถบบนสุดเรียกว่า แถบการนำไฟฟ้า หรือแถบการนำ (Conduction band: CB) แถบนี้จะเป็นบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอน (Empty band) แถบถัดจากแถบการนำ คือ แถบพลังงานต้องห้าม และแถบล่างสุด เรียกว่า แถบเวเลนซ์ (Valence band: VB) แถบนี้จะเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน (Filled band) ดังภาพประกอบ 3 ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0$ เคลวิน) แถบการนำจะปราศจากอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะอยู่เฉพาะในแถบเวเลนซ์เท่านั้น ทำให้สถานะของสารกึ่งตัวนำเป็นฉนวนทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($T=0$ เคลวิน)⁽⁴⁷⁾

เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T>0$ เคลวิน) อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานความร้อนหรือพลังงานจากโฟตอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) เมื่อเสียอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์เกิดเป็นช่องว่าง เรียกว่า โฮล (Hole) จำนวนโฮลที่เกิดขึ้นจะเท่ากับอิเล็กตรอนที่กระโดดไปยังแถบการนำไฟฟ้า หากการกระตุ้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนก็จะกระโดด

ไปยังแถบการนำอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน เป็นผลให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ($T > 0$ เคลวิน)⁽⁴⁸⁾

4. การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ⁽⁴⁵⁾

การเปล่งแสง เกิดจากการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนในแถบชั้นพลังงานแล้วคายแสงออก เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน โดยที่ค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนและคายออกมา ถ้าฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดพาหะใหม่ขึ้น ส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้น หรือเรียกว่าปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง (Photo-conductive effect) อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองกับโฟตอนของแสงนั้น

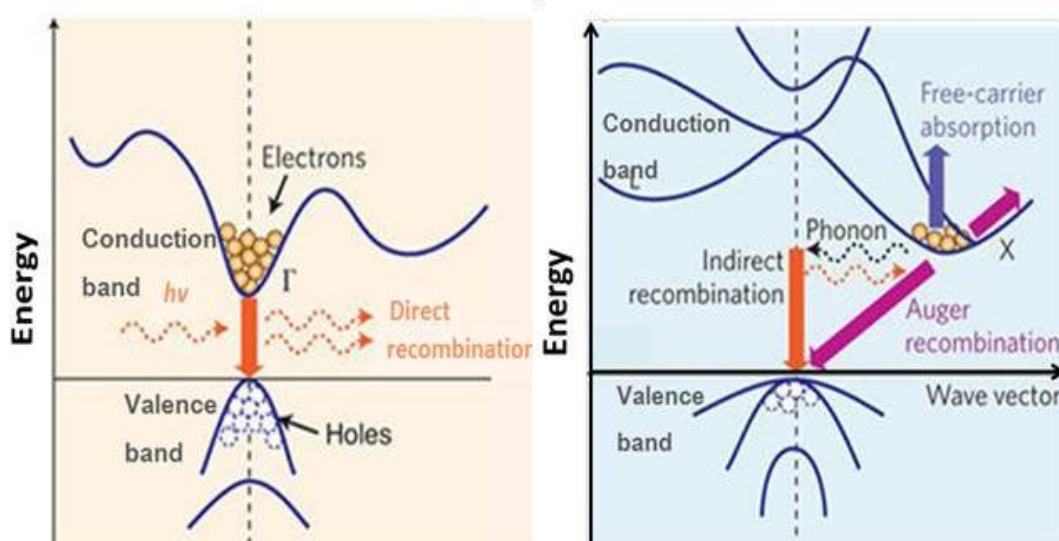
ชนิดของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

- การดูดกลืนภายในแถบพลังงานเดียวกัน (Intraband absorption) ได้แก่ การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระ (Free carrier absorption) เนื่องจากอิเล็กตรอนภายในแถบ พลังงานเดียวกันถูกเร่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ดูดกลืนโฟตอนและเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นเป็นสถานะกระตุ้น

- การดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน (Interband absorption) แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การดูดกลืนแสงแบบตรง (Direct absorption) และการดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง (Indirect absorption) ดังภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่อีกแถบพลังงานหนึ่ง ลักษณะมีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและค่าความแตกต่างของ

ระดับพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานของโฟตอนแสงที่เป็นตัวกระตุ้น เรียกว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน

- การดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงานและสถานะพลังงานเฉพาะ ได้แก่ การดูดกลืนแสงของสารเจือปน (Impurity absorption) และการดูดกลืนของเอกซิตอน (Exciton absorption)
- การดูดกลืนแสงระหว่างสถานะพลังงานเฉพาะ ได้แก่ การดูดกลืนของคู่ผู้ให้-ผู้รับ (D-A pair absorption)



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 5 การดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน (49)

(ก) การดูดกลืนแสงแบบตรง (Direct absorption)

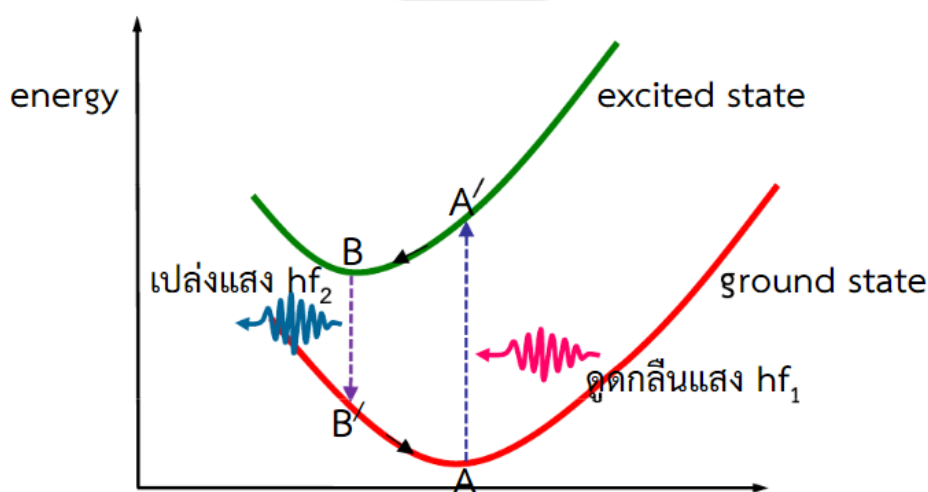
(ข) การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง (Indirect absorption)

ระดับพลังงานของสถานะพื้น (Ground state) คือสถานะปกติ ยังไม่มีการกระตุ้นอิเล็กตรอน และสถานะกระตุ้น (Excited state) คือสถานะของอิเล็กตรอน เมื่อวัสดุดูดกลืนแสงอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนจากระดับพลังงานต่ำสุด คือ A ไปสู่ระดับพลังงาน A' จากทฤษฎีของแฟรงค์-คอนดอน (Frank-Condon) กล่าวว่า “การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน อันเนื่องจากการดูดกลืนแสง ใช้เวลาสั้นกว่าคาบการสั่นของโครงผลึกมาก ดังนั้นตำแหน่งศูนย์กลางการเปล่งแสง (Luminescence center) นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน”

อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีช่วงเวลายาวกว่าเวลาผ่อนคลาย (Relaxation time) ของการสั่นของโครงสร้างผลึก ฉะนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นก็จะถ่ายเทพลังงานให้กับโครงผลึกแล้วเคลื่อนตำแหน่งไปที่ B จากนั้น อิเล็กตรอนจะลดระดับพลังงานด้วยการเปล่งแสง ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยน

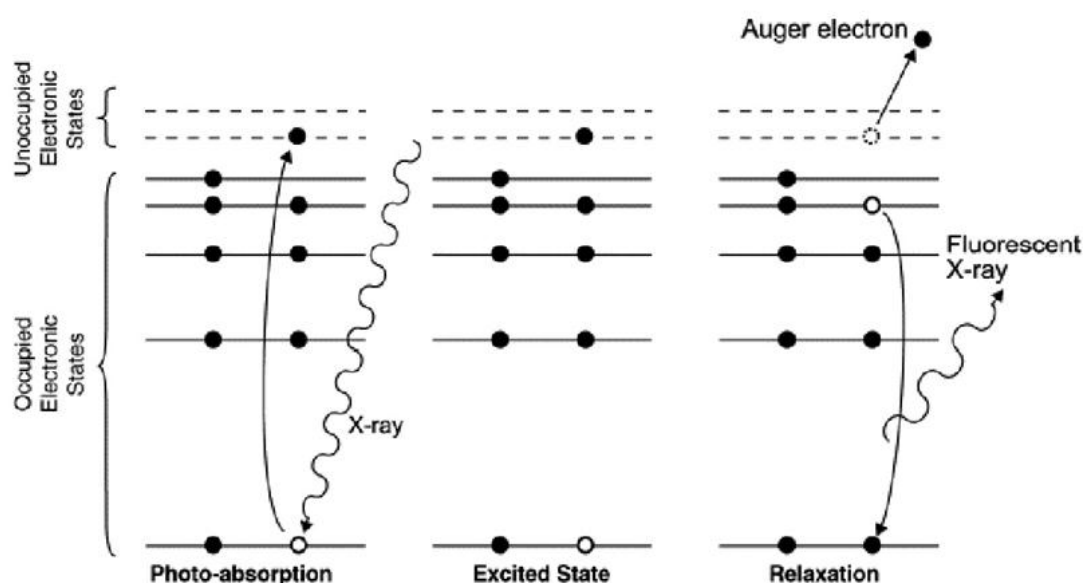
สถานะของอิเล็กตรอนจาก B ไปสู่ B' เมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานลงมาที่ B' ก็คายพลังงาน โฟตอนให้โครงผลึกอีกครั้งและเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ A ตามเดิม

ในช่วงจาก A' ไปสู่ B และจาก B' ไปสู่ A อิเล็กตรอนจะเสียพลังงานความร้อน ฉะนั้นพลังงานโฟตอนในการเปล่งแสงย่อมจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานโฟตอนในการกระตุ้นด้วยแสงเสมอ การเปล่งแสงลักษณะนี้ เรียกว่า การเปล่งแสงแบบสโตกส์ (Stoke type luminescence) แต่ถ้ากรณีพลังงานโฟตอนในการเปล่งแสง มีค่ามากกว่าพลังงานโฟตอนในการกระตุ้นด้วยแสง การเปล่งแสงแบบนี้ เรียกว่า การเปล่งแสงแบบแอนติสโตกส์ (Anti-Stoke type luminescence) ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนจากโครงผลึกหรือดูดกลืนจากแสงหลายๆ ขั้นตอนและเปล่งแสงเพียงครั้งเดียว ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 วัฏจักรการดูดกลืนและการเปล่งแสง (50)

เมื่ออิเล็กตรอนที่แถบดูดกลืนแสง (Photo-absorption) ถูกกระตุ้นโดยรังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานสูงขึ้น ไปอยู่ในบริเวณที่ปราศจากอิเล็กตรอน (Unoccupied electronic states) ทำให้บริเวณที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ในแถบดูดกลืนแสง เกิดเป็นที่ว่าง หรือ โฮล เรียกสภาวะนี้ว่า สถานะกระตุ้น (Excited state) แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังสูงสุดในแถบที่มีอิเล็กตรอน (Occupied electronic states) คายพลังงานในรูปแบบของการเปล่งแสงรังสีเอกซ์ (Fluorescent X-ray) ออกมา เมื่อระดับพลังงานของอิเล็กตรอนลดลง อิเล็กตรอนจะแทนที่ตำแหน่งโฮล ทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะผ่อนคลาย (Relaxation state) ส่วนอิเล็กตรอนในบริเวณที่ปราศจากอิเล็กตรอน เมื่อถูกกระตุ้นจากอิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนภายนอก ก็จะคายพลังงานไอเจอิเล็กตรอน (Auger electrons) ออกมา ดังภาพประกอบ 7



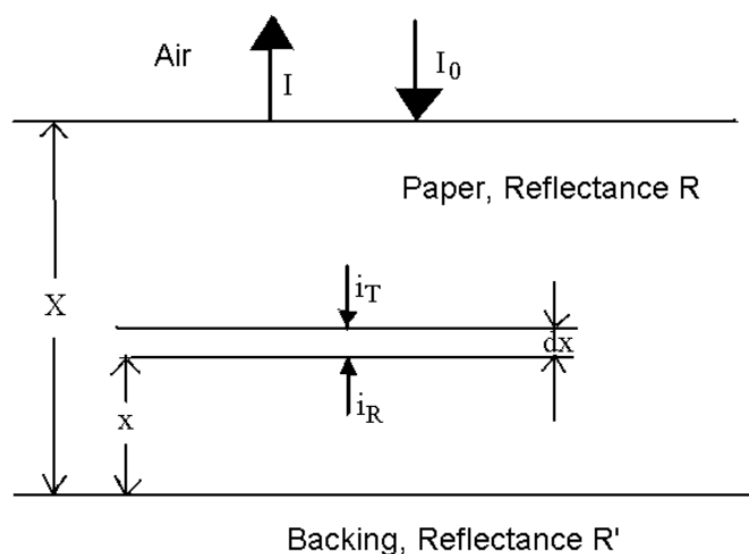
ภาพประกอบ 7 ตัวอย่างอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า⁽⁵⁰⁾

5. ทฤษฎี Kubelka และ Munk^(51,52)

การศึกษาการสะท้อนกระจาย (Diffraction reflectance) ของแสง เป็นวิธีการศึกษาสมบัติทางแสงของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นทึบและเป็นผง

การกระจายของแสงภายในชั้นผิวของชิ้นงาน มีทั้งการกระจายและการดูดกลืนแสงของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานนั้นต้องมีความหนาจำกัด และมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) และโฮโมจีเนียส (Homogeneous) ประกอบด้วยแสงที่มีลักษณะเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneities) ปริมาณน้อย ทำให้มีโอกาสเกิดการกระจายแสงในตัวกลาง

ระบบการกระจายแสงพิจารณาเฉพาะความหนาของชิ้นงานและความเข้มแสงที่ตกกระทบสะท้อน และทะลุผ่าน มีทิศการเคลื่อนที่ของแสง 2 ทิศทาง คือ ทิศขึ้น และทิศลง ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 การสะท้อนแสงและความเข้มข้น⁽⁵²⁾

จากภาพประกอบ 8 พิจารณาความเข้มที่กระทบเข้า (I_0) ที่เกิดขึ้นกับกระดาษ มีความหนา X และมีค่าการสะท้อนกลับเป็น R ด้านหลังแผ่นกระดาษนี้เป็นพื้นผิวมีการสะท้อนกลับ R' แสงที่ออกมาจากพื้นผิวด้านบนของกระดาษหลังจากการกระเจิง การดูดกลืน หรือการทะลุผ่าน มีความเข้มแสงออก (I) ที่ระยะห่าง x จากพื้นผิวด้านล่างของกระดาษ มีช่วงบางๆ กว้าง dx เกิดแสงกระจายทางด้านข้างด้วยความเข้มแสง ทิศขึ้น (i_R) และ ทิศลง (i_T) และผลที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความบาง dx ของ i_T และ i_R คือ

ลด i_T โดย $i_T(S + K) dx$ (การดูดกลืนและการกระเจิง)

ลด i_R โดย $i_R(S + K) dx$ (การดูดกลืนและการกระเจิง)

เพิ่ม i_T โดย $i_R S dx$ (เพิ่ม i_T ด้วยการกระเจิงแสง i_R)

เพิ่ม i_R โดย $i_T S dx$ (เพิ่ม i_R ด้วยการกระเจิงแสง i_T)

กำหนดให้

K คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน ส่วนที่จำกัดของการดูดกลืนของพลังงานแสงต่อความหนาของชิ้นงานที่มีความหนาจะน้อยมาก

S คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง ส่วนที่จำกัดของพลังงานแสงกระจายย้อนกลับต่อความหนาของชิ้นงาน

การที่แสงส่องผ่านชิ้นงานทำให้ค่าความเข้มแสงจะลดลงเนื่องจากถูกดูดกลืน (Kdx) และการกระเจิงแสง (Sdx) เมื่อแสงส่องผ่านชั้นบาง (dx) ค่าความเข้มแสง (i_T) จะมีค่าลดลง $(S+K)i_T dx$ แสงที่

หายไปบางส่วนจะถูกดูดกลืนและกระเจิงแสงของชั้นบาง และค่าความเข้มแสง (i_R) ที่เคลื่อนที่ขึ้นจะ
กระเจิงกลับทิศเดียวกับความเข้มแสง (i_T)

ดังนั้น จะได้สมการอนุพันธ์

$$-di_T = -(S + K)i_T dx + i_R S dx \quad (1)$$

เมื่อที่ความเข้มแสง i_R เคลื่อนที่ขึ้นผ่านชั้นบาง จะได้

$$di_R = -(S + K)i_R dx + i_T S dx \quad (2)$$

โดยที่ x จะวัดจากด้านล่างของแผ่นชิ้นงานนั้น ดังภาพประกอบ 8
หารสมการ (1) โดย i_T และ หารสมการ (2) โดย i_R แล้วรวมกัน จะได้

$$\begin{aligned} \frac{di_R}{i_R} - \frac{di_T}{i_T} &= d \left\{ \ln \left\{ \frac{i_R}{i_T} \right\} \right\} \\ \frac{di_R}{i_R} - \frac{di_T}{i_T} &= -2(S + K)dx + S \left(\frac{i_T}{i_R} + \frac{i_R}{i_T} \right) dx \end{aligned} \quad (3)$$

กำหนดให้

$$R = \frac{I}{I_0} \text{ เป็นค่าสะท้อนของแผ่นชิ้นงาน}$$

$$r = \frac{i_R}{i_T} \text{ เป็นค่าสะท้อนของความหนาช่วงเล็กๆ}$$

$$d(\ln r) = \frac{dr}{r}$$

ฉะนั้น

$$\frac{dr}{r} = \left(-2(S + K) + S \left(\frac{1}{r} + r \right) \right) dx$$

จัดเรียงใหม่

$$\int_{R'}^R \frac{dr}{r \left\{ \left(\frac{1}{r} + r \right) - 2 \left(1 + \frac{K}{S} \right) \right\}} = S \int_0^X dx$$

$$\int_{R'}^R \frac{dr}{1 + r^2 - 2 \left(\frac{S + K}{S} \right) r} = S \int_0^X dx \quad (4)$$

กำหนดให้ $a = \frac{S + K}{S} = 1 + \frac{K}{S}$

สมการ (4) กลายเป็น

$$\int_{R'}^R \frac{dr}{r^2 - 2ar + 1} = S \int_0^X dx \quad (5)$$

จะได้

$$\int_{R'}^R \frac{1}{r - a - \sqrt{a^2 - 1}} - \frac{1}{r - a + \sqrt{a^2 - 1}} dr = 2\sqrt{a^2 - 1} S \int_0^X dx$$

และ

$$\left[\ln \left\{ \frac{r - a - \sqrt{a^2 - 1}}{r - a + \sqrt{a^2 - 1}} \right\} \right]_{R'}^R = 2\sqrt{a^2 - 1} SX$$

$$\ln \left[\frac{R - a - \sqrt{a^2 - 1}}{R - a + \sqrt{a^2 - 1}} \bullet \frac{R' - a + \sqrt{a^2 - 1}}{R' - a - \sqrt{a^2 - 1}} \right] = 2\sqrt{a^2 - 1} SX$$

โดยแทนค่า

$$b = \sqrt{a^2 - 1}$$

จะได้

$$\ln \left[\frac{R-a-b}{R-a+b} \bullet \frac{R'-a+b}{R'-a-b} \right] = 2bSX \quad (6)$$

พิจารณาเงื่อนไข ข้อจำกัด ที่ $X = \infty$, $R = R_\infty$ และ R' สามารถใช้ค่าตั้งแต่ไม่ได้รับแสง

$$R' = 0$$

ด้านซ้าย ของสมการ (7) ต้องเท่ากับ ∞ นั่นคือ ตัวหารต้องเท่ากับ 0 และ

$$R_\infty = a - \sqrt{a^2 - 1} \quad (7)$$

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + \frac{2K}{S}} \quad (8)$$

$$(K = 4\pi \frac{k}{\lambda}; \lambda \text{ คือ ความยาวคลื่น})$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบ $\frac{K}{S}$ จะได้

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (9)$$

เห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีส่วนใกล้เคียงกับความเข้มข้น

เมื่อ

$$F(R_\infty) = \frac{K}{S}$$

จะได้

$$F(R_\infty) = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (10)$$

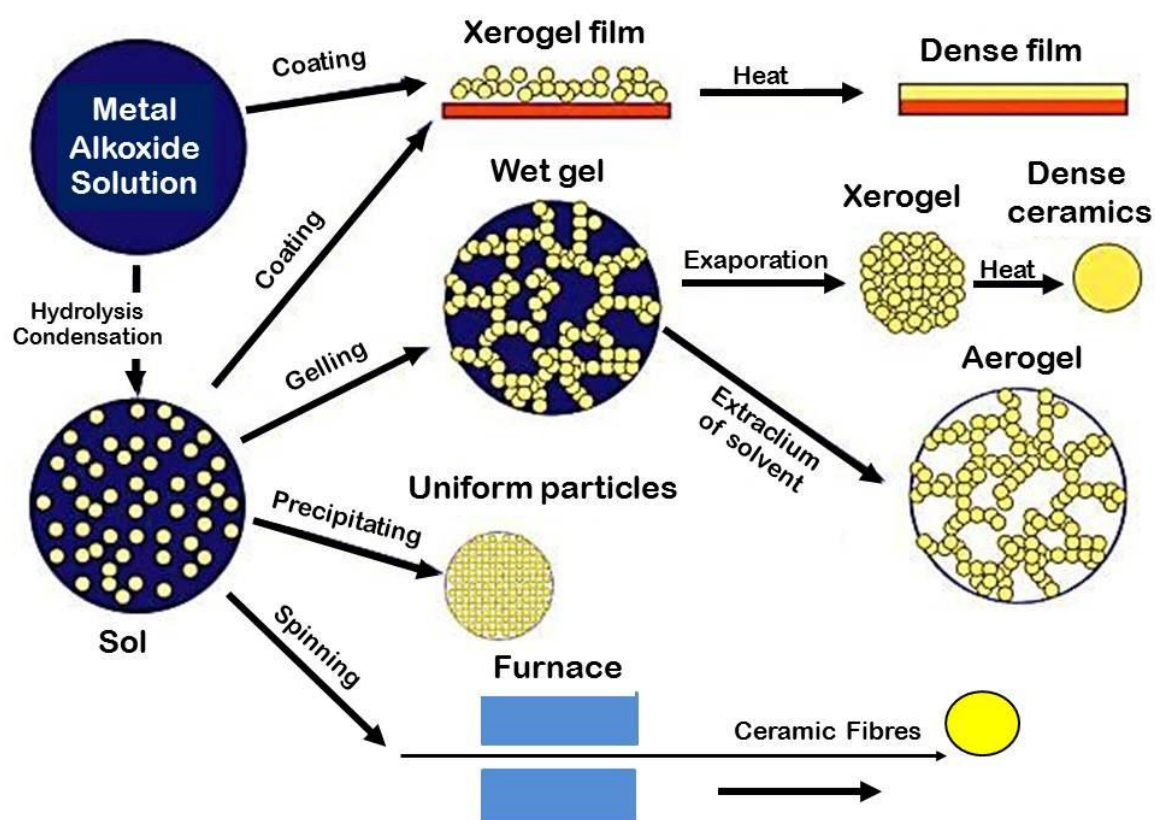
6. กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process)⁽⁵³⁻⁵⁵⁾

กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยใช้สารละลายของสารอนินทรีย์และตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งก็คือกระบวนการเกิดจากสารที่มีโมเลกุลเล็ก (Monomer) รวมตัวกันกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Polymer) ภายใต้อุณหภูมิต่ำ เป็นการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหรือว่า “โซล” (Sol) ส่วนใหญ่โซลอยู่ในรูปของสารคอลลอยด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร เมื่อของเหลวโซลเปลี่ยนไปเป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” (Gel) ด้วยการนำสารละลายมาผสมกันเกิดปฏิกิริยาร่วมกันได้สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเจล

ข้อดีของกระบวนการโซล-เจล คือสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ สามารถสังเคราะห์ให้มีโครงสร้างที่หลากหลาย และสามารถควบคุมอนุภาคหรือชั้นของออกไซด์ที่สังเคราะห์ให้มีขนาดระดับนาโนได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ สารเติมแต่ง และสภาวะเงื่อนไขที่ทำการทดลอง

ปฏิกิริยาที่สำคัญในการกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นด้วยน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคือค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำ โลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องในสภาวะที่ต่างกัน จะทำให้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโซล-เจลมีโครงสร้างและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป

ผลผลิตจากกระบวนการโซล-เจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง หรือเผาที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น ฟิล์ม (Film) อนุภาคผง (Powder) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) และ เส้นใย (Fibers) ดังภาพประกอบ 9



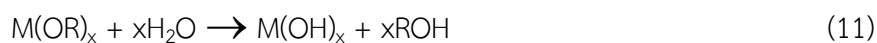
ภาพประกอบ 9 แผนภาพแสดงกระบวนการโซล-เจล (56)

สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจลมักเป็นพวกอัลคอกไซด์ของโลหะหรือกึ่งโลหะ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ว่า $M(OR)_x$

เมื่อ M คือ ธาตุโลหะหรือกึ่งโลหะ

R คือ ธาตุหมู่แอลคิล (Alkyl group)

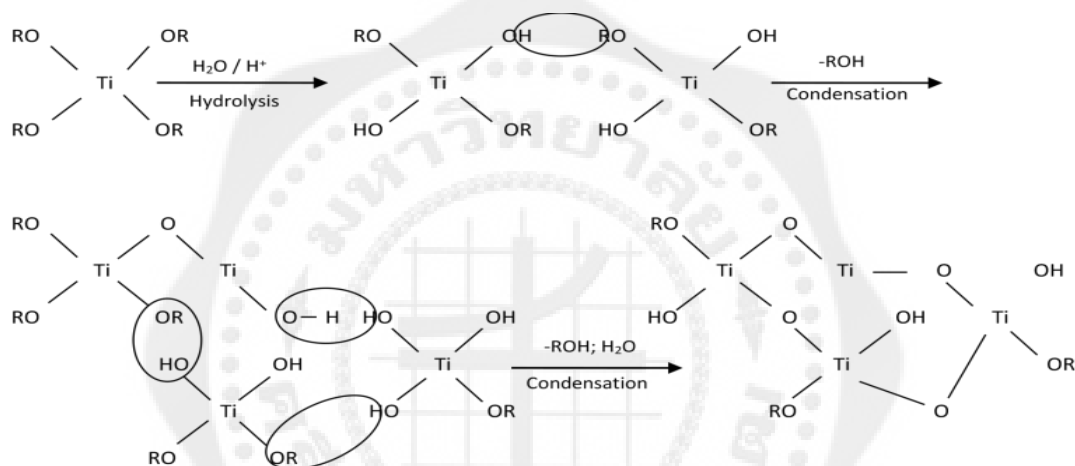
x คือ อิเล็กตรอนในอะตอมที่สามารถมีส่วนร่วมในการสร้างพันธะเคมี (Valence state) สำหรับธาตุหมู่หลัก ของโลหะหรือกึ่งโลหะนั้น ปฏิกริยาโดยรวมเกิดขึ้น ดังนี้



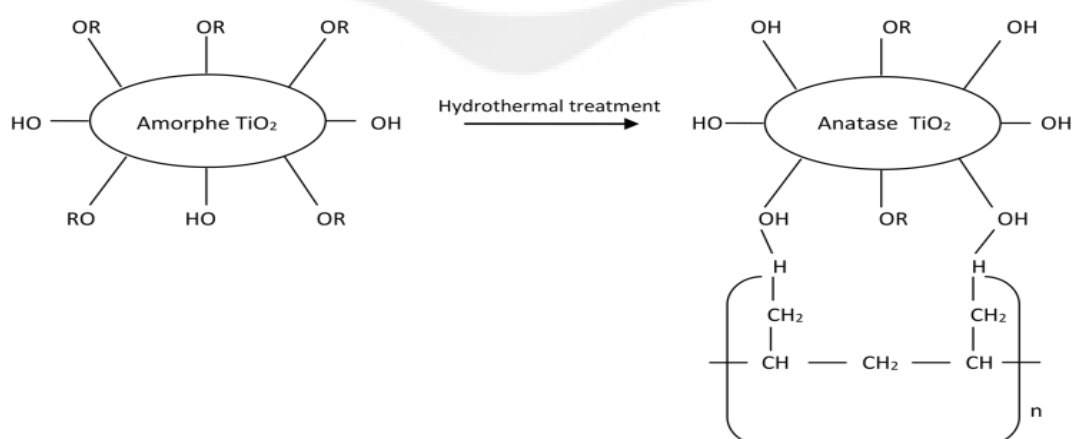
จากปฏิกริยานี้จะเห็นได้ว่าได้แอลกอฮอล์ ROH ซึ่งสามารถระเหยออกไป

ในกระบวนการโซล-เจล สามารถใช้กรดหรือเบสเพื่อเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของชั้นตัวอย่างที่ต้องการ ในกระบวนการโซล-เจลที่เร่งปฏิกิริยาด้วยกรด จะได้เจลที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่พอลิเมอร์เส้นตรงยาวพันกัน ขณะที่การเร่งปฏิกิริยาด้วยเบสจะได้โครงสร้างเจลที่มีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ระหว่างอนุภาคที่ยึดติดกันและในระบบจะต้องมีน้ำซึ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการไฮโดรไลซิส และอาจผสมแอลกอฮอล์เพื่อช่วยในการละลายสารตั้งต้น

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นในกระบวนการโซล-เจล ของสารอัลคอกซีไซเลนสรุปได้ดังภาพประกอบ 10 เมื่อใช้อัลคอกซีไซเลนเป็นสารตั้งต้นผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไทเทเนีย (TiO_2) ดังภาพประกอบ 11 ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) และมีรูพรุน (Porous)⁽⁵⁷⁾



ภาพประกอบ 10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและควบแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไซเลน⁽⁵⁷⁾



ภาพประกอบ 11 โครงสร้างไทเทเนีย (TiO_2) จากไฮโดรไลซิสและควบแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไซเลน⁽⁵⁷⁾

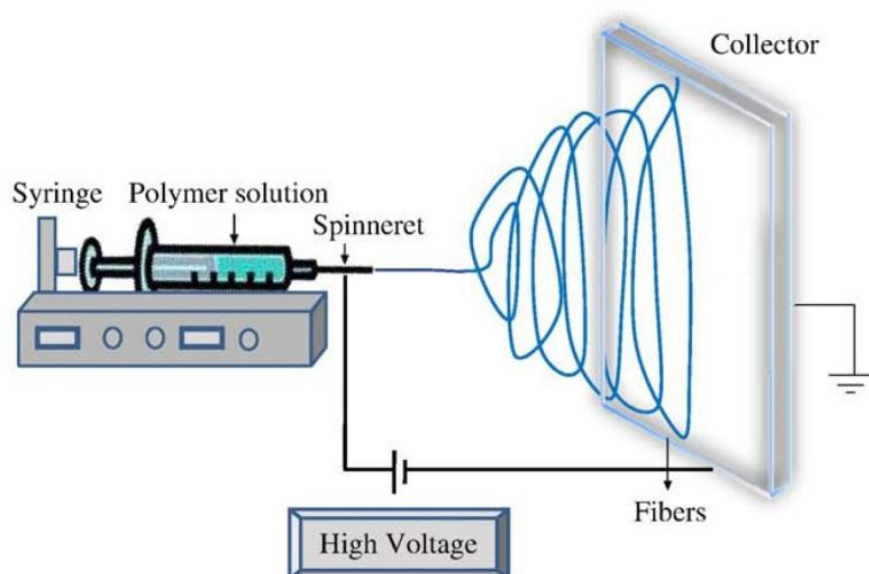
7. การสังเคราะห์เส้นใยขนาดเล็กด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process)⁽¹⁾

กระบวนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนทำได้หลายกระบวนการ เช่น กระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนโดยใช้แม่แบบ (Template synthesis) กระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่เกิดขึ้นได้เองจากสภาวะที่เหมาะสม (Self-assembly) กระบวนการแยกชั้นของพอลิเมอร์ (Phase separation) กระบวนการฉีดพ่นสารหลอมเหลวในสภาวะอากาศร้อน (Melt-blowing) กระบวนการปั่นอย่างรวดเร็ว (Flash spinning) กระบวนการปั่นเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent spinning) และกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต

การปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต ให้เส้นใยมีลักษณะเป็นธรรมชาติ เป็นรูพรุน มีขนาดนาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางช่วง 100 – 1,000 นาโนเมตร เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง มีพื้นผิวสัมผัสมาก ส่งผ่านแก๊สหรือของเหลวได้ดี ประโยชน์ของการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต คือ มีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ ลักษณะเส้นใยมีรูปแบบที่หลากหลาย เส้นใยสามารถเตรียมได้จากวัสดุตั้งต้นที่หลากหลาย และสามารถปรับปรุงโครงสร้างจาก 1 มิติ (เส้น) เป็น 2 มิติ (แผ่น) หรือ 3 มิติ (ก้อน) ได้

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าซึ่งเกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) ดังภาพประกอบ 12

โดยสารละลายพอลิเมอร์เหลวหรือสารหลอมเหลว บรรจุในหลอดบรรจุสาร โดยส่วนปลายติดเข็มขนาดเล็กและต่อเข้ากับหัวบวกของแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ส่วนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะต่อกับขั้วลบของแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้า โดยประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันทำให้มีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น เรียกว่า แรงผลัkcูลอมบ์ (Repulsive coulombic force) เมื่อแรงผลัkcมีมากพอจนสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์เหลวได้ พอลิเมอร์เหลวก็จะถูกฉีดออกมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้พอลิเมอร์ที่ออกมาจะมีลักษณะเป็นเส้นใย จากนั้นเข้าสู่กระบวนการสลายพอลิเมอร์ อาจปล่อยให้ระเหย หรือเผาไหม้พอลิเมอร์ออกจากเส้นใย



ภาพประกอบ 12 หลักการพื้นฐานกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต⁽⁵⁸⁾

8. หลักการทำงานของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

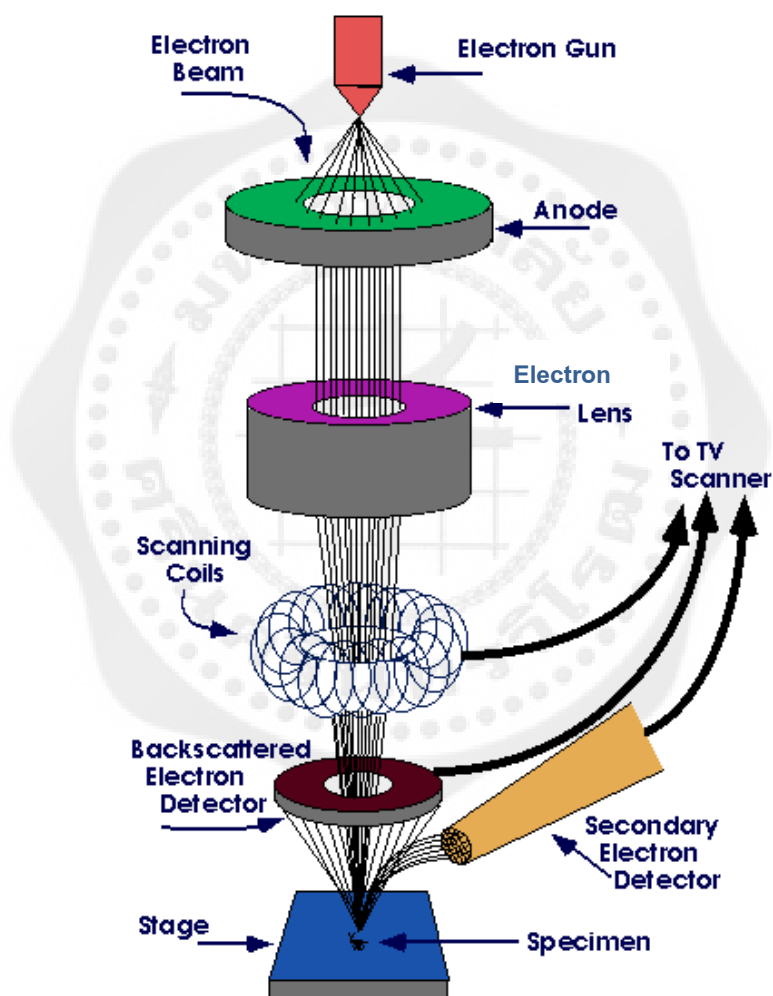
8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ถ่ายภาพชิ้นงานโดยอาศัยหลักการยิงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง กราดไปบนพื้นผิวตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่างๆ จะเกิดการคายพลังงาน ในรูปแบบของรังสีที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และสมบัติอื่นๆ

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด⁽⁵⁹⁾ แสดงดังภาพประกอบ 13

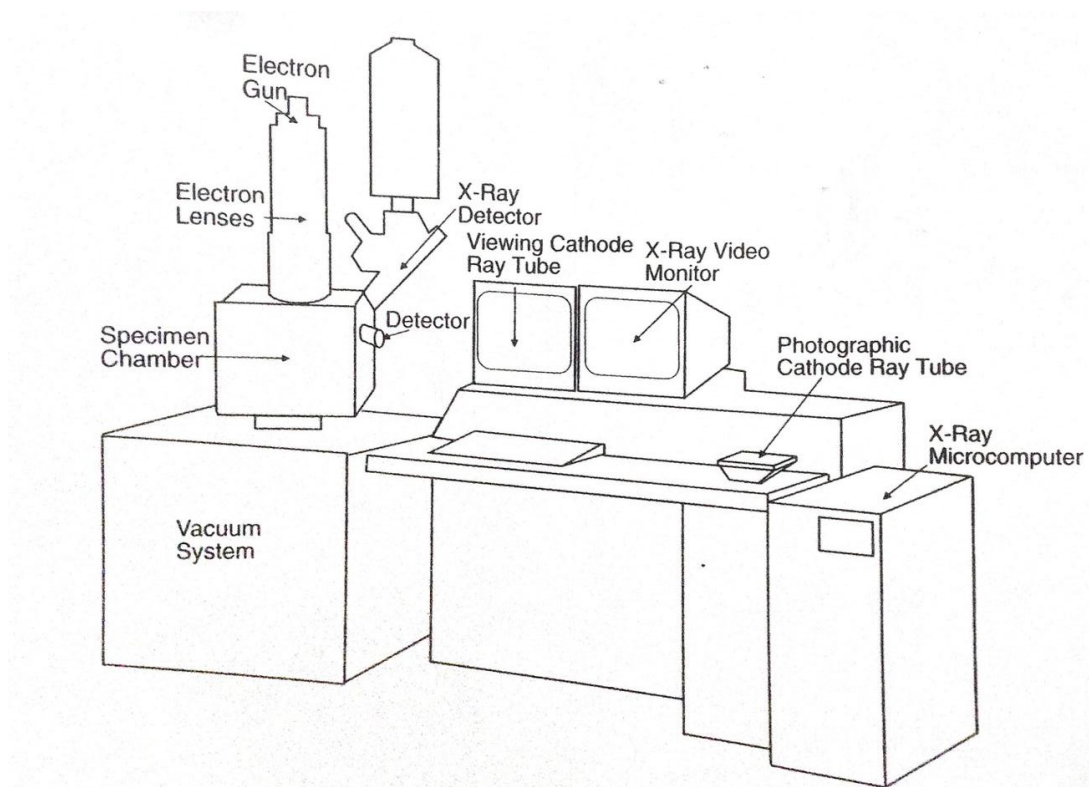
- ปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron gun) คือ แหล่งผลิตอิเล็กตรอน ป้อนสู่ระบบ จากขั้วลบแคโทด และเร่งให้เคลื่อนที่ต่อไปยังแอโนด
- เลนส์อิเล็กตรอน (Electron lenses) คือ เลนส์ที่จะเปลี่ยนลักษณะของอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน
- เลนส์เลี้ยวเบน (Lens aberrations and stigmators) คือ เลนส์ที่ทำให้ลำอิเล็กตรอนเลี้ยวเบนมายังเป้าหมาย
- สแกนคอยล์ (Scan coil) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง

- หัวรับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electrons detector) คือ หัวรับสัญญาณของลำอิเล็กตรอน (Primary electrons) ที่กระเจิงกลับหลังจากการชนผิวตัวอย่าง
- หัวรับสัญญาณอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวตัวอย่าง (Secondary Electrons Detector) คือ หัวรับสัญญาณอิเล็กตรอน (Secondary Electrons) ที่หลุดจากผิวตัวอย่างหลังจากถูกชนโดยลำอิเล็กตรอน (Primary electrons)
- จอภาพแสดงผล (Monitor) คือ อุปกรณ์แสดงสัญญาณที่ผ่านการแปลงสัญญาณแสดงผลออกมาเป็นรูปภาพ



ภาพประกอบ 13 แผนภาพอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด⁽⁶⁰⁾

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งกับเครื่องมือจุลวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์⁽⁵⁹⁾ ดังภาพประกอบ 14 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบ 14 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งกับเครื่องมือจุล-
วิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์⁽⁵⁹⁾

- ส่วนรวบรวมลำอิเล็กตรอน (Assembled column of the scanning electron microscope) ลักษณะของลำอิเล็กตรอนถูกดึงเข้าด้วยกันโดยส่วนประกอบของกล้องและการทำงานร่วมกันของปืนอิเล็กตรอน ขั้วแอโนด เลนส์ รูรับแสง เลนส์เป้าหมาย และสแกนคอยล์

- ส่วนลำอิเล็กตรอนปะทะตัวอย่าง (Electron beam-specimen interactions) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสร้างจากการแผ่รังสีออกจากชิ้นตัวอย่างเมื่อโดนลำอิเล็กตรอนปะทะกับผิวชิ้นตัวอย่าง แผ่รังสีออกเป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออก (Secondary electrons) และอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electrons) นอกจากนี้ยังมีการแผ่รังสีในรูปแบบต่างๆ เช่น รังสีเอกซ์ (X-ray) โอลิโกอิเล็กตรอน (Auger electrons) พลังงานแสง (Cathodoluminescence) เป็นต้น

- ส่วนหัวรับสัญญาณ (Detectors) หัวรับสัญญาณการแผ่รังสีจากชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปแปลงเป็นสัญญาณภาพ

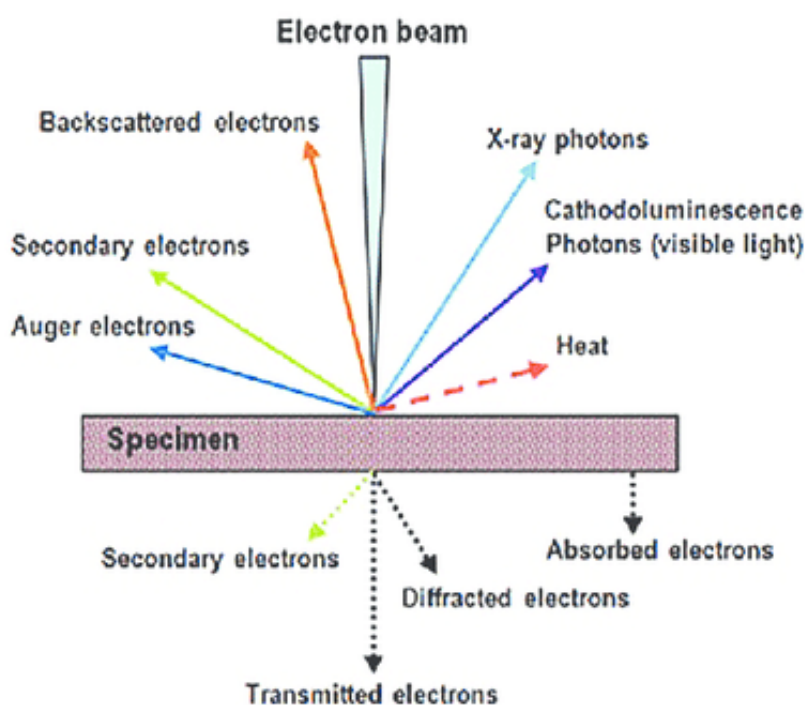
- ส่วนการแปลงสัญญาณภาพ (Image reconstruction) อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นตัวอย่างถูกแปลงเป็นสัญญาณภาพ โดยหลอดรังสีแคโทดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ลำอิเล็กตรอนถูกสร้างขึ้นและเร่งในระบบสุญญากาศเพื่อป้องกันการสูญเสียอิเล็กตรอน ระบบสุญญากาศจึงเป็นส่วนสำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- ส่วนการจัดเตรียมตัวอย่าง (Specimen preparation) ชิ้นตัวอย่างจะถูกนำเข้าสู่ระบบสุญญากาศก่อนการตรวจวัด เพื่อป้องกันประจุทางชีววิทยา ต้องมั่นใจว่าชิ้นตัวอย่างที่จะตรวจวัดจะบดงอและหดตัวน้อยที่สุด

- ส่วนจุลวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray microanalysis) รังสีเอกซ์ถูกปล่อยออกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนกับชิ้นตัวอย่าง ซึ่งพลังงานนั้นจะมีลักษณะเฉพาะของธาตุ ทำให้ผู้ตรวจวัดทราบได้ว่าชิ้นตัวอย่างที่ตรวจวัดประกอบด้วยธาตุชนิดใดบ้าง

สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการยิงอิเล็กตรอนกระทบกับผิวของชิ้นงาน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ⁽⁶¹⁾ ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากลำอิเล็กตรอนกระทบกับชิ้นงาน⁽⁶²⁾

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons: SE) คืออิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย

อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกบันทึกและแปลงเป็นภาพ ภาพที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons Image: SEI)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการลำอิเล็กตรอน (Primary electrons) ชนกับชิ้นตัวอย่าง เกิดการสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

3. รังสีเอกซ์ (X-ray) เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนวงในของธาตุตัวอย่าง ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร เกิดเป็นระดับชั้นพลังงานที่ว่าง แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นระดับพลังงานถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้อิเล็กตรอนลดระดับพลังงานลงพร้อมกับปล่อยพลังงานในลักษณะรังสีเอกซ์ ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้จะมีรูปแบบของระดับพลังงานเฉพาะตัวของแต่ละธาตุ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ

4. โอเจอิเล็กตรอน (Auger electrons) เป็นพลังงานที่เกิดจากลำอิเล็กตรอน วิ่งชนอิเล็กตรอนบริเวณผิวตัวอย่างลึกประมาณ 2 – 4 นาโนเมตร จนอิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างนั้นหลุดออก ค่าที่ได้จะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ หรือวิเคราะห์หาสาเหตุความบกพร่อง (Failure Analysis) บนพื้นผิวระดับนาโนเมตร

5. แสง (Cathodoluminescence) ธาตุบางชนิดเมื่อได้รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนจะปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงในช่วงที่ตาเห็นหรืออาจเลยไปถึงช่วงอัลตราไวโอเล็ต แต่จะเกิดขึ้นในตัวอย่างเพียงแค่บางชนิด

6. พลังงานความร้อน (Heat) เมื่อลำแสงอิเล็กตรอน ชนกับชิ้นตัวอย่าง จะเกิดการสูญเสียพลังงาน พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกแปลงเป็นรูปแบบความร้อน

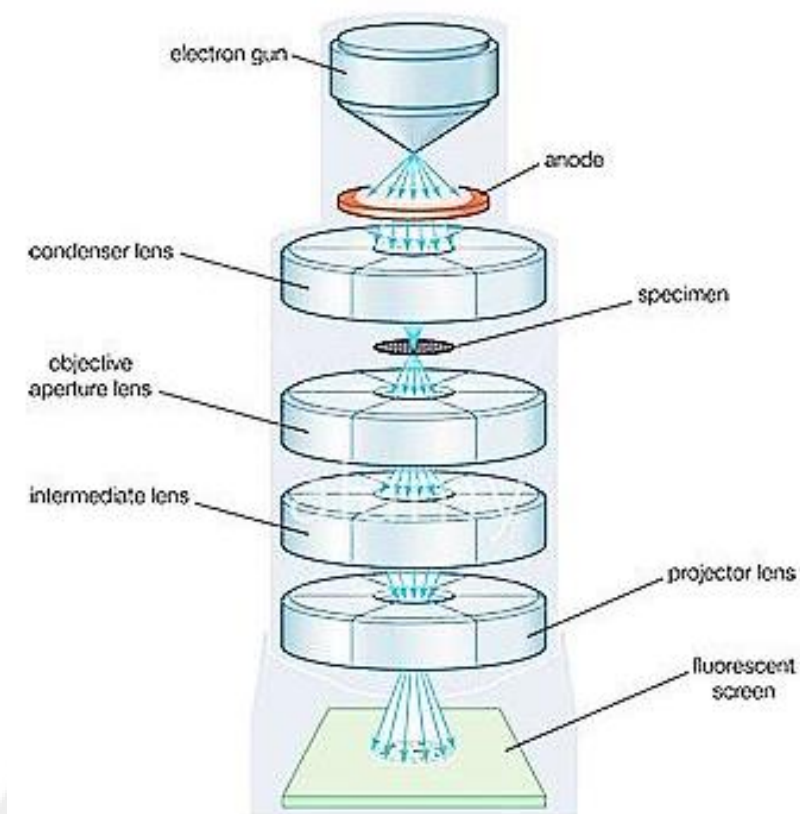
7. อิเล็กตรอนดูดกลืน (Absorbed electrons) หลังจากจากการชนของลำอิเล็กตรอนกับชิ้นตัวอย่าง พลังงานส่วนหนึ่งจะกระเจิงออก และบางส่วนก็จะโดนดูดซับเอาไว้

8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นเครื่องมือที่อาศัยลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านชิ้นตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังขยายสูงมากถึง 620,000 เท่า ใช้ศึกษาโครงสร้างหรือองค์ประกอบของเซลล์ต่างๆ และตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์ แสดงผลเป็นรูปภาพ ลักษณะภาพเป็นภาพตัดขวาง

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน⁽⁶³⁾ มีรายละเอียด ดังภาพประกอบ 16

- ปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron gun) คือ แหล่งผลิตอิเล็กตรอน ป้อนเข้าสู่ระบบ จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ให้เคลื่อนที่ต่อไปยังแอโนด
- เลนส์รวมแสง (Condenser lens) คือ บริเวณที่จะบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนด้วย เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ซึ่งจะสามารถ ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ
- ชิ้นตัวอย่าง (Specimen) ที่จะนำมาตรวจวัดต้องเตรียมให้มีความบางประมาณ 60-90 นาโนเมตร เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านชิ้นตัวอย่างไปได้
- เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่รับลำอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง ซึ่งทำหน้าที่ปรับโฟกัส
- สร้างภาพส่วนกลาง (Intermediate image) ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนที่ปรับโฟกัส แล้วสร้างภาพขึ้น
- เลนส์ฉายภาพ (Projector lens) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณภาพ แล้วฉายลงบนฉากเรืองแสง
- ฉากเรืองแสง (Fluorescence screen) สร้างเป็นสัญญาณภาพ 2 มิติ โดยที่วัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (Atomic number) มากภาพที่ได้จะมีสีดำ ส่วนวัตถุที่มีเลขอะตอมน้อยภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว



ภาพประกอบ 16 แผนภาพอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน⁽⁶⁴⁾

การประยุกต์ใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน สามารถต่อกับเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ธาตุ เช่น เครื่องวิเคราะห์ธาตุจากการกระจายพลังงาน (Energy-Dispersive Spectroscopy: EDS) หรือ เครื่องวิเคราะห์ธาตุจากการกระจายความยาวคลื่น (Wavelength-Dispersive Spectroscopy: WDS) และยังมีระบบการทำงาน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและส่องกราด (Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย สามารถหาขนาด โครงสร้างทางจุลภาค เฟสที่ผสมรวม วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ครอบคลุมทั้งตัวอย่างทางชีววิทยา และตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์

8.3 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX)⁽⁵⁸⁾

เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาธาตุด้วยรังสีเอกซ์ ใช้ในการระบุองค์ประกอบของธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ ธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย ตั้งแต่ธาตุคาร์บอน (^6C) ถึงธาตุที่มีเลขอะตอมมากอย่างธาตุยูเรเนียม (^{22}U)

หลักการของเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์

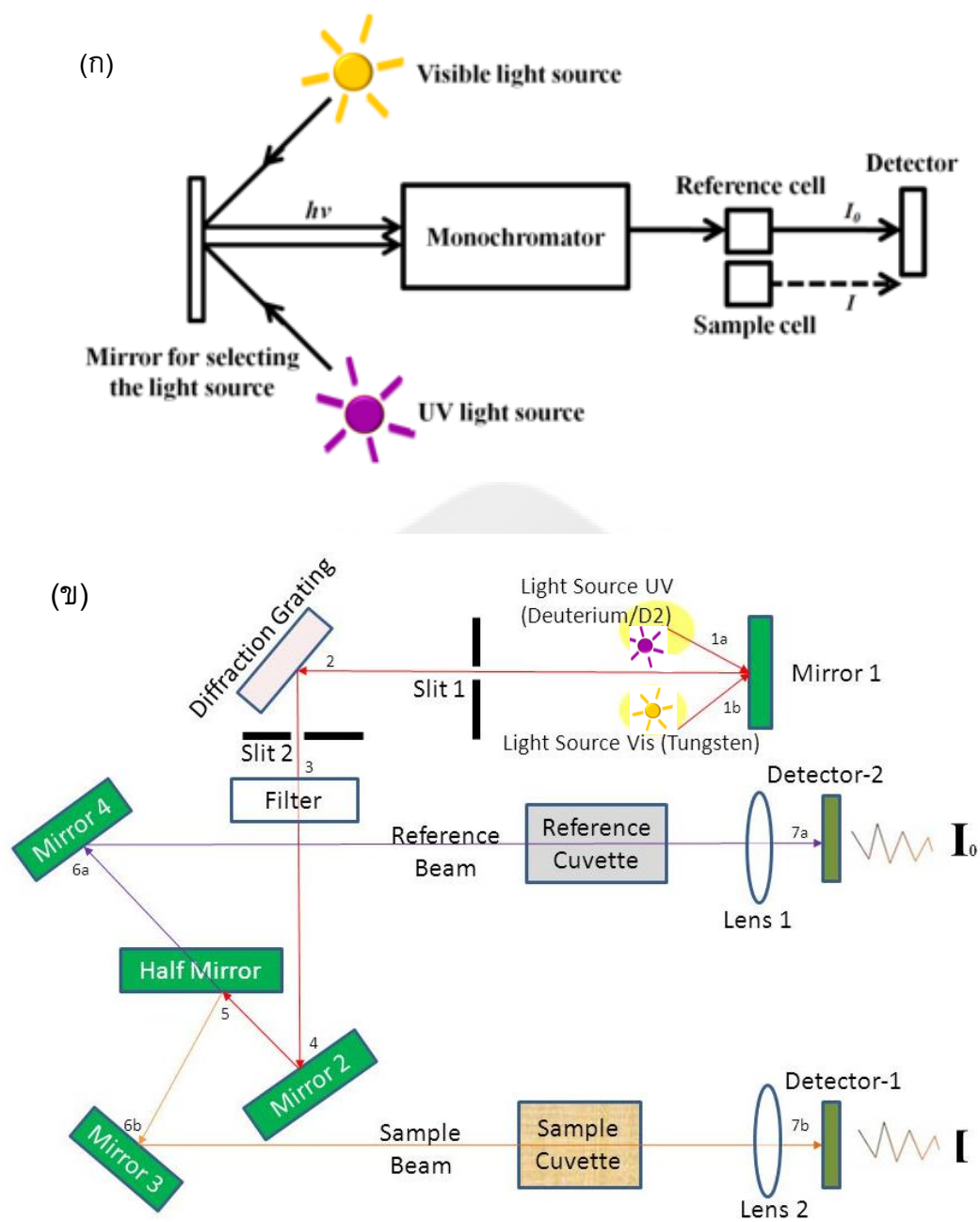
เมื่อลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดชนกับชิ้นตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุ ได้รับพลังงานมากพอจนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป แล้วอิเล็กตรอนในวงถัดไปจะเข้ามาแทนที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานและคายพลังงานออกมาในลักษณะรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ เมื่อวิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่ออกมาจะทราบว่าเป็นหลุดออกจากธาตุใดเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

8.4 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

เครื่องตรวจการดูดกลืนแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มข้นแสง ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือ รังสียูวี (Ultraviolet: UV) และช่วงแสงขาวหรือช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง

หลักการของเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง⁽⁶⁵⁾

เมื่อโมเลกุลของชิ้นตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง ส่งผลให้ระดับพลังงานของโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับออกมาจากชิ้นตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดทะลุผ่านแหล่งอ้างอิง ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังภาพประกอบ 17 ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุล ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นตัวอย่างได้



ภาพประกอบ 17 แผนภาพอย่างง่ายของเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง

(ก) เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง แบบลำแสงเดี่ยว

(ข) เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง แบบลำแสงคู่⁽⁶⁶⁾

ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer⁽⁶⁷⁾ ดังภาพประกอบ 17 มีรายละเอียดดังนี้

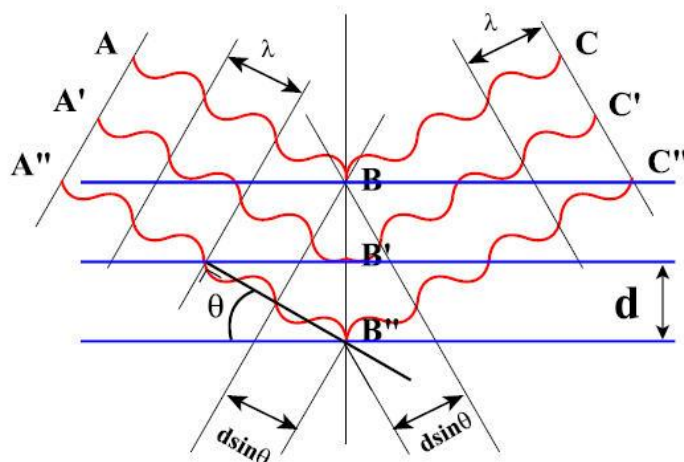
- แหล่งกำเนิดแสง (Light source) แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสงจะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย การตรวจวัดจึงต้องเลือกใช้หลอดกำเนิดแสงให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง
- ระบบคลื่นแสงเดี่ยว (Monochromator) คือ ส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (Polychromatic) คือแสงที่ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ให้เป็นแสงโมนโครเมติก (Monochromatic) ลักษณะเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว จะใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติง (Grating) ก็ได้
- เซลล์ใส่สารตัวอย่าง (Cell sample) หรือ คิวเวทท์ (Cuvettes) มีรูปแบบหลากหลายขึ้นอยู่กับการใช้งาน ได้แก่ เซลล์ที่ทำจากแก้วธรรมดา จะใช้กับการตรวจวัดเฉพาะช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) เพราะเนื้อแก้วจะดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ ส่วนเซลล์ที่ทำจากซิลิกา (Silica) และควอตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งการตรวจวัดแสงช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงที่ตามองเห็น
- เครื่องตรวจจับสัญญาณ (Detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง ถึงแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้

8.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นตัวอย่าง และศึกษารายละเอียดของโครงสร้างผลึกของชิ้นตัวอย่างได้อีกด้วย ลักษณะภายในผลึกของชิ้นตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกไม่เหมือนกัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ทำให้ทราบว่าชิ้นตัวอย่างนั้นๆ มีองค์ประกอบอะไรบ้าง ทราบขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้วิเคราะห์ว่าจะนำผลการตรวจวัดไปใช้ในเรื่องใด

หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์⁽⁶⁸⁾

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อรังสีตกกระทบบั้วตฤหรืออนุภาค จะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบบั้วตฤประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก⁽⁶⁹⁾

กฎของแบร็กก์ (Bragg's law)⁽⁷⁰⁾ จากการเสนอของเซอร์วิลเลียม เฮนรี แบร็กก์ (W.H. Bragg) ที่ว่าโครงสร้างผลึกประกอบด้วย ระนาบ (Plane) หรือ ชั้น (layer) ของอะตอม เมื่อคลื่นตกกระทบบั้วตฤระนาบจะเกิดคลื่นสะท้อน โดยมีมุมตกกระทบบั้วตฤ (θ) เท่ากับมุมสะท้อน และคลื่นที่สะท้อนจะมีความเข้มสูงเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของคลื่นสะท้อนเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ดังสมการ 13

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad (13)$$

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมตกกระทบบั้วตฤและมุมสะท้อน

n คือ ลำดับของการสะท้อน

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเกิดเมื่อ

- ชั้นตัวอย่างต้องมีโครงสร้างเป็นผลึก แบบใดแบบหนึ่ง ในแลตทิซบราวเ (Bravais lattice)

- การเกิดพีค (Peak) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เกิดจากแทรกสอดแบบเสริมของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากระนาบผลึก

- พีค หรือ มุมที่เกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมจะเป็นไปตามกฎของแบร็กก์เสมอ

โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จะส่งแสงโมโนโครเมติก (Monochromatic) ซึ่งมีลักษณะเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว จากบริเวณของเครื่องตรวจจับมายังบริเวณตรงกลางของเครื่องตรวจจับซึ่งบรรจุตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดไว้ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์กับชิ้นตัวอย่างห่างกันเป็นมุม θ และระยะห่างจากชิ้นตัวอย่างกับอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ จะห่างกันเป็นมุม 2θ ควบคุมไปตลอดการหมุนของชิ้นงาน

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhihua Xu, Jiaguo Yu & Gang Liu. (2011: 1260-1263)⁽³⁵⁾ ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมเจือด้วยอนุภาคทอง แล้วเผาด้วยอุณหภูมิ 100 300 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ผลการทดลอง พบว่าท่อนาโนไทเทเนียมเจืออนุภาคทอง ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 100 และ 300 องศาเซลเซียส มีขนาดของท่อและอนุภาคทองมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีอนุภาคทองประมาณ 7 นาโนเมตร ชิ้นงานที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อนุภาคทองมีขนาดโตขึ้นประมาณ 23 นาโนเมตร เป็นผลจากการหลอมรวมกันของอนุภาคทองขนาดเล็ก จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องตรวจจับสารด้วยการดูดกลืนแสง ของชิ้นงานที่ไม่เจือและเจืออนุภาคทองและผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ พบว่าชิ้นงานที่ไม่เจืออนุภาคทอง มีอัตราการดูดกลืนแสง (Absorbance) 0.7 ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 450-550 นาโนเมตร ชิ้นงานเจืออนุภาคทองและเผาด้วยอุณหภูมิ 100 และ 300 องศาเซลเซียส มีอัตราการดูดกลืนแสง 0.9 ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกันประมาณ 500-600 นาโนเมตร ส่วนชิ้นงานเจืออนุภาคทองเผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีอัตราการดูดกลืนแสงประมาณ 0.8 ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 600 นาโนเมตร ขึ้นไป

Guangfei He; et al. (2013: 103-111)⁽⁷¹⁾ ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนียม โดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จัดระบบแบบเส้นเดี่ยว (Single spinneret) และ แบบมีแกน (Coaxial spinneret) โดยการจัดระบบแบบเส้นเดี่ยว ทำโดยเติมสารละลายลงในหลอดฉีดยาที่มีเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร แล้วเข้าสู่กระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ส่วนการจัดระบบแบบมีแกน ใช้วิธีการเติมสารละลายจากการเตรียมลักษณะเดียวกันในหลอดฉีดยาที่มีเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร และเติมน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) ในหลอดฉีดยาที่มีเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3

มิลลิเมตร จัดระบบให้เข็มเล็กอยู่ภายในเข็มใหญ่ แล้วเข้าสู่กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำเส้นใยเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าเส้นใยนาโนไทเทเนีย จากการเตรียมด้วยระบบแบบเส้นเดี่ยว จะมีลักษณะเส้นใยเป็นแท่งทรงกระบอกกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200-300 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร ส่วนเส้นใยจากการเตรียมด้วยระบบแบบมีแกน จะมีลักษณะเส้นใยเป็นท่อนกลวง เนื่องจากน้ำมันฟาราฟินถูกกำจัดในขั้นตอนการเผา เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 300-500 นาโนเมตร ความหนาของผนังท่อนตั้งแต่ 10-200 นาโนเมตร

Jesty Thomas & Minjoong Yoon. (2012: 502-508)⁽³⁾ ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนีย ด้วยปฏิกิริยาให้ความร้อนด้วยน้ำ (Hydrothermal reaction) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นกรองแล้วล้างด้วยน้ำและแอซีโตน เป่าแห้ง ได้ชิ้นงานเส้นใยนาโนไททาเนต (Titanate ($H_3Ti_3O_7$) nanofibers: T_BNFs) นำเข้าสู่กระบวนการทำลายสารอินทรีย์ โดยการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้เจืออนุภาคทองขนาดนาโน เป่าให้แห้งแล้วเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ เส้นใยนาโนไททาเนตเจือด้วยทอง (Gold-doped $TiO_2(B)$ nanofibers: Au- T_BNFs) ศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ของเส้นใยนาโนไทเทเนีย (Titanium nanofibers: $TiNFs$) เส้นใยนาโนไทเทเนต และเส้นใยนาโนไททาเนตเจืออนุภาคทองขนาดนาโน พบว่า เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีความหนา 50-200 นาโนเมตร ความยาวอยู่ในช่วงประมาณไมโครเมตร ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่า เส้นในทั้งเส้นใยนาโนไทเทเนีย และเส้นใยนาโนไททาเนตเจืออนุภาคทองขนาดนาโน มีเฟสอะนาเทส และวิเคราะห์การดูดกลืนแสง พบว่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียและเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยอนุภาคทองมีระดับพลังงาน 3.04 อิเล็กตรอนโวลต์และ 2.94 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

Hira Jamil; et al. (2012: 2437-2441)⁽⁷²⁾ ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนีย โดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จากการเตรียมสารละลายเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกผสมสารละลายโพลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone: PVP) 0.45 กรัม กับเอทานอล (Ethanol) 7.5 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 10 นาที ส่วนที่สอง ผสมเอทานอล 3 มิลลิลิตร และกรดอะซิติก (Acetic acid) 3 มิลลิลิตร เติมเตตระไฮโซโพรไพไซด์ (Titanium tetraisopropoxide: TTIP) 1.5 มิลลิลิตร ในขวดที่สอง หยดสารละลายจากขวดที่สอง ลงในขวดแรกที่ละเหย ผสมเข้าด้วยกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เตรียมอุปกรณ์การปั่นเส้นใยโดยใช้เข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.413 มิลลิเมตร ระยะจากปลายเข็มถึงแผ่นทองแดง 8 เซนติเมตร ใช้แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ (ใช้สนามไฟฟ้า 1.25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร) โดยต่อขั้วแอโนดกับปลายเข็มฉีดยาและต่อขั้วแคโทดกับแผ่นทองแดงนำเส้นใยที่สังเคราะห์ได้เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการ

เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเส้นใยมีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) จากผลการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ลักษณะเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 - 200 นาโนเมตร และเส้นใยมีส่วนประกอบของไทเทเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) ในอัตรา 1:2 บ่งบอกว่าเส้นใยเป็นไทเทเนียมไทเทเนียม และจากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงลักษณะเกรน (Grain) ขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร

Sang Hoon Nam; et al. (2010: 2046-2052)⁽¹⁶⁾ ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนียม โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ทำการเตรียมการทดลอง 3 เงื่อนไข คือ เส้นใยนาโนไทเทเนียมปราศจากสารเจือ (TNFs) เส้นใยนาโนไทเทเนียมเจืออนุภาคเงินขนาดนาโน (Ag-TNFs) และเส้นใยนาโนไทเทเนียมเจืออนุภาคทองขนาดนาโน (Au-TNFs) โดยเติมสารเจือในขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงลักษณะเส้นใยแต่ละชนิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ± 20 นาโนเมตร มีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยวและมีอนุภาคนาโนเจือในเส้นใย โดยอนุภาคมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5 - 10 นาโนเมตร มีผิวขรุขระ มีอนุภาคนาโน (เงิน/ทอง) กระจายตัวในเส้นใยนาโนไทเทเนียมอย่างสม่ำเสมอ

Rounak A Naphade; et al. (2014: 975-984)⁽⁷³⁾ ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนียมที่มีการเจืออนุภาคนาโนทอง (Au-TNFs) โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จากการเตรียมสารละลายระหว่างโพลีไวนิลไพโรลิโดน ปริมาณ 1 กรัม ผสมกับ เอทานอล 8 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 0.01 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายทอง ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในสารละลายไทเทเนียมเตตระไฮโดรฟอสเฟต (TTIP) ในอัตราของทองและไทเทเนียม (Au:Ti) เป็น 1 เปอร์เซ็นต์ผสมกันโดยเครื่องกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมเสร็จแล้วเข้าสู่กระบวนการปั่นเส้นใยใช้ความดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ปลายเป็นระยะห่าง 15 เซนติเมตร มีอัตราการฉีดพอลิเมอร์ 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นทำให้แห้งโดยการอบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเผาเส้นใยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาลักษณะเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 150 นาโนเมตร และแสดงให้เห็นลักษณะของอนุภาคทองขนาด 5 - 10 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ว่าเส้นใยนาโนไทเทเนียม (TNFs) และเส้นใยนาโนไทเทเนียมเจืออนุภาคทอง (Au-TNFs) มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส ผลการศึกษาการดูดกลืนแสง พบว่าเส้นใยไทเทเนียมที่เจือทองมีอัตราการดูดกลืนแสงสูงกว่าเส้นใย ไทเทเนียม และการวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียม พบว่ามีแถบช่องว่างพลังงาน 3.1-3.3

อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนเส้นใยไทเทเนียมที่เจือด้วยทอง มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.15 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 3.3 อิเล็กตรอนโวลต์

Peng Zhang; et al. (2012: 331-338)⁽³⁶⁾ ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไทเทเนียมกับสารประกอบซิงค์ออกไซด์ (TiO_2/ZnO NFs) โดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นเตรียมเป็นเส้นใยนาโนไทเทเนียมกับสารประกอบซิงค์ออกไซด์ที่เจืออนุภาคทองคำขนาดนาโนเมตร (Au NPs- TiO_2/ZnO NFs) ด้วยวิธีรีดักชัน (Reduction) เริ่มจากการเตรียมสารละลาย $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ ปริมาณ 1 กรัม และ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ 0.65 กรัม ใส่ในสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) 5 มิลลิลิตร และ เอทานอล (Ethanol) 2.5 มิลลิลิตร เติมโพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinyl pyrrolidone: PVP) 0.5 กรัม ยังสารละลาย ผสมให้เข้ากันโดยวิธีการกวนด้วยสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้น เข้าสู่กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ขนาดเข็มเบอร์ 23 ระยะห่างของเข็ม 15 เซนติเมตร ในอัตราการปั่น 0.3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ทำการเผาเส้นใยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำหนดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อกำจัดโพลีไวนิลไพร์โรลิโดน เพื่อให้ได้เส้นใยนาโนไทเทเนียม/ซิงค์ออกไซด์ (TiO_2/ZnO NFs) ส่วนการเตรียมเส้นใยนาโนไทเทเนียม/ซิงค์ออกไซด์ที่เจืออนุภาคทองคำขนาดนาโนเมตร (Au NPs- TiO_2/ZnO NFs) โดยการผสม สแตนเนส (II) คลอไรด์ (Stannous (II) chloride: SnCl_2) 0.01 กรัม ผสมกับกรดอะซิติก (HCl) 20.0 มิลลิลิตร จากนั้น นำไปผสมกับเส้นใยนาโนไทเทเนียม/ซิงค์ออกไซด์ (TiO_2/ZnO NFs) ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ปริมาณ 0.01 กรัม กวนที่อุณหภูมิห้อง 6 ชั่วโมง เมื่อเสร็จล้างด้วย น้ำกลั่น (Distilled water) 5 ครั้ง จากนั้นเติมสารละลายเตตระคลอโรออร์ริก แอซิก (HAuCl_4) กวน 2 ชั่วโมง สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู ล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล แล้วอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยตรวจวัดด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ และการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80-120 นาโนเมตร อนุภาคทองคำเฉลี่ย 5-10 นาโนเมตร และจากการตรวจวัด (UV-Vis) พบว่าเส้นใยที่สังเคราะห์จากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และเส้นใยไทเทเนียม/ซิงค์ออกไซด์และเจืออนุภาคทองคำขนาดนาโน (Au NPs- TiO_2/ZnO NFs) มีแถบช่องว่างพลังงาน เป็น 3.26 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 3.16 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียและเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทอง โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทอง มีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
2. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัย
4. สถานที่ดำเนินงานวิจัย
5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 โพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinyl pyrrolidone: PVP) โดยบริษัท Sigma-aldrich
- 1.2 เอทานอล (Ethanol) โดยบริษัท Carlo Erba reagents
- 1.3 กรดแอซติก (Acetic acid) โดยบริษัท Carlo Erba reagents
- 1.4 ไทเทเนียม เตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium tetraisopropoxide: TTIP) โดยบริษัท Merck
- 1.5 โกลด์คลอไรด์ไฮเดรท (Gold (III) Chlorauric hydrate: $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) โดยบริษัท Aldrich

2. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 อุปกรณ์เตรียมสารละลาย
 - 2.1.1 ขวดรูปخمพู่
 - 2.1.2 เครื่องชั่งสารเคมี
 - 2.1.3 ซ้อนตักสาร
 - 2.1.4 กระดาษชั่งสาร (Weighing paper)
 - 2.1.5 ปีกเกอร์
 - 2.1.6 หลอดหยดสาร (Dropper tube)

2.1.7 ขวดแก้วขนาดเล็ก (Vial)

2.1.8 ปิเปตแก้วขนาด 10 มิลลิลิตร

2.1.9 แผ่นพาราฟิล์ม (Parafilm)

2.1.10 หลอดฉีดยาและเข็มยาว เบอร์ 18 G

2.1.11 แท่งแม่เหล็กและเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก (รุ่น C-MAG HS7 IKA) บริษัท แกรนด์ เซ็นเตอร์ แล็บ จำกัด

2.2 อุปกรณ์การปั่นเส้นใย

2.2.1 เครื่องแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High-Voltage Power Supply: model CRT-35T)

2.2.2 ชุดขาตั้ง

2.2.3 แผ่นทองแดง

2.2.4 แผ่นรองรับเส้นใย

2.2.5 หลอดฉีดยาและเข็มขนาด 23 G (23 Gauge = 0.6 mm)

2.2.6 กระดาษทราย (หยาบ) เบอร์ 80

2.2.7 ไม้พันสำลี

2.3 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย

2.3.1 ถุงมือยาง

2.3.2 แว่นตากันสาร

2.3.3 หน้ากากปิดจมูก

2.3.4 หมวกคลุมผม

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัย

3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น SEM-6610LV

3.2 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX) ยี่ห้อ JEOL รุ่น SEM-6610LV

3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM) ยี่ห้อ 20S-Twin รุ่น TECNAI G²

3.4 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex

3.5 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการสะท้อนแสง (UV- Vis Diffuse Reflectance Spectra: UV- Vis Spectroscopy) รุ่น Lambda 650 Perkin Elmer

4. สถานที่ดำเนินงานวิจัย

4.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

4.2 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

4.4 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

4.5 ศูนย์วิจัยเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

5.1 การเตรียมโซล-เจล

5.1.1 ผสมสารละลายโพลิไวนิลไพโรลิโดน 0.15 กรัม และ เอทานอล 2.5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นทำการกวนสารโดยใช้แม่เหล็กและเครื่องกวน (ระดับ 5) เป็นเวลา 20 นาที

5.1.2 ผสมเอทานอล 1 มิลลิลิตร และกรดแอซีติก 1 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม จากนั้นนำไทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอพอกไซด์ 0.5 มิลลิลิตร ผสมในขวดสารละลายกรดที่เตรียมไว้ตอนต้น เมื่อเตรียมสารละลายเสร็จให้ปิดปากขวดด้วยแผ่นพาราฟิล์มกันสารระเหยออก

5.1.3 กวนสารในขวดแรก 20 นาที ให้เทสารละลายกรดในข้อ 5.1.2 ลงในขวดแรกที่ละเหยต เมื่อผสมทั้งสองขวดเข้าด้วยกันแล้ว ให้ทำการกวน (ระดับ 3) ต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.2 วิธีการปั่นเส้นใย

5.2.1 เตรียมอุปกรณ์ในการปั่น ได้แก่ แผ่นรองรับเส้นใย เข็มฉีดยา แผ่นทองแดง เครื่องแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และโซล-เจลที่เตรียมไว้จากข้อ 5.1

5.2.2 ต่อขั้วไฟฟ้าขั้วบวกเข้ากับเข็มฉีดยา ต่อขั้วไฟฟ้าขั้วลบเข้ากับแผ่นทองแดงที่รองแผ่นรองรับเส้นใย

5.2.3 ปรับให้หลอดเข็มฉีดยาทำมุม 45 องศา กับแนวระดับและให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเส้นใยห่างกัน 15 เซนติเมตร

5.2.4 เปิดเครื่องแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และค่อยๆ ปรับค่าความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ ทำการปั่นสะสมเส้นใยเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

5.2.5 ตากเส้นใยให้แห้งในตู้ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

5.2.6 เก็บเส้นใยที่ปั่นได้ลงในกล่องมีฝาปิด

5.3 การเผาเส้นใยไทเทเนีย

5.3.1 ทำการเผาเส้นใยที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยตั้งค่าให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 450 องศาเซลเซียส

5.3.2 เผาเส้นใยที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงมาสู่อุณหภูมิห้อง

5.4 การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียเจ็ดด้วยทอง

5.4.1 ผสมสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน 0.15 กรัม และ เอทานอล 2.5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ หลังจากนั้นกวนสารละลายโดยใช้แม่เหล็กและเครื่องกวน (ระดับ 5) เป็นเวลา 10 นาที เติมโกลด์คลอไรด์ไฮเดรต 0.010 กรัม กวนต่อโดยใช้แม่เหล็กและเครื่องกวน (ระดับ 5) อีก 10 นาที

5.4.2 ผสมเอทานอล 1 มิลลิลิตร และ กรดแอสติก 1 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม จากนั้นนำไทเทเนียมเตตระไฮโดรฟอสเฟต 0.5 มิลลิลิตร ผสมในขวดสารละลายกรดที่เตรียมไว้ เมื่อเตรียมสารละลายเสร็จปิดปากขวดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม กันสารระเหยออก

5.4.3 กวนสารโพลีไวนิลไพโรลิโดนและเอทานอล จากข้อ 5.4.1 เป็นเวลา 20 นาที เทสารละลาย TTIP ในขวดข้อ 5.4.2 ใส่ลงในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดนที่ละลาย เมื่อผสมทั้งสองขวดเข้าด้วยกันแล้ว ให้ทำการกวน (ระดับ 3) ต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.4.4 ผสมสารละลาย ตามข้อ 5.4.1 ถึง 5.4.3 อีก 4 ชุด โดยเปลี่ยนปริมาณโกลด์คลอไรด์ไฮเดรต เป็น 0.015 0.020 0.025 และ 0.030 กรัม

5.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียเจ็ดด้วยทอง

5.5.1 ศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยไทเทเนีย และเส้นใยไทเทเนียเจ็ดด้วยทองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

5.5.2 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของเส้นใยไทเทเนีย และเส้นใยไทเทเนียเจ็ดด้วยทองด้วยเครื่องเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน

5.5.3 ศึกษาขนาดทองของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทอง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

5.5.4 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกในเส้นใยไทเทเนีย และเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

5.5.5 ศึกษาผลของทองที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโทรสโกปี



บทที่ 4

ผลการวิจัย

1. ผลการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียม และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง

จากการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้กำหนดชื่อตัวอย่างชิ้นงาน ดังตาราง 3

ตาราง 3 การกำหนดชื่อตัวอย่างชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้

ชิ้นงาน	เส้นใย	ปริมาณทอง (g)	อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อตัวอย่าง
A	TFs	0	-	A-0
			450	A-450
B	Au-TFs	0.010	-	B-0
			450	B-450
C	Au-TFs	0.015	-	C-0
			450	C-450
D	Au-TFs	0.020	-	D-0
			450	D-450
E	Au-TFs	0.025	-	E-0
			450	E-450
F	Au-TFs	0.030	-	F-0
			450	F-450

จากตาราง 3 การกำหนดชื่อตัวอย่าง กำหนดให้ 0 หมายถึง เส้นใยที่เตรียมโดยไม่ผ่านการเผา และ 450 หมายถึง เส้นใยที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยไทเทเนียม (TFs) และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง (Au-TFs) ก่อนเผาและหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) ได้ผลการศึกษา ดังนี้

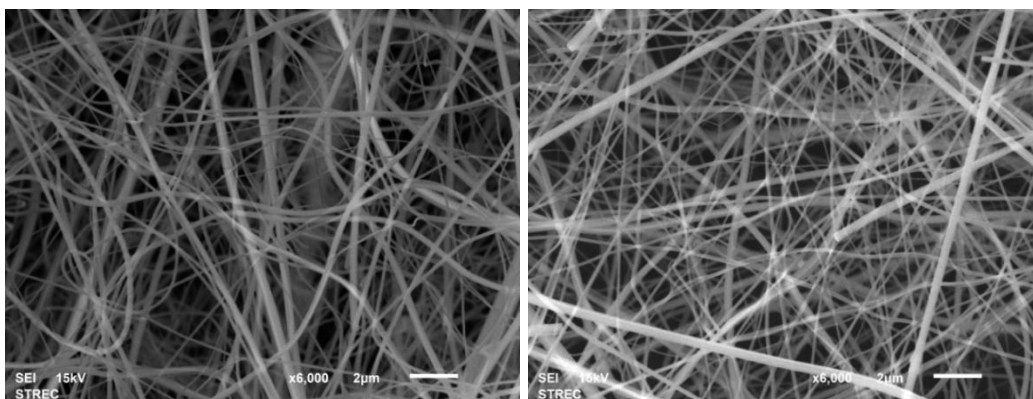
2.1 ลักษณะสัณฐานของเส้นใย A-0 และเส้นใย A-450

จากการศึกษาพบว่าเส้นใยเส้นใย A-0 มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง แต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันไป เส้นใยซ้อนทับกันจนเป็นแผ่นบาง ส่วนเส้นใย A-450 เส้นใยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงและแตกหัก เนื่องจากพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยถูกกำจัดโดยความร้อน ทำให้แผ่นเส้นใยบางและขาดง่าย ดังภาพประกอบ 19

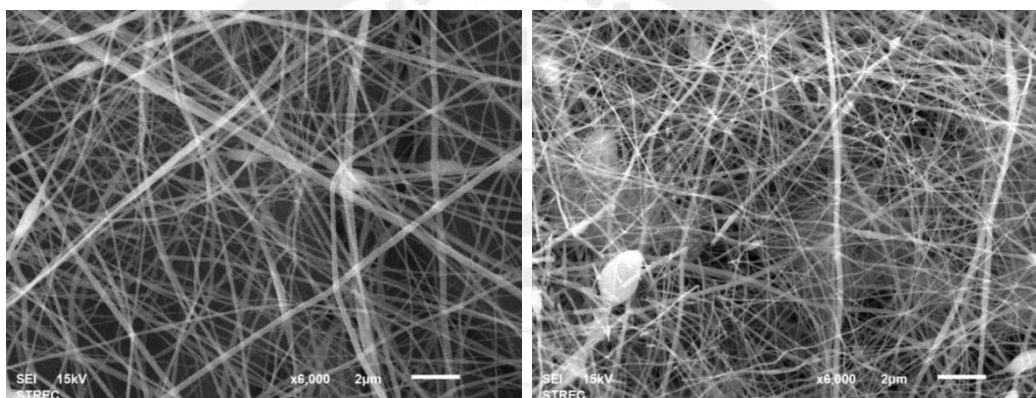
2.2 ลักษณะสัณฐานของ Au-TFs

ลักษณะของ Au-TFs-0 และ Au-TFs-450 ดังภาพประกอบ 20-24 โดยเจือทอง 0.010 0.015 0.020 0.025 และ 0.030 กรัม ตามลำดับ จากการศึกษ Au-TFs-0 ด้วย FE-SEM พบว่า Au-TFs-0 มีลักษณะเป็นเส้น มีปัด (Bead) เกิดขึ้น เนื่องจากเกิดการเจือจางของโซล-เจล ทำให้โซล-เจลมีความหนืดน้อยลง ส่งผลให้เส้นใยที่ปั่นออกมามีปัดลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเกิดขึ้นปะปนกับเส้นใย การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซล-เจล เป็นผลจากการเติมโกลด์คลอไรด์ไฮเดรต เมื่อเติมโกลด์คลอไรด์ไฮเดรตในปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ยังคงใช้เงื่อนไข ขนาดเข็ม ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นทองแดงรองรับเส้นใย และแหล่งกำเนิดกำลังศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เหมือนกับการสังเคราะห์ TFs ทำให้ Au-TFs ที่ได้มีปัดปะปนกับเส้นใย หากต้องการไม่ให้เกิดปัด ควรใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของโซล-เจล⁽⁷⁴⁻⁸¹⁾

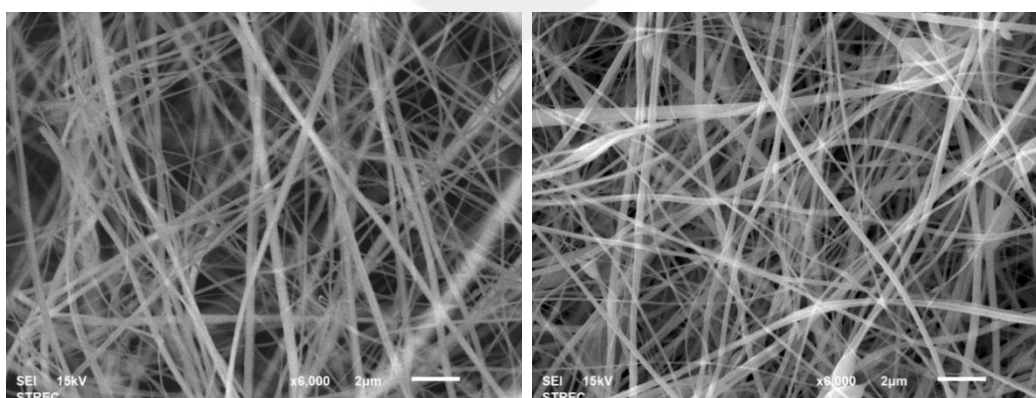
เส้นใยแต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันไป เส้นใยซ้อนทับกันจนเป็นแผ่นบาง ส่วน Au-TFs ที่เผาด้วยด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีลักษณะเส้นใยเล็กลง เนื่องจากพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยถูกกำจัดโดยความร้อน ทำให้แผ่นเส้นใยบางและที่การแตกหัก



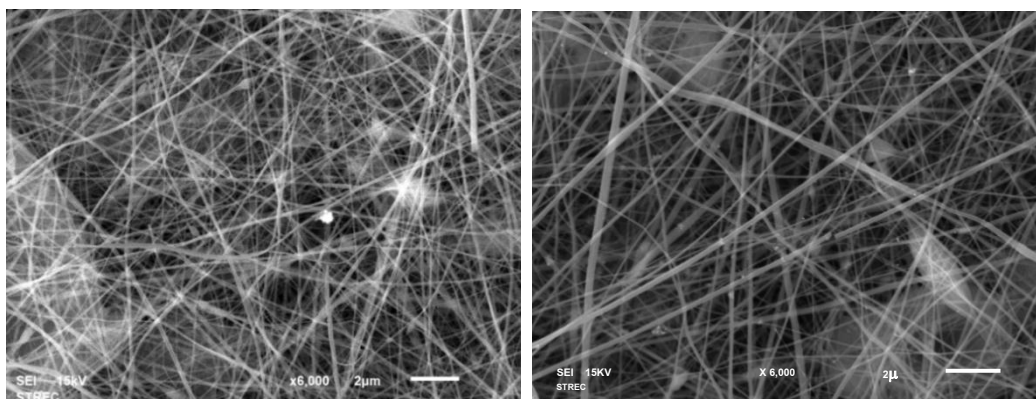
ภาพประกอบ 19 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ A-0 (ซ้าย) และ A-450 (ขวา)



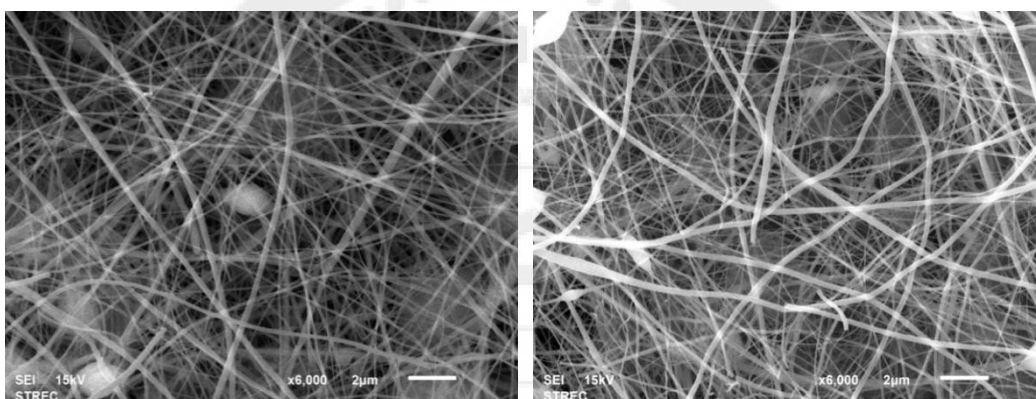
ภาพประกอบ 20 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ B-0 (ซ้าย) และ B-450 (ขวา)



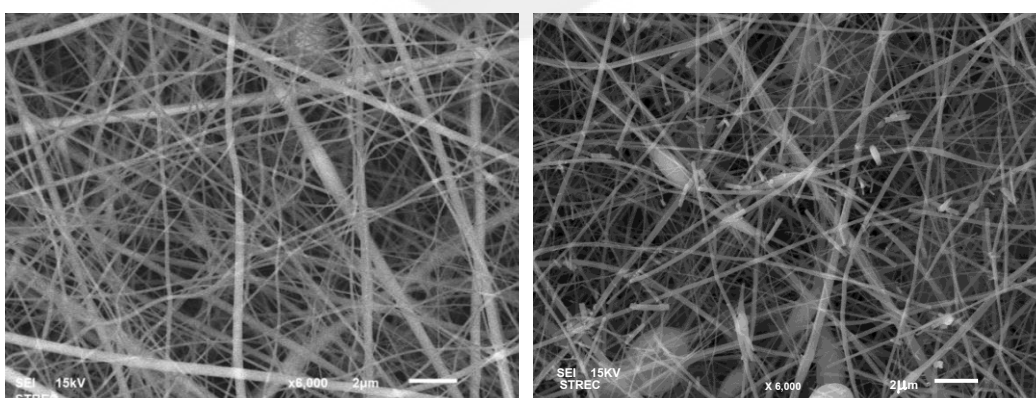
ภาพประกอบ 21 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ C-0 (ซ้าย) และ C-450 (ขวา)



ภาพประกอบ 22 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ D-0 (ซ้าย) และ D-450 (ขวา)



ภาพประกอบ 23 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ E-0 (ซ้าย) และ E-450 (ขวา)



ภาพประกอบ 24 ลักษณะสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ F-0 (ซ้าย) และ F-450 (ขวา)

2.3 ผลการศึกษาขนาดของ TFs และ Au-TFs

จากการตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากภาพถ่าย FE-SEM ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ImageJ วัดขนาดเส้นใยแล้วเทียบกับอัตราส่วนของภาพ โดยทำการวัดเฉพาะส่วนของเส้นใย ไม่ทำการวัดบริเวณปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่วัดได้ แสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ TFs และ Au-TFs

ชิ้นงาน	Diameters (nm)	S.D.
A-0	125	53.35
B-0	128	65.42
C-0	131	59.20
D-0	133	53.67
E-0	137	68.56
F-0	148	85.08
A-450	80	38.33
B-450	87	39.12
C-450	98	40.40
D-450	104	44.79
E-450	120	48.40
F-450	125	53.97

จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิในการเผามีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เมื่อเส้นใยผ่านการเผาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีขนาดเล็กลง เมื่อเจือทองในขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล จะเห็นว่าเส้นใยที่เจือด้วยทองจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่เจือทอง และเมื่อพิจารณาปริมาณทองที่เจือ ปริมาณทองที่เพิ่มขึ้นจะให้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

3. ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ

จากการศึกษาวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบของเส้นใยไทเทเนียม (TFs) และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง (Au-TFs) ก่อนเผาและหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX) ได้ผลการศึกษา ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ธาตุของ TFs และ Au-TFs

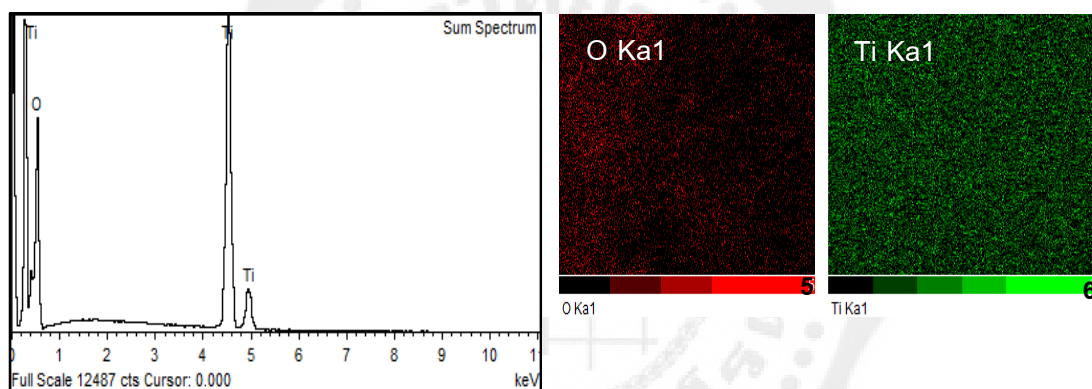
ผลจากการวิเคราะห์ธาตุของ TFs และ Au-TFs ในปริมาณ 0.010 0.015 0.020 0.025 และ 0.030 กรัม พบว่า เมื่อเติมโกลด์คลอไรด์ไฮเดรท ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล จะเห็นว่าเส้นใยมีส่วนประกอบของคลอรีน (Cl) อยู่ในเส้นใย เมื่อผ่านการเผา ทำให้ส่วนประกอบคลอรีนหายไป เนื่องจากความร้อน ผลจากการเพิ่มปริมาณทองในโซล-เจล พบว่าปริมาณอะตอมของทองคลอไรด์ (Cl^-) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงผลการวิเคราะห์ดังตาราง 5

ตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ธาตุของ TFs และ Au-TFs

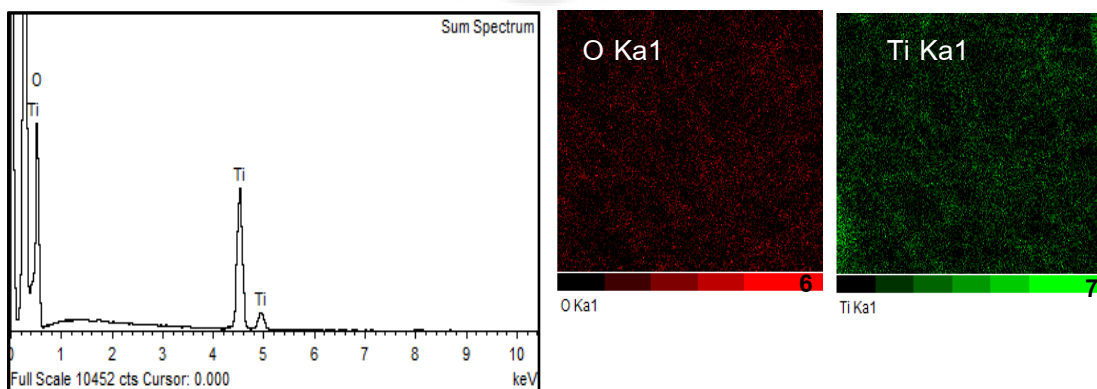
Element ชิ้นงาน	Weight%				Atomic%			
	O K	Ti K	Cl K	Au M	O K	Ti K	Cl K	Au M
A-0	53.67	46.33	-	-	77.62	22.38	-	-
A-450	64.56	35.44	-	-	84.51	15.49	-	-
B-0	65.73	33.35	0.92	-	85.05	14.41	0.54	-
B-450	49.71	48.49	-	1.81	75.26	24.52	-	0.22
C-0	57.93	37.58	1.77	2.72	81.02	17.55	1.12	0.31
C-450	47.23	49.58	-	3.19	73.74	25.86	-	0.40
D-0	60.17	35.45	1.58	2.81	82.48	16.23	0.98	0.31
D-450	49.06	47.33	-	3.60	75.29	24.26	-	0.45
E-0	65.09	30.19	1.86	2.86	85.37	13.23	1.10	0.31
E-450	50.07	45.48	-	4.45	76.30	23.15	-	0.55
F-0	67.73	27.08	1.94	3.25	86.93	11.61	1.12	0.34
F-450	46.47	47.67	-	5.86	73.92	25.32	-	0.76

3.2 การวิเคราะห์ธาตุโดยการกระจายของธาตุแบบแผนที่ (Mapping)

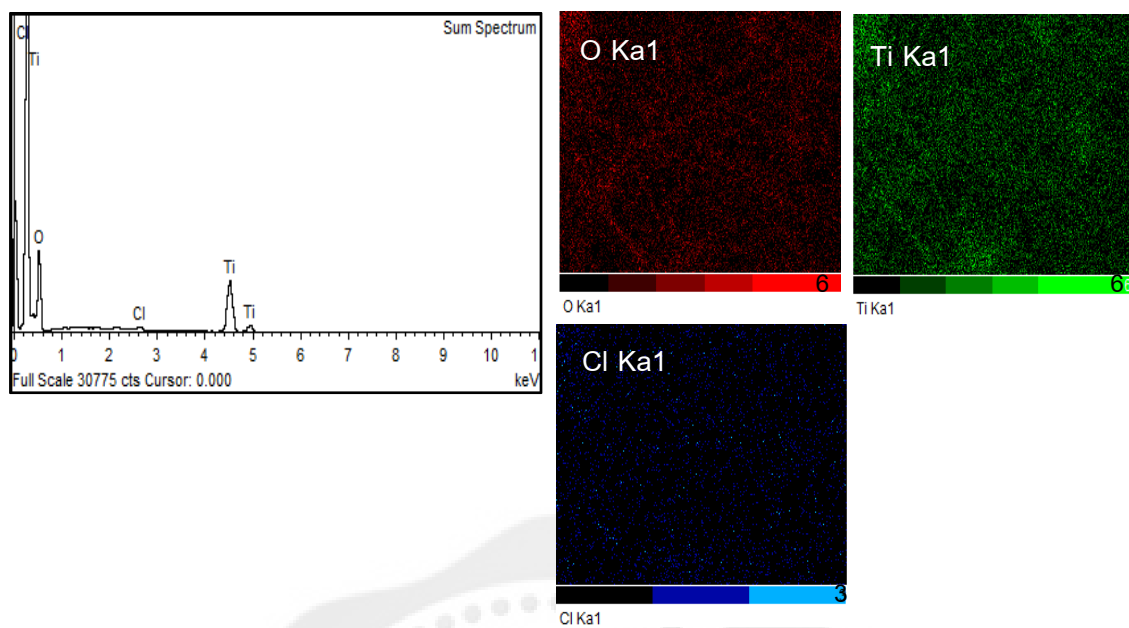
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบแผนที่ พบว่าเส้นใย A-0 มีส่วนประกอบของออกซิเจน (O) และไทเทเนียม (Ti) จะเห็นได้ว่าเส้นใย A-450 จะแสดงระดับความเข้มข้นของธาตุมากกว่า A-0 ดังภาพประกอบ 25-26 กรณี Au-TFs ก่อนการเผา จากภาพที่ 27 เส้นใย B-0 จะมีส่วนประกอบของออกซิเจน (O) ไทเทเนียม (Ti) และคลอรีน (Cl) แต่เมื่อเส้นใยผ่านการเผา B-450 ปรากฏส่วนประกอบของออกซิเจน (O) ไทเทเนียม (Ti) และทอง (Au) แต่ส่วนประกอบของคลอรีนหายไป ดังภาพที่ 28 และในกรณีการเพิ่มปริมาณทองคลอไรด์ เส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองที่ได้ มีส่วนประกอบของออกซิเจน (O) ไทเทเนียม (Ti) คลอรีน (Cl) และทอง (Au) ส่วนกรณีเส้นใยไทเทเนียเจือด้วยทองหลังจากการเผา ปรากฏส่วนประกอบของออกซิเจน (O) ไทเทเนียม (Ti) และทอง (Au) ซึ่งส่วนประกอบของคลอรีน (Cl) ถูกกำจัดไปด้วยอุณหภูมิเผา ดังภาพประกอบ 29-36



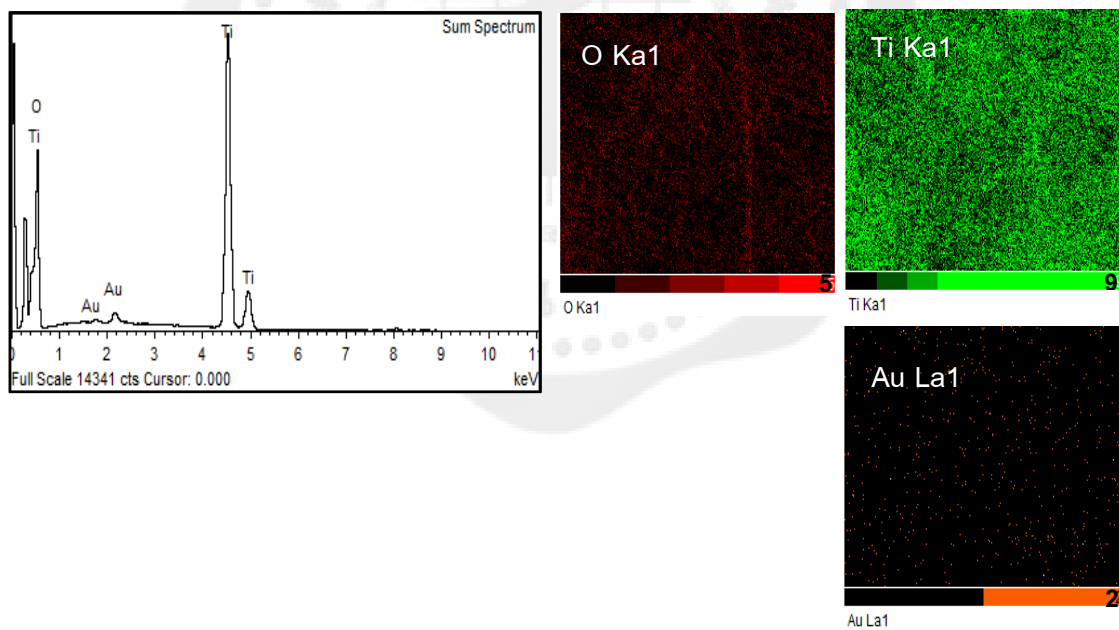
ภาพประกอบ 25 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ A-0



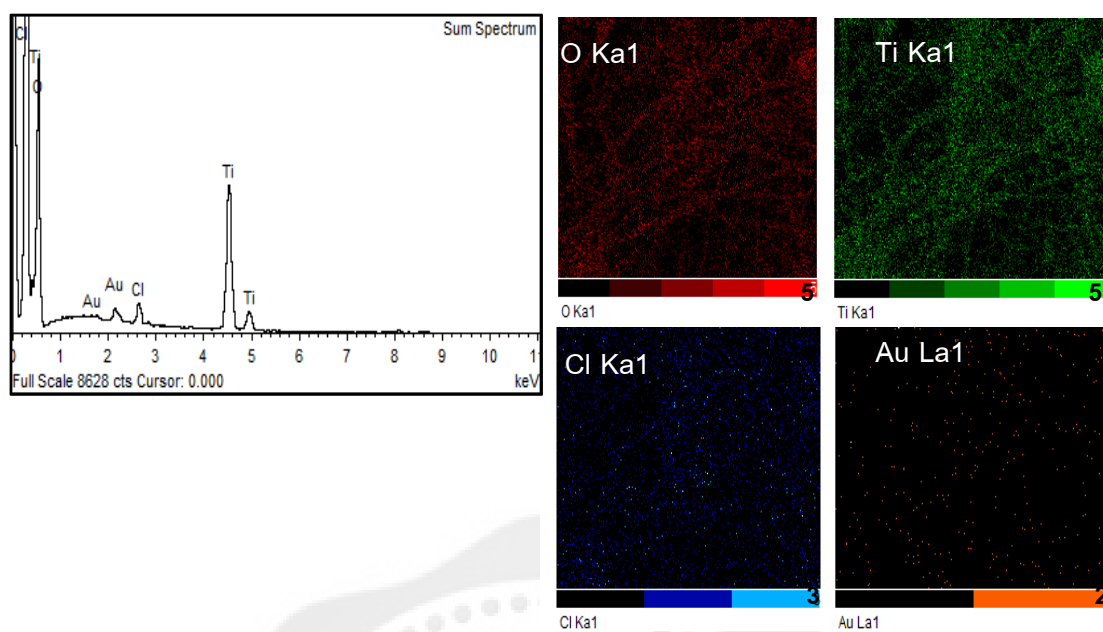
ภาพประกอบ 26 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ A-450



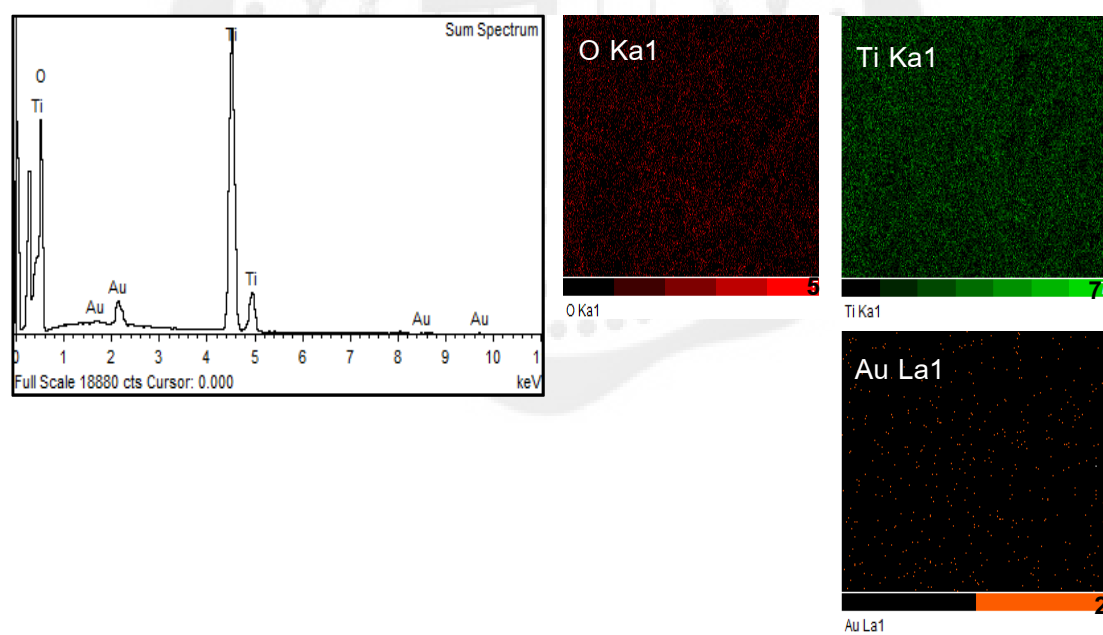
ภาพประกอบ 27 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ B-0



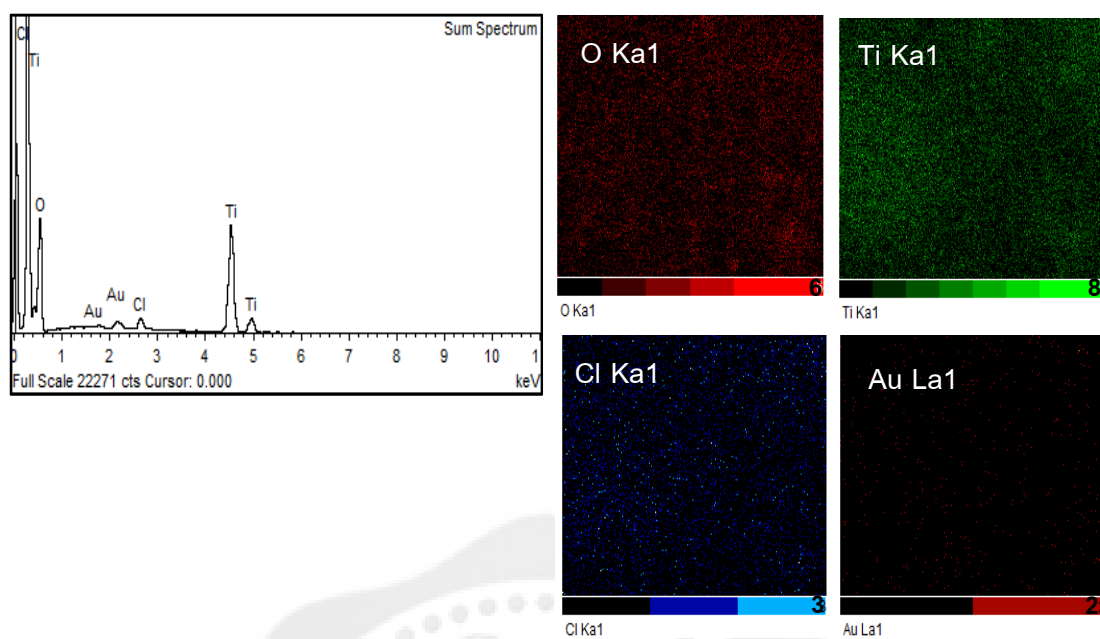
ภาพประกอบ 28 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ B-450



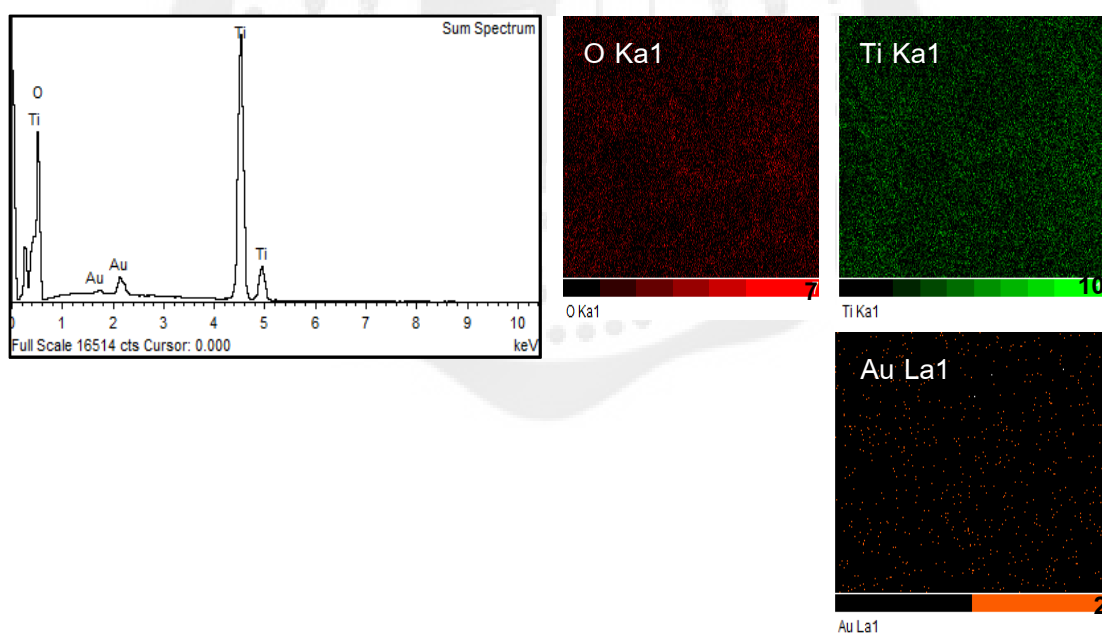
ภาพประกอบ 29 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ C-0



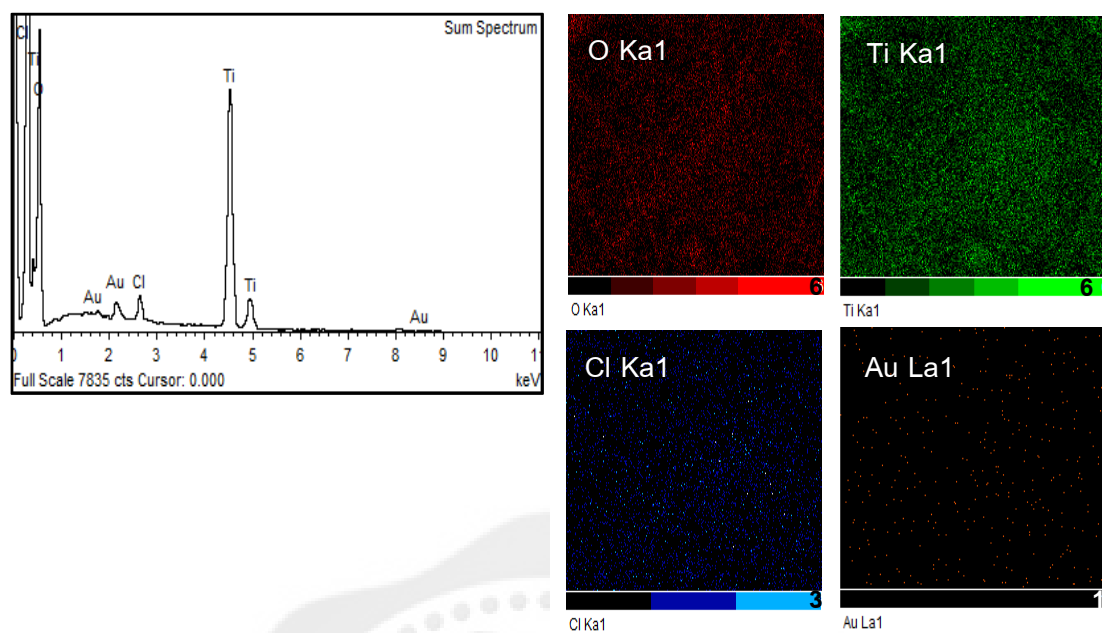
ภาพประกอบ 30 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ C-450



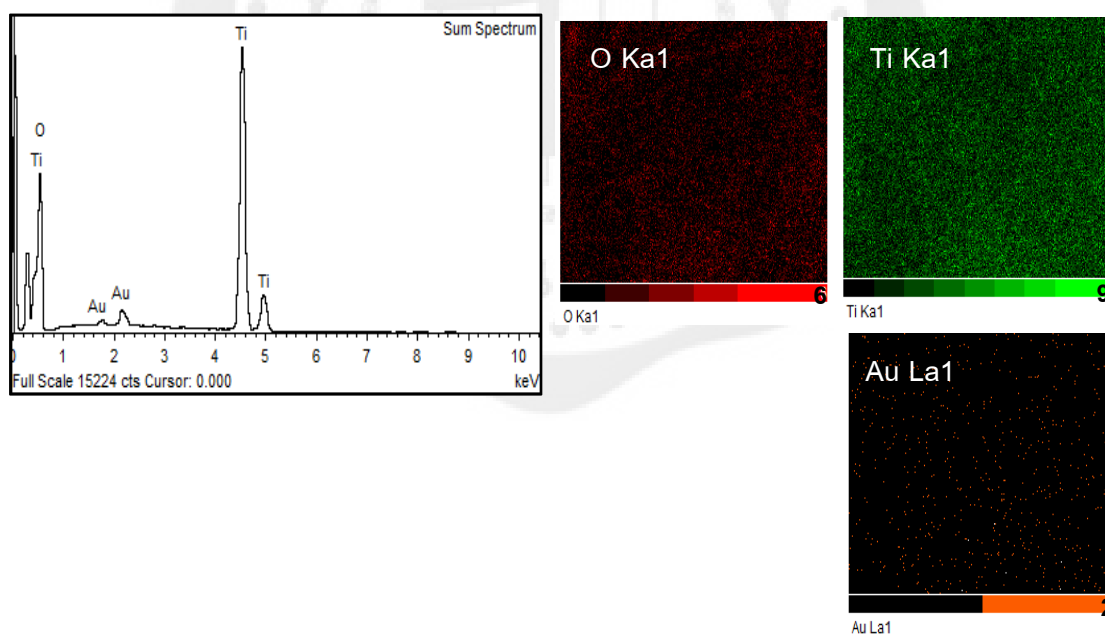
ภาพประกอบ 31 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ D-0



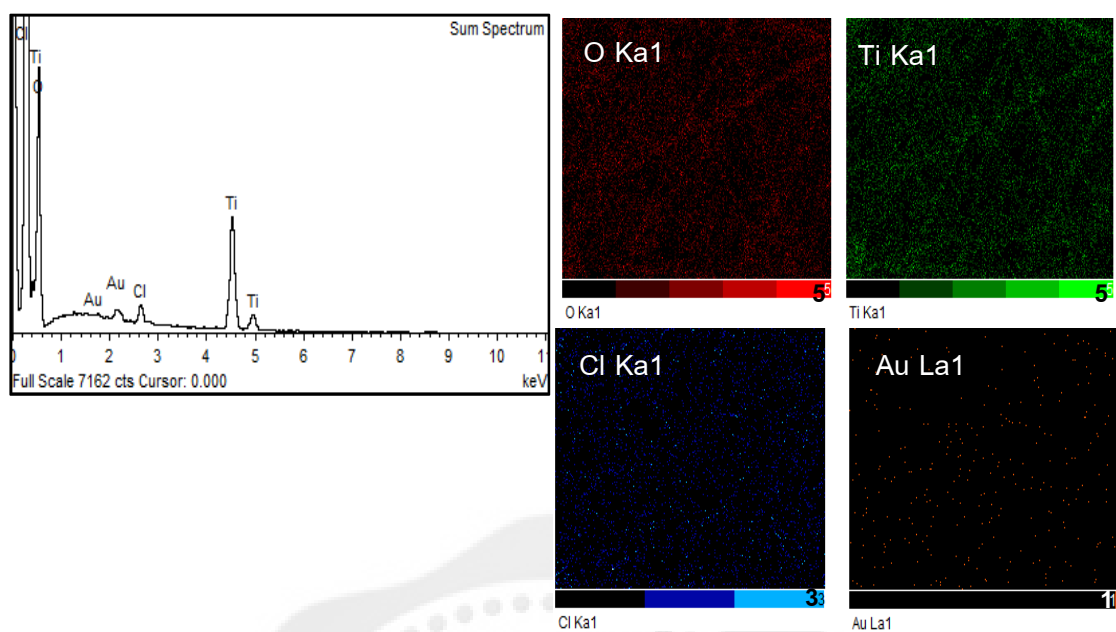
ภาพประกอบ 32 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ D-450



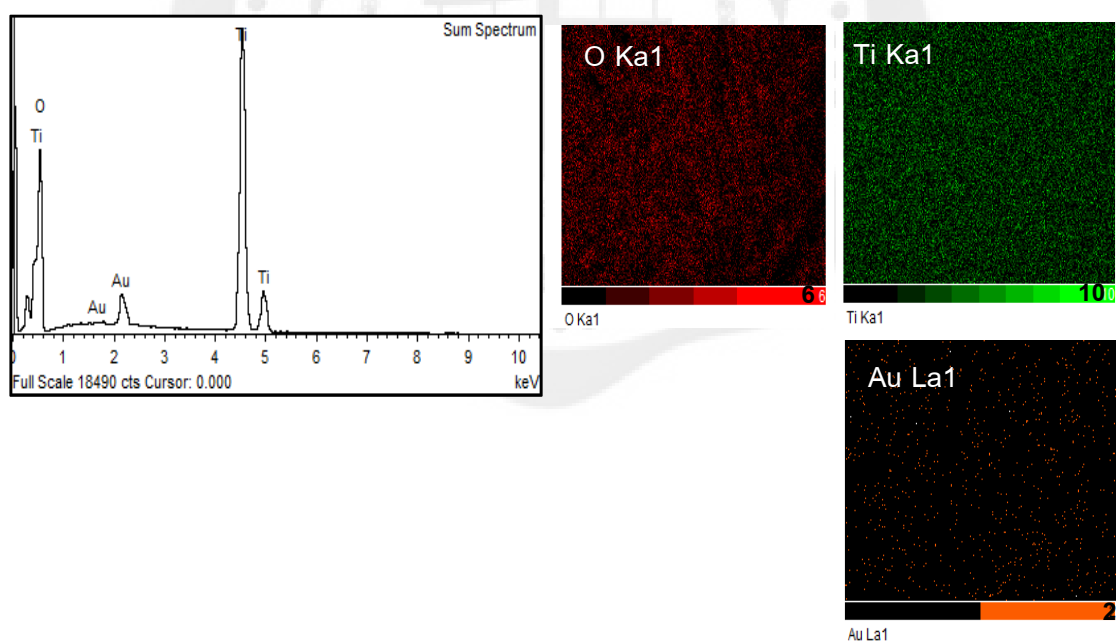
ภาพประกอบ 33 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ E-0



ภาพประกอบ 34 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ E-450



ภาพประกอบ 35 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ F-0



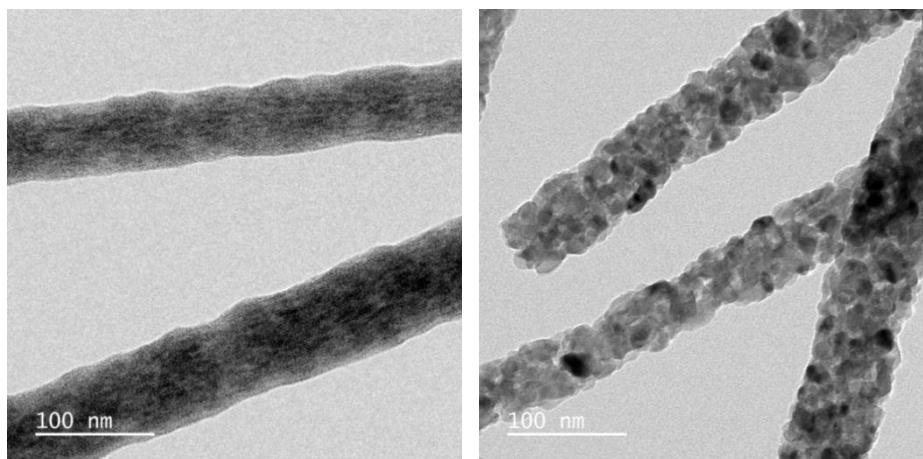
ภาพประกอบ 36 แผนที่การกระจายของธาตุ (Mapping) ของ F-450

4. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของทองในเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง

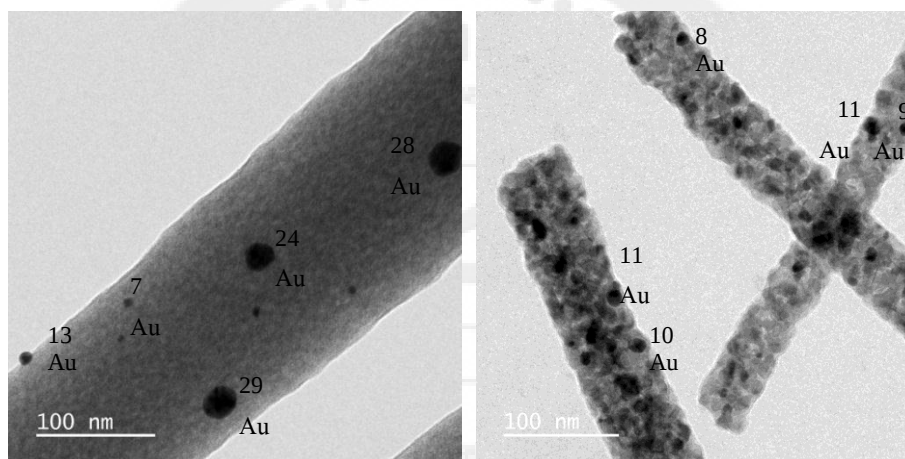
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานของทองที่เจือในเส้นใย (Au-TFs) ก่อนเผาและหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM) ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ลักษณะสัณฐานทอง ใน Au-TFs

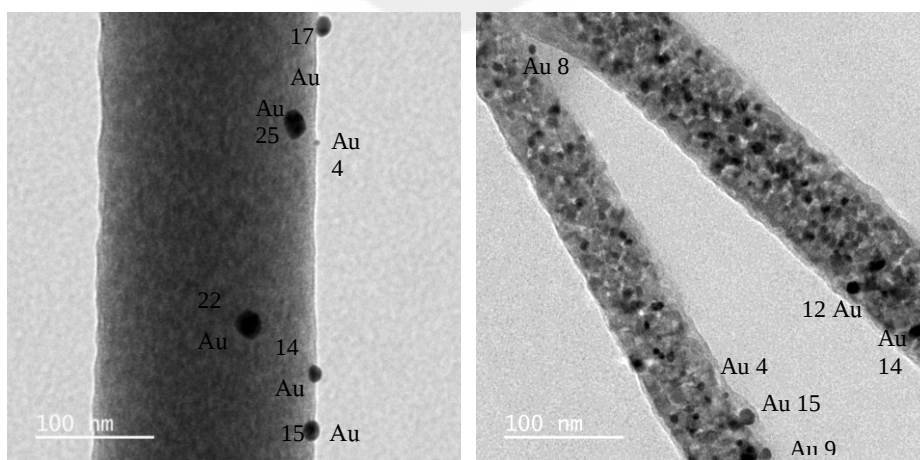
ในการจำแนกประเภทพิจารณาลักษณะสัณฐานทองด้วย TEM จำเป็นต้องเปรียบเทียบลักษณะ Au-TFs และ TFs เส้นใย A-0 ก่อนการเผามีลักษณะผิวเรียบ แต่เมื่อผ่านการเผากำจัดสารอินทรีย์ A-450 มีผิวลักษณะขรุขระ เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกกำจัดไป แสดงดังภาพประกอบ 37 ส่วนกรณี Au-TFs แสดงดังภาพประกอบ 38-42 ก่อนการเผา จะพบทองปรากฏอยู่ในเส้นใยไทเทเนียม มีลักษณะเป็นก้อนกลม สีเข้ม บางก้อนฝังอยู่ในเส้นใย แต่บางก้อนจะมีส่วนที่โผล่ออกจากเส้นใย เมื่อผ่านเผา Au-TFs จะมีผิวลักษณะขรุขระเนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดออก ทองมีลักษณะเป็นก้อนชัดเจน สีเข้ม ปรากฏอยู่ในเส้นใย



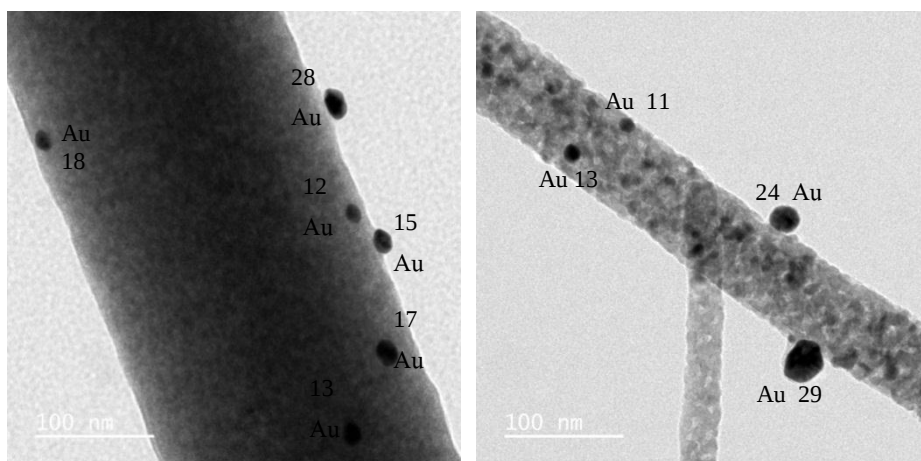
ภาพประกอบ 37 ลักษณะ A-0 (ซ้าย) และ A-450 (ขวา) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



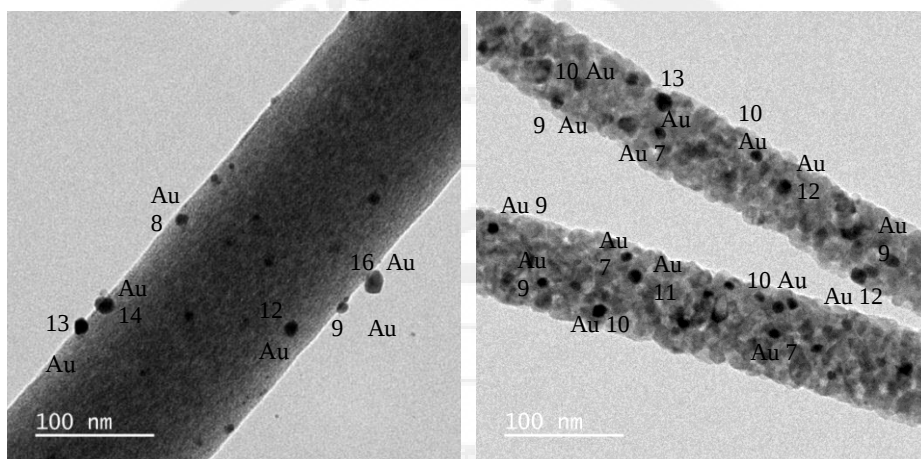
ภาพประกอบ 38 ขนาดทอง B-0 (ซ้าย) และ B-450 (ขวา) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



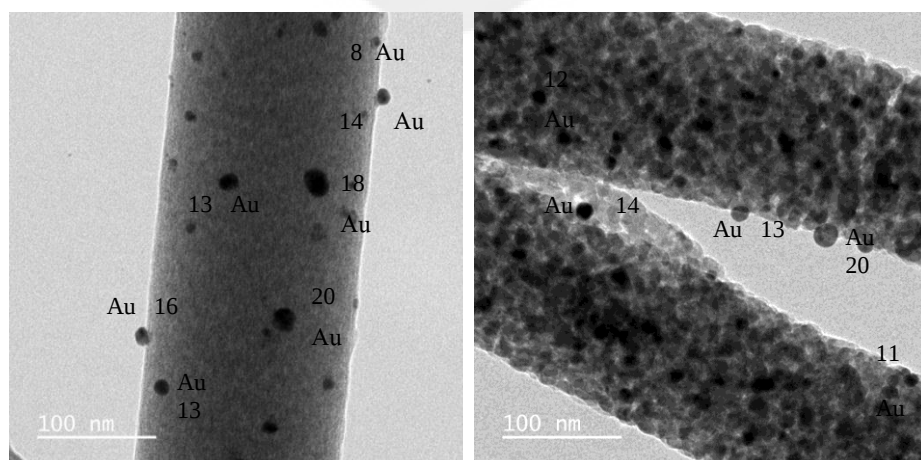
ภาพประกอบ 39 ขนาดทอง C-0 (ซ้าย) และ C-450 (ขวา) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



ภาพประกอบ 40 ขนาดทอง D-0 (ซ้าย) และ D-450 (ขวา) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



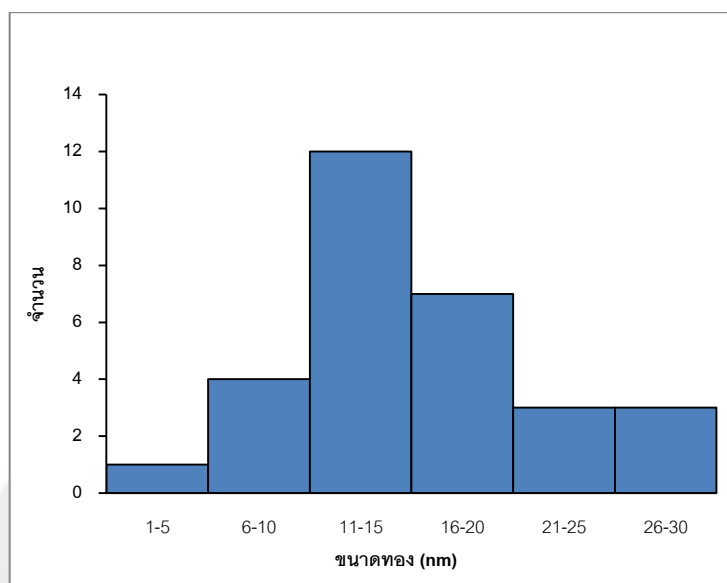
ภาพประกอบ 41 ขนาดทอง E-0 (ซ้าย) และ E-450 (ขวา) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



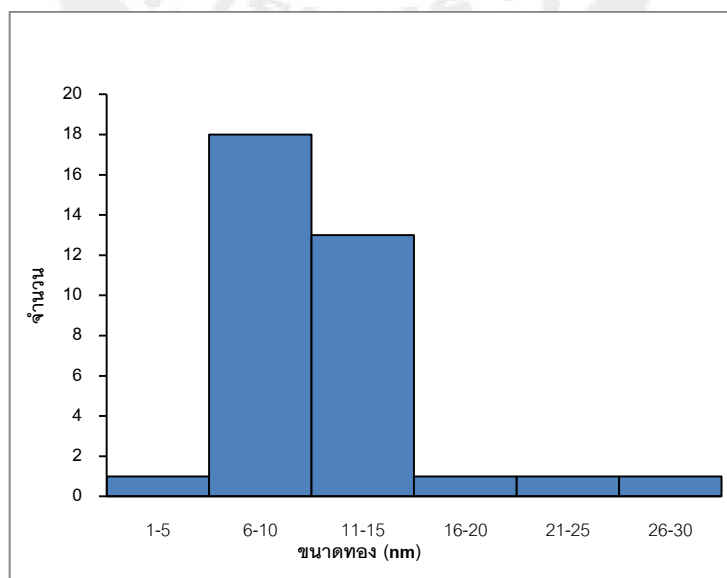
ภาพประกอบ 42 ขนาดทอง F-0 (ซ้าย) และ F-450 (ขวา) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

4.2 ผลการศึกษาขนาดของทอง ใน Au-TFs

จากการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทอง โดยใช้โปรแกรม ImageJ ผลที่ได้คือ Au-TFs ก่อนการเผา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทองเฉลี่ย 15.8 นาโนเมตร และ Au-TFs หลังการเผามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทองเฉลี่ย 11.3 นาโนเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแสดงดังภาพประกอบ 43 และ 44



ภาพประกอบ 43 ขนาดทอง ของ Au-TFs ก่อนการเผา



ภาพประกอบ 44 ขนาดทอง ของ Au-TFs หลังการเผา

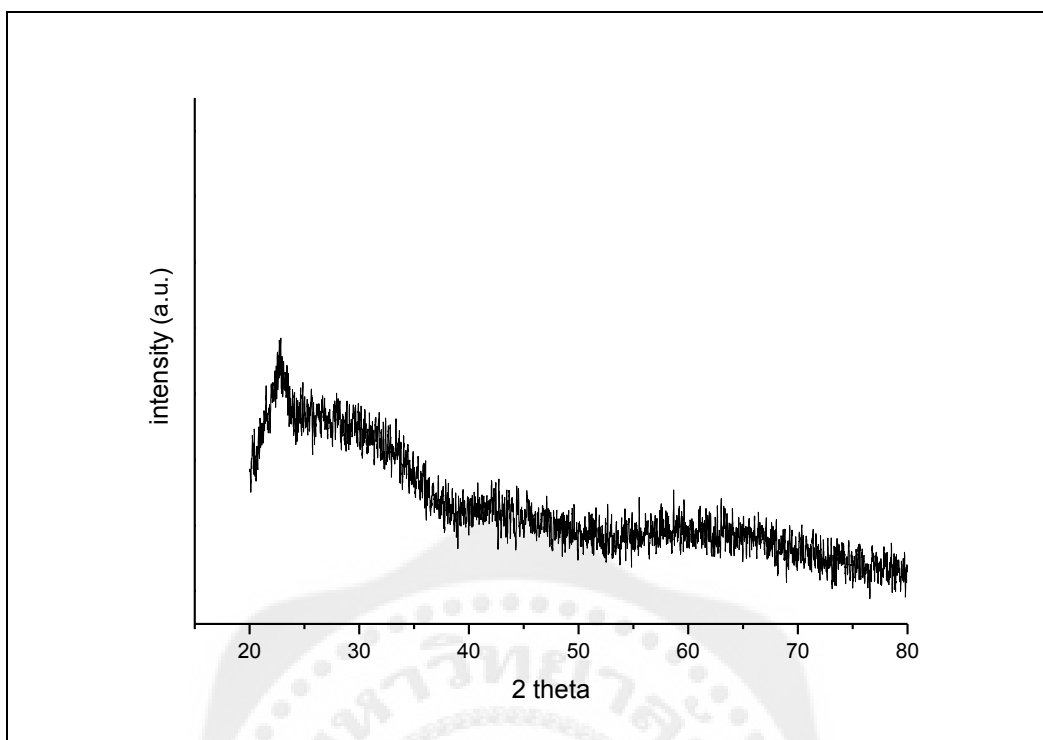
5. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

จากการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเส้นใยไทเทเนียม (TFs) และเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง (Au-TFs) ก่อนเผาและหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ได้ผลการศึกษาดังนี้

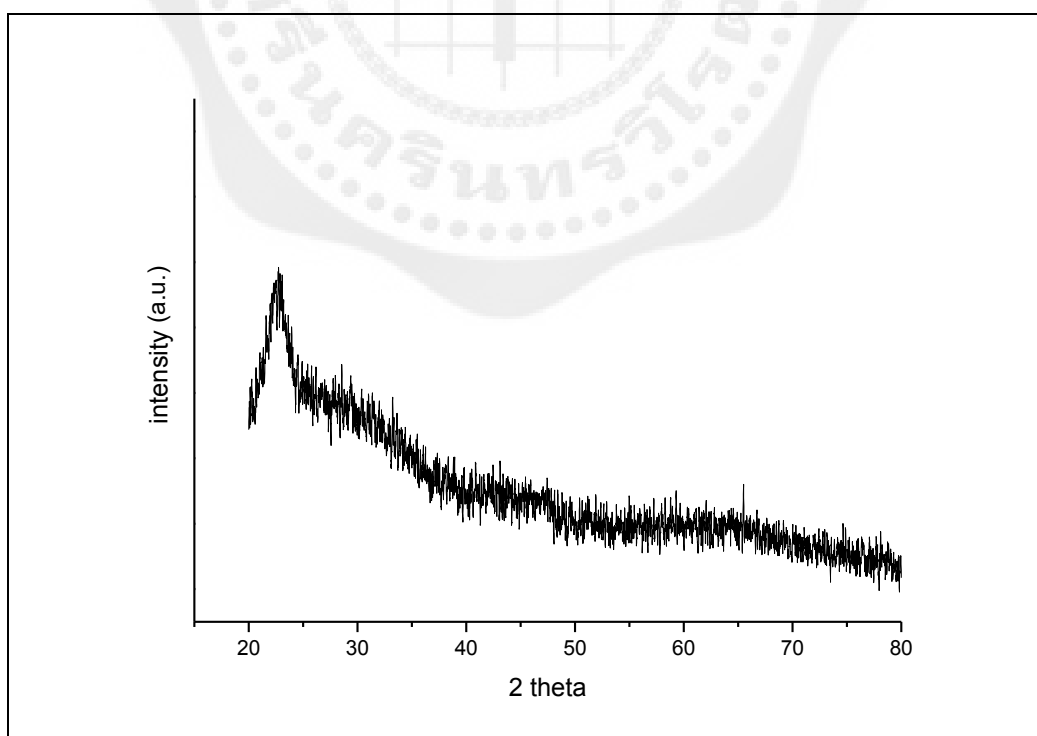
5.1 โครงสร้างผลึกของ TFs และ Au-TFs ก่อนการเผา

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของ TFs และ Au-TFs ก่อนการเผา เปรียบเทียบกับค่า intensity ของสารมาตรฐาน TiO_2 (JCPDS No.78-2486) และ Au (JCPDS No. 04-0784) พบว่า ทั้ง TFs และ Au-TFs ก่อนการเผา ปรากฏลักษณะโครงสร้างของเส้นใยมีโครงสร้างแบบ อสัณฐาน (Amorphous) แสดงดังภาพประกอบ 45-50

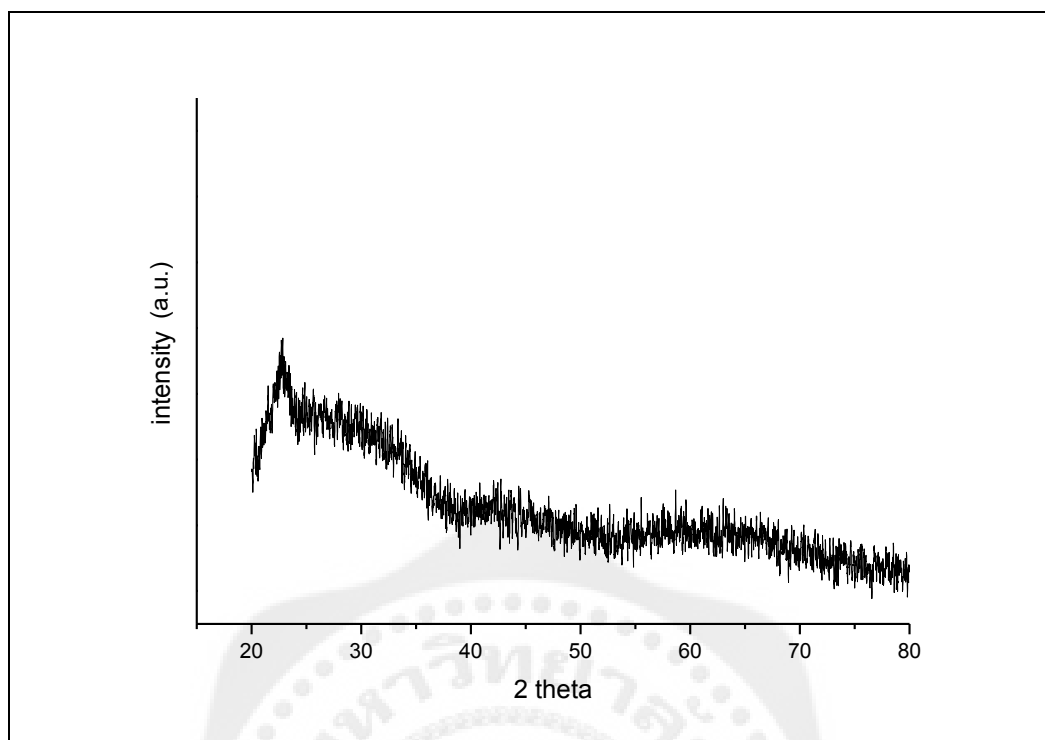




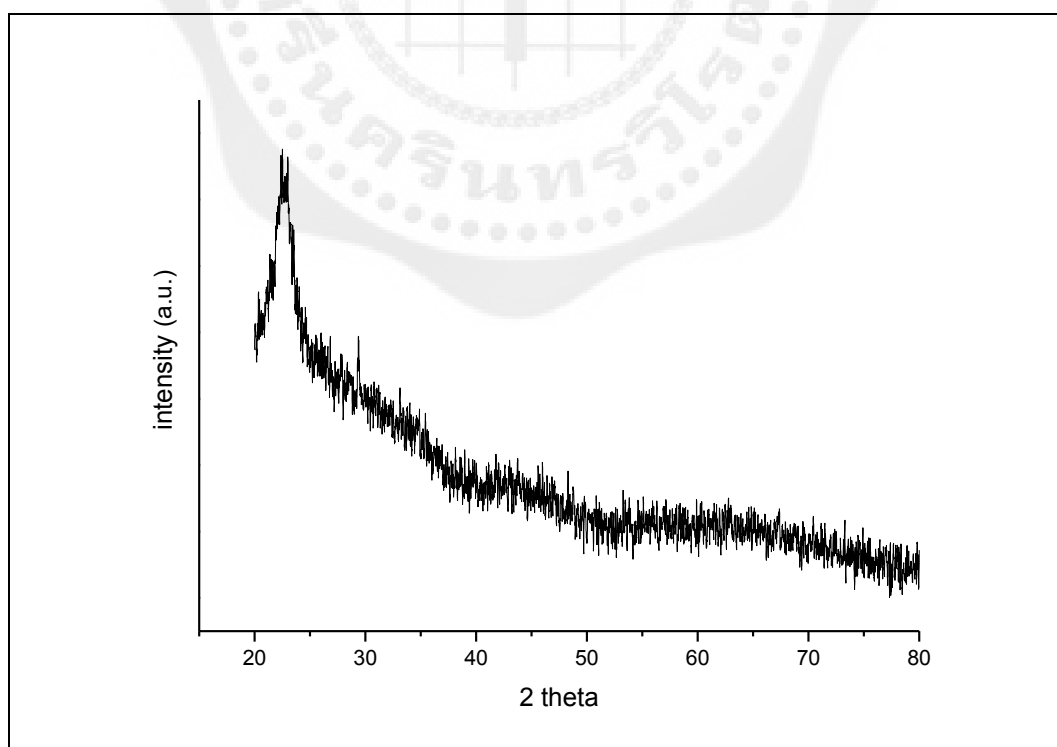
ภาพประกอบ 45 XRD pattern ของ A-0



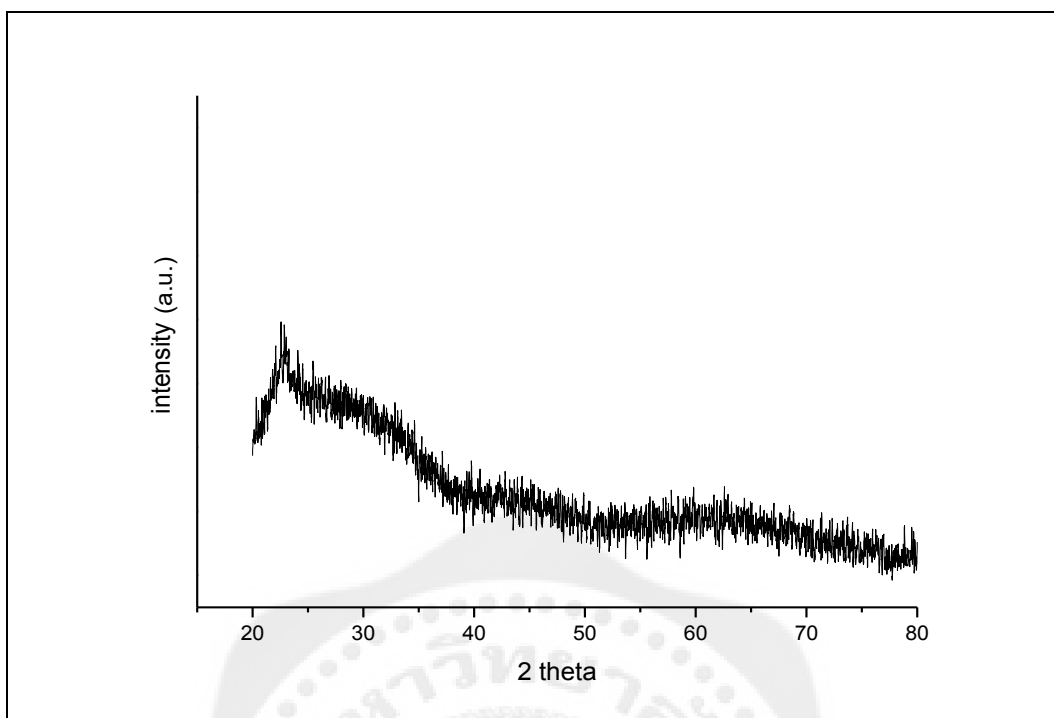
ภาพประกอบ 46 XRD pattern ของ B-0



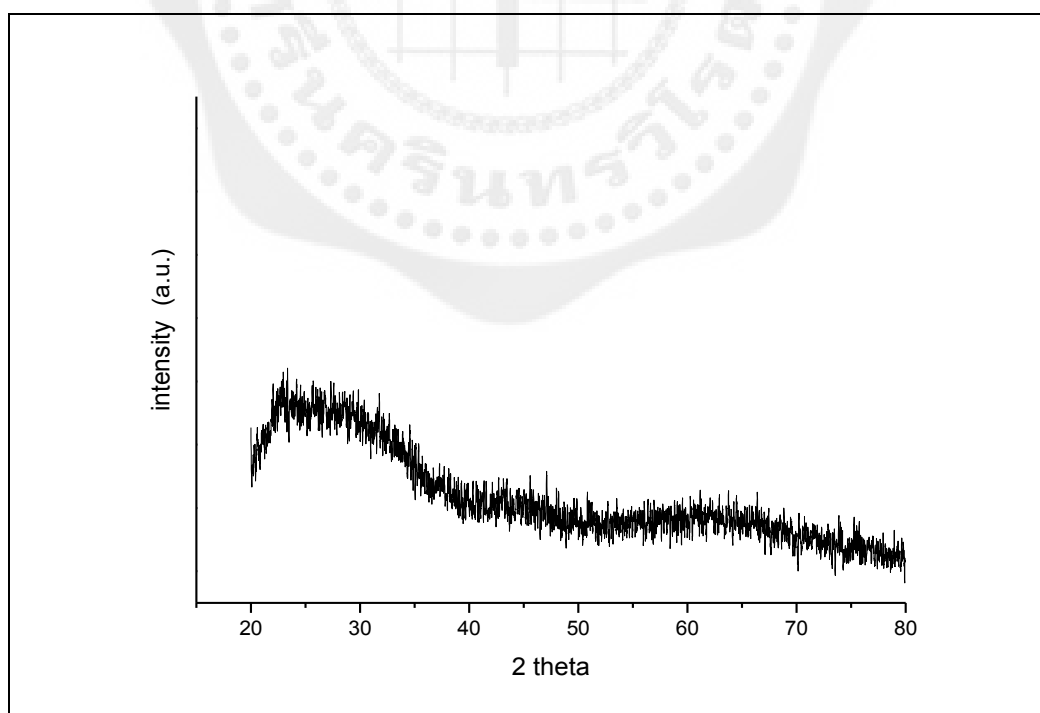
ภาพประกอบ 47 XRD pattern ของ C-0



ภาพประกอบ 48 XRD pattern ของ D-0



ภาพประกอบ 49 XRD pattern ของ E-0



ภาพประกอบ 50 XRD pattern ของ F-0

5.2 โครงสร้างผลึกของ TFs และ Au-TFs หลังการเผา

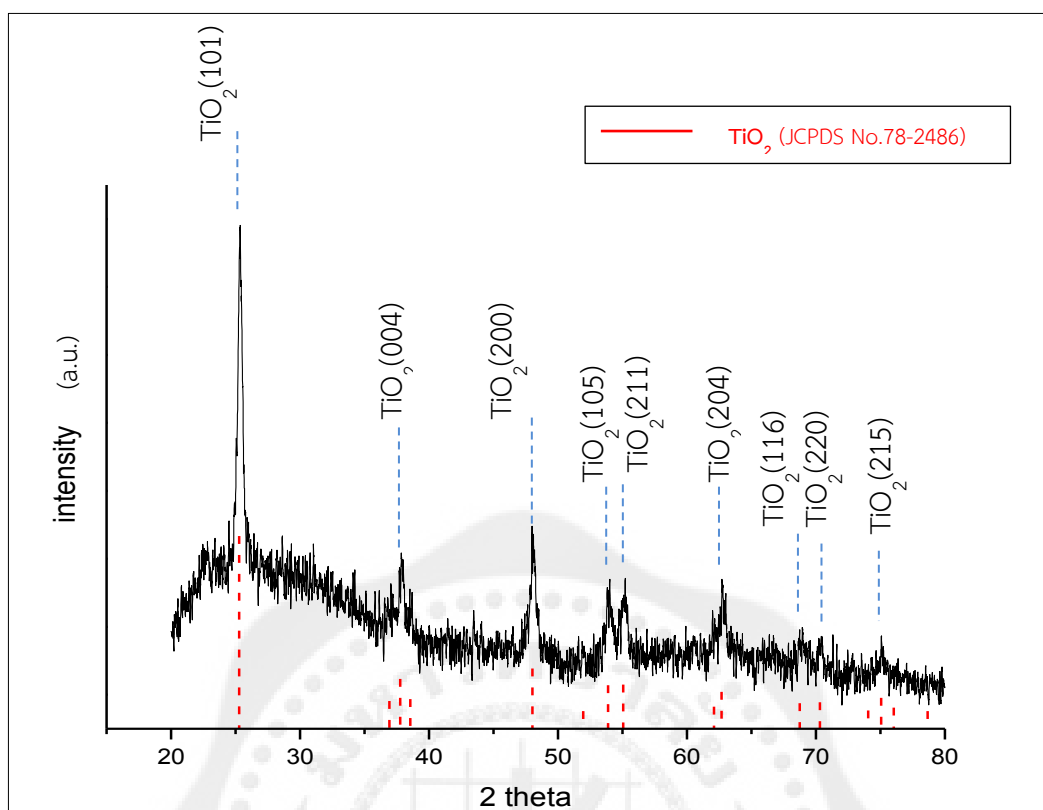
ผลการศึกษาโครงสร้างของ TFs และ Au-TFs หลังการเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับค่า intensity ของสารมาตรฐาน TiO_2 (JCPDS No.78-2486) และ Au (JCPDS No. 04-0784) พบว่า

- TFs ปรากฏไทเทเนีย (TiO_2) โครงสร้างแบบอะนาเทส (Anatase phase) โดยมีระนาบที่ระบุได้คือ ระนาบ (101) (004) (200) (105) (211) (204) (116) (220) และ (215)

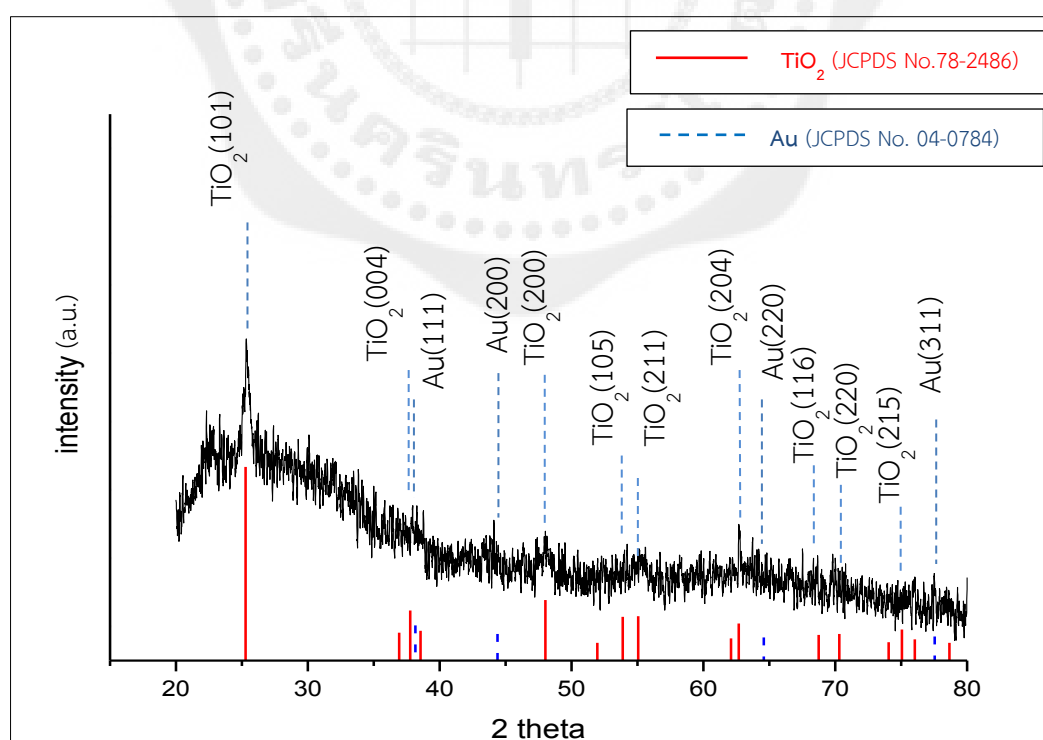
- Au-TFs ปรากฏไทเทเนีย (TiO_2) โครงสร้างแบบอะนาเทส (Anatase phase) โดยมีระนาบที่ระบุได้คือ (101) (004) (200) (105) (211) (204) (116) (220) และ (215) และปรากฏทอง (Au) โดยมีระนาบที่ระบุได้คือ (111) (200) (220) และ (311)

จากผล XRD ของเส้นใยที่มีปริมาณทองแตกต่างกัน จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเหมือนกัน ดังภาพประกอบ 51-56

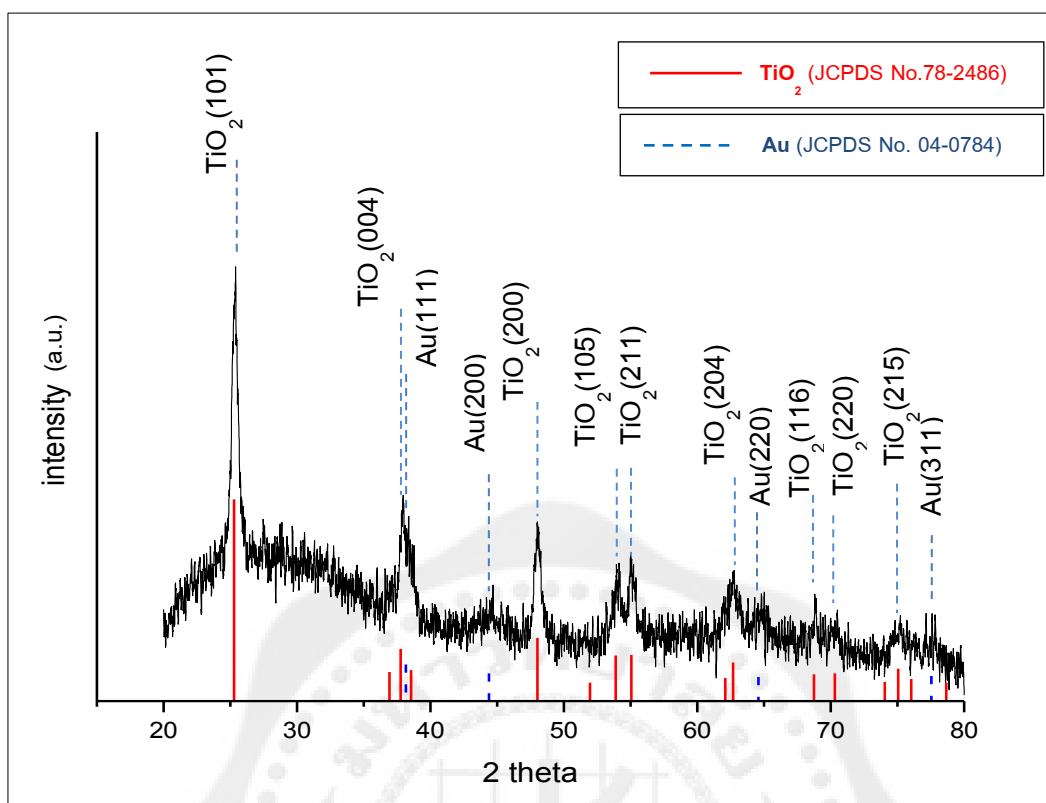
การเติมโกลด์คลอไรด์ไฮเดรทในขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล ไม่ได้ทำให้โครงสร้างของทองแทรกในโครงสร้างของไทเทเนีย สังเกตจากระนาบของทองกับระนาบของไทเทเนียเป็นระนาบที่ไม่เหมือนกัน การเติมทองจึงไม่ทำให้เปลี่ยนโครงสร้างของไทเทเนีย



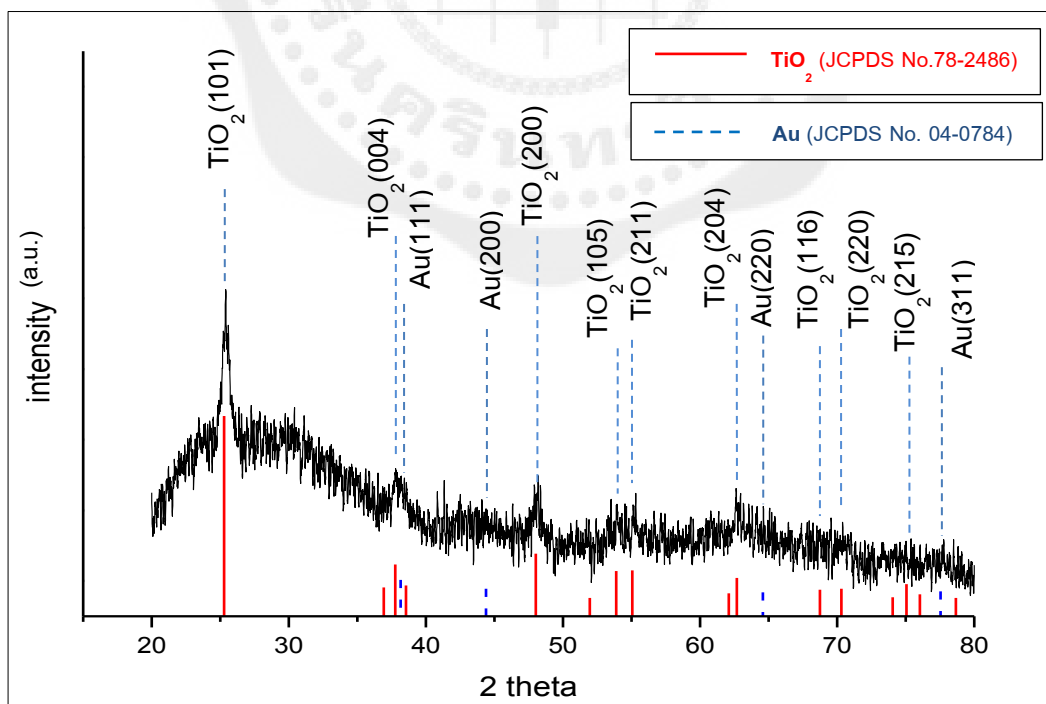
ภาพประกอบ 51 XRD pattern ของ A-450



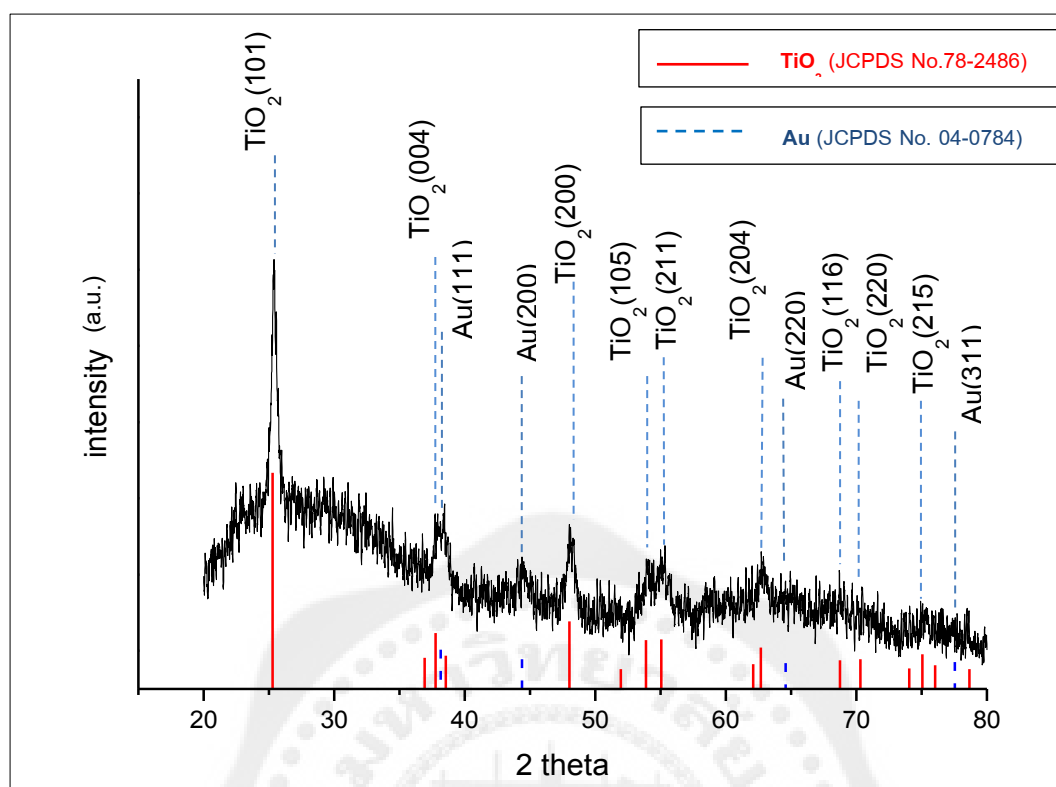
ภาพประกอบ 52 XRD pattern ของ B-450



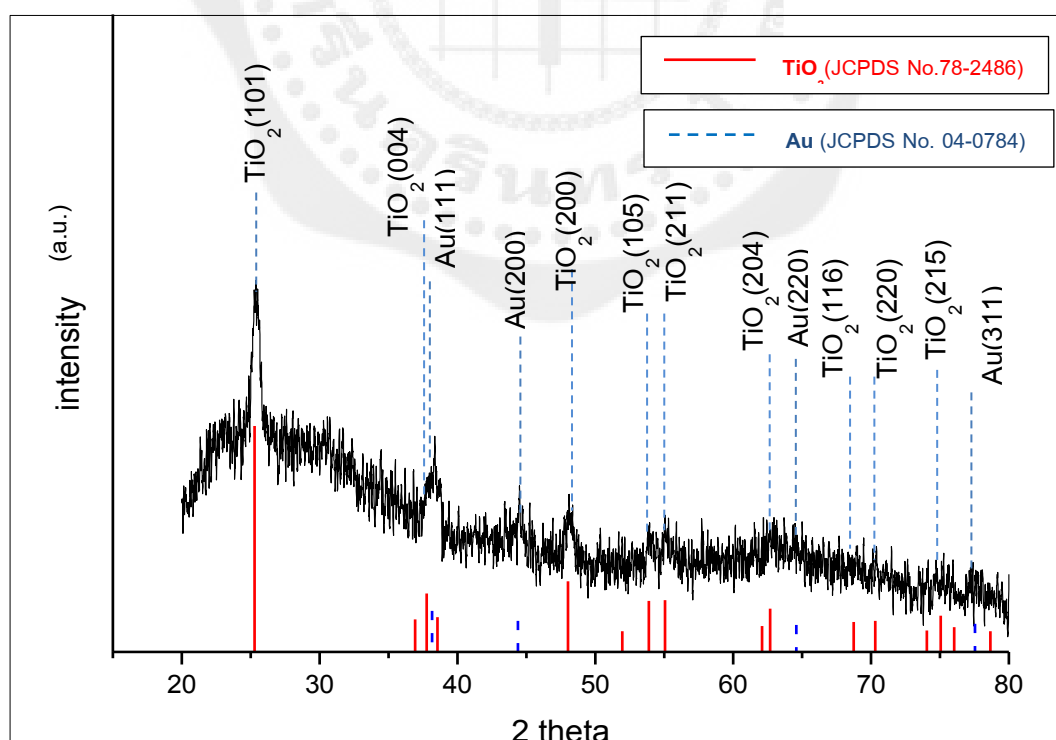
ภาพประกอบ 53 XRD pattern ของ C-450



ภาพประกอบ 54 XRD pattern ของ D-450



ภาพประกอบ 55 XRD pattern ของ E-450



ภาพประกอบ 56 XRD pattern ของ F-450

6. ผลของทองที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงาน

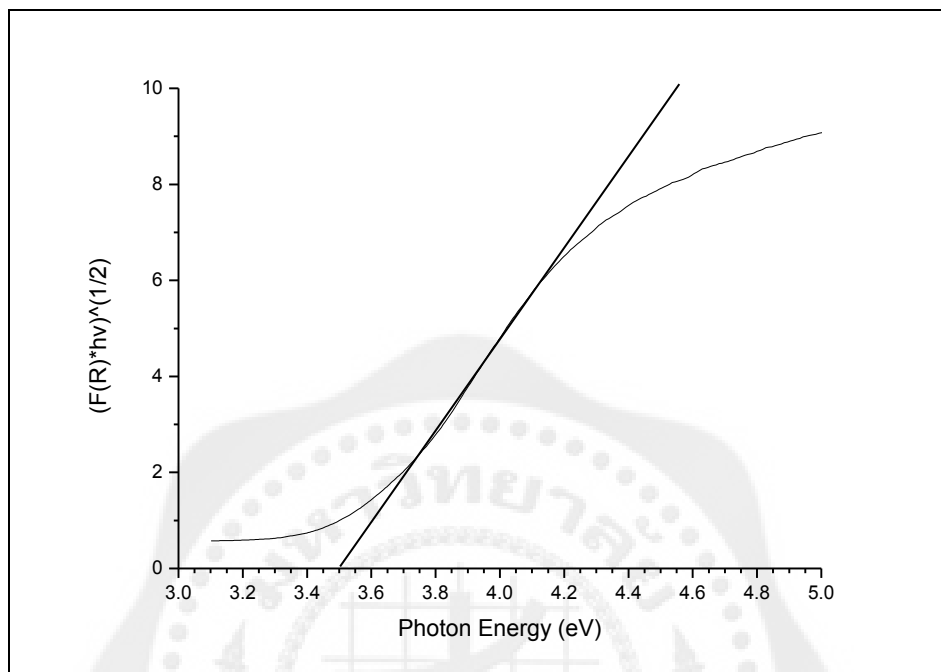
จากการศึกษาผลของทองที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยไทเทเนียม (TFs) และ เส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง (Au-TFs) ก่อนเผาและหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องตรวจวัดสารด้วยการสะท้อนแสง (UV-Vis Diffuse Reflectance Spectra: UV-Vis Spectroscopy) และคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานโดยใช้ทฤษฎี Kubelka-Munk ได้ผลการศึกษาลงแสดงตาราง 6 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า TFs และ Au-TFs เป็นการดูดกลืนแบบไม่ตรง (Indirect absorption) เนื่องจากไทเทเนียมที่มีเฟสอะนาเทสจะมีค่าแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV⁽⁸²⁻⁸⁵⁾ ผลจากการทดลองและการคำนวณด้วยทฤษฎี Kubelka-Munk จะเห็นว่า กรณีการดูดกลืนแบบไม่ตรง ($n = \frac{1}{2}$) ให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยเป็น 3.2 eV พิจารณา เปรียบเทียบในกรณีการดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง ($n = \frac{1}{2}$) ระหว่างขั้นตอนก่อนการเผา และขั้นตอนหลังการเผา ด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส สังเกตได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเส้นใยก็มีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานแสดงดังภาพประกอบ 57-80 โดยการเผาเส้นใยด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะให้ค่าแถบช่องว่างพลังงาน น้อยกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยในกรณีไม่เผา แต่ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ Au-TFs หลังการเผา ไม่สม่ำเสมอเมื่อเติมทองปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากขั้นตอนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับการปั่น TFs เงื่อนไขไม่เหมาะสมกับความเข้มข้นของโซล-เจล ที่มีการเติมทอง ส่งผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานดังที่ปรากฏ

ตาราง 6 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของเส้นใยเงื่อนไขต่างๆ

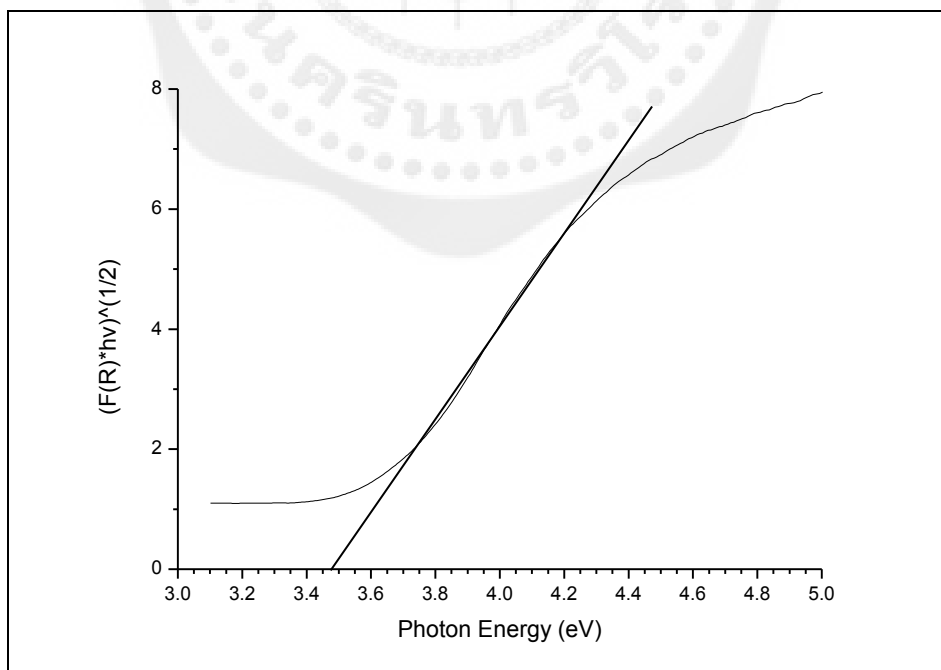
ชั้นงาน	ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (eV)	
	การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง $n=\frac{1}{2}$	การดูดกลืนแสงแบบตรง $n=2$
A-0	3.50	3.92
B-0	3.48	3.98
C-0	3.37	3.83
D-0	3.38	3.93
E-0	3.49	3.95
F-0	3.51	3.96
A-450	3.20	3.55
B-450	3.30	3.77
C-450	3.08	3.63
D-450	3.17	3.75
E-450	3.44	4.00
F-450	3.32	3.54

6.1 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TFs และ Au-TFs ก่อนการเผา

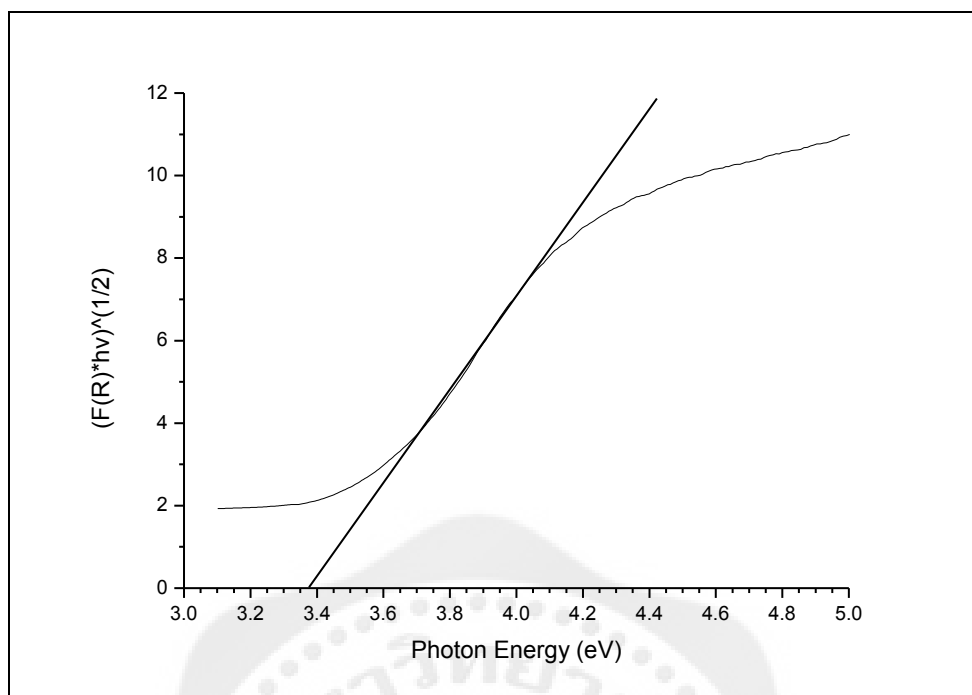
6.1.1 การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง (Indirect absorption) หรือ กรณี $n = \frac{1}{2}$



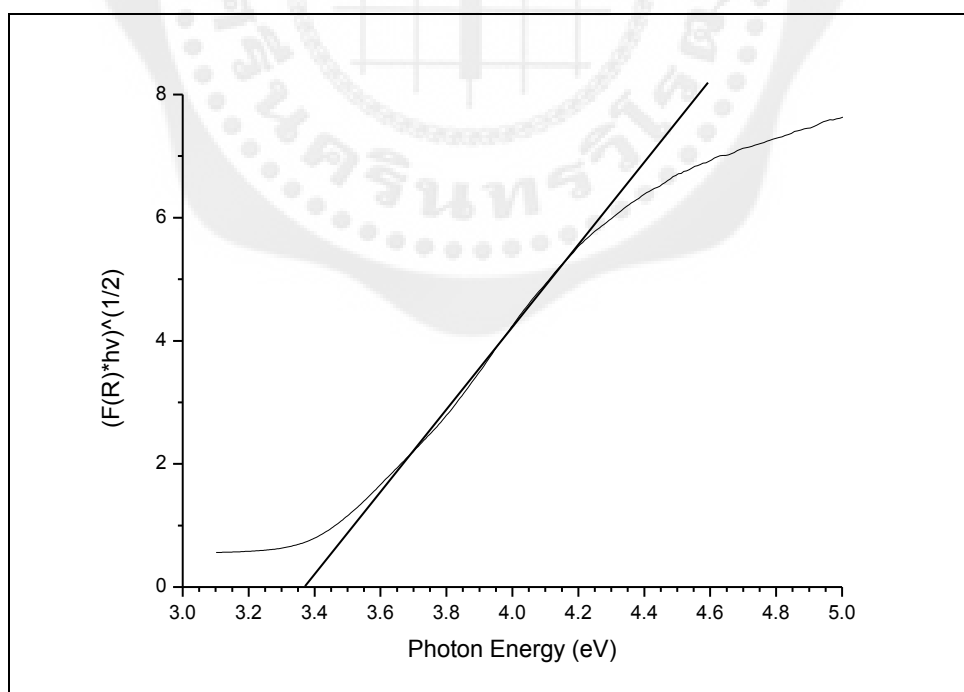
ภาพประกอบ 57 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$



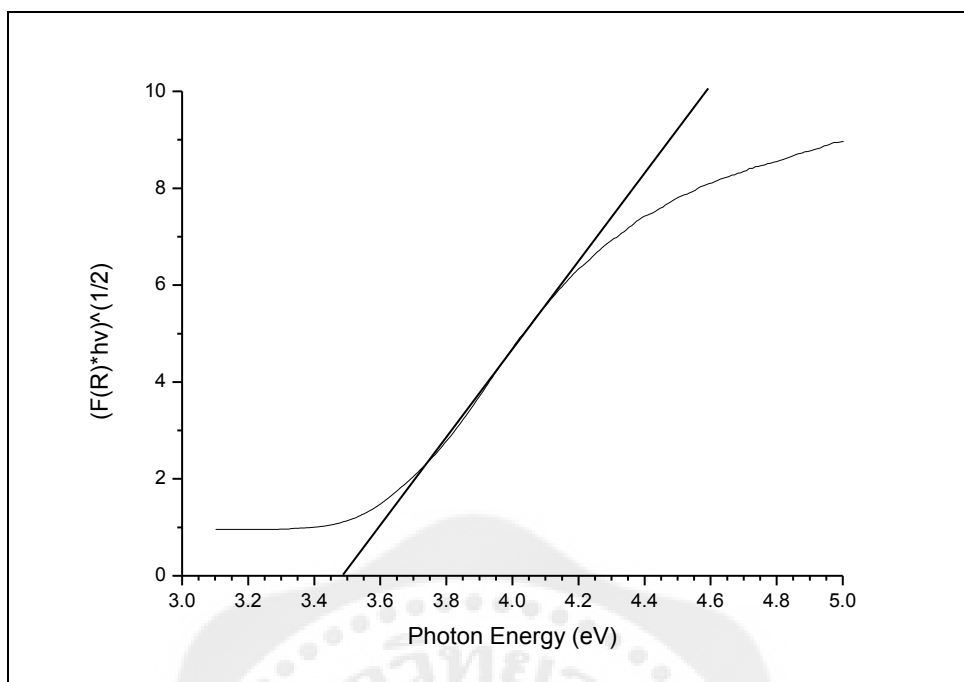
ภาพประกอบ 58 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$



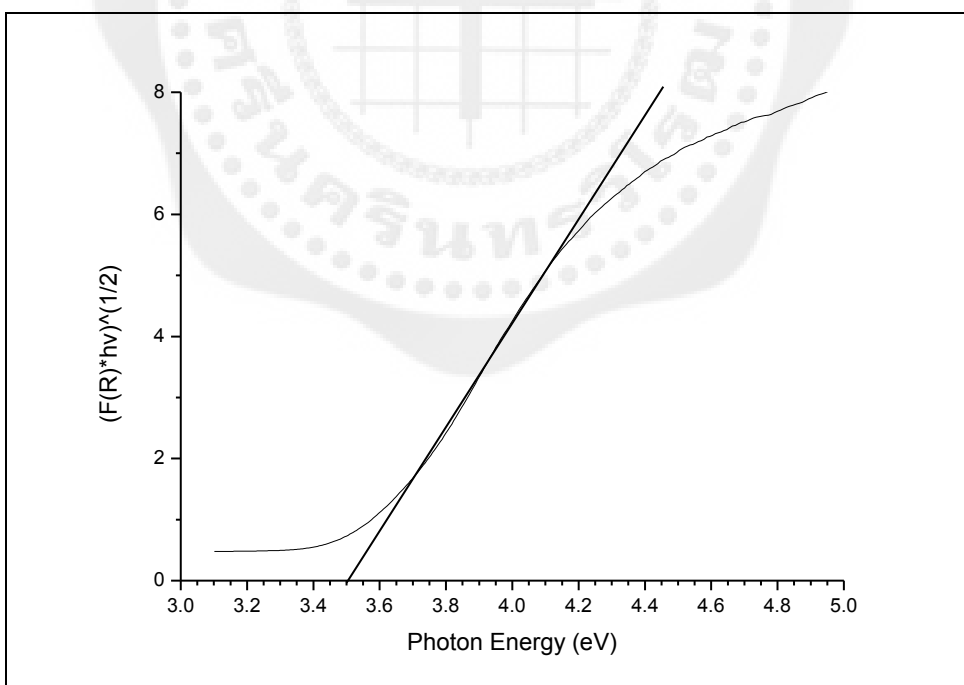
ภาพประกอบ 59 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$



ภาพประกอบ 60 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$

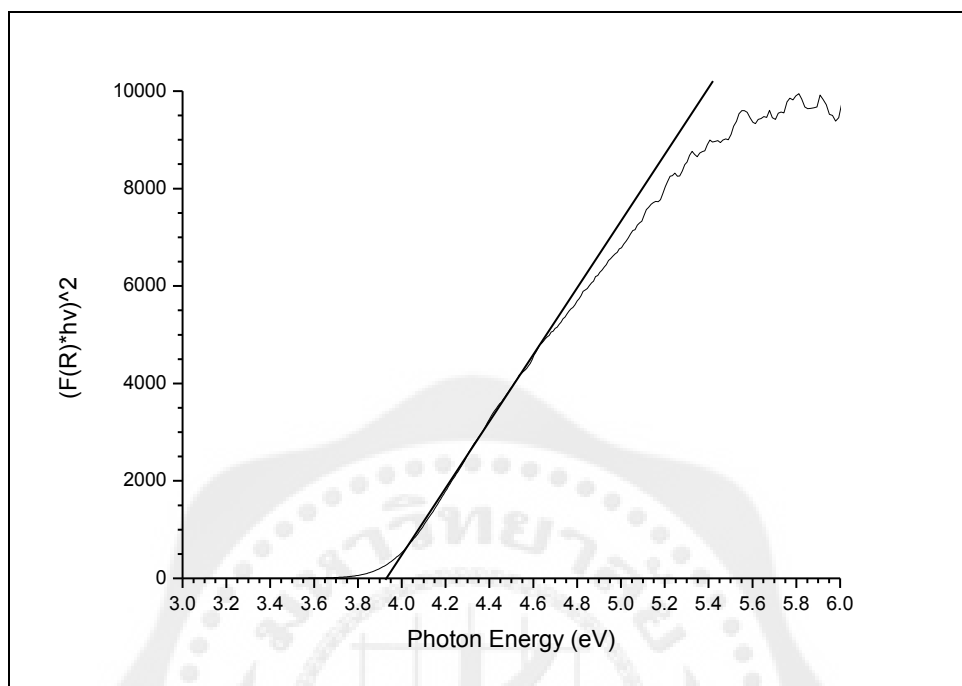


ภาพประกอบ 61 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$

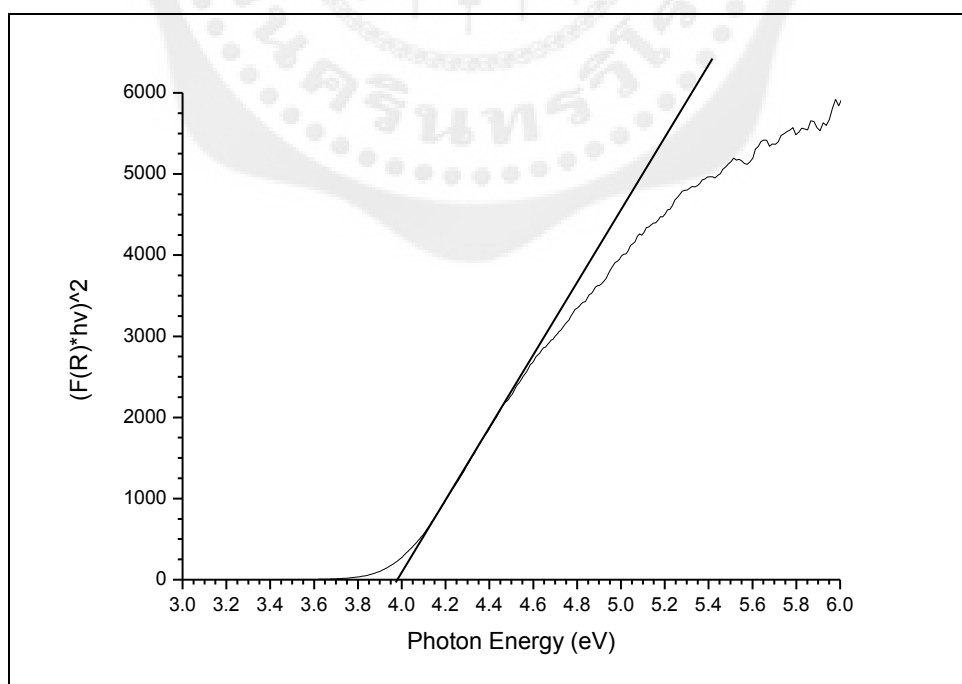


ภาพประกอบ 62 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-0 กรณี $n = \frac{1}{2}$

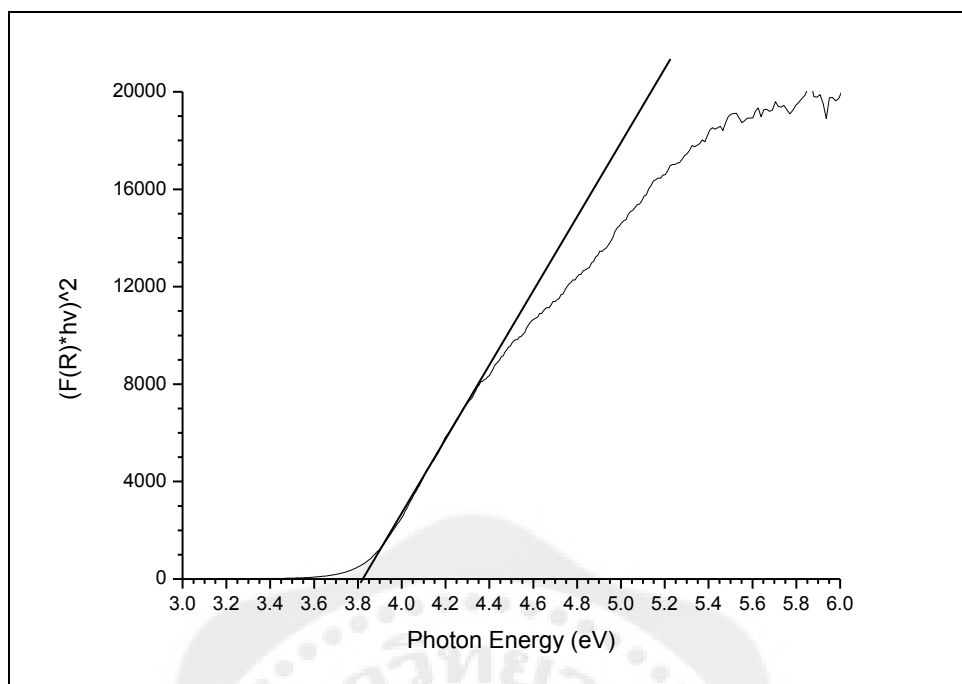
6.1.2 การดูดกลืนแสงแบบตรง (Direct absorption) หรือ กรณี $n=2$



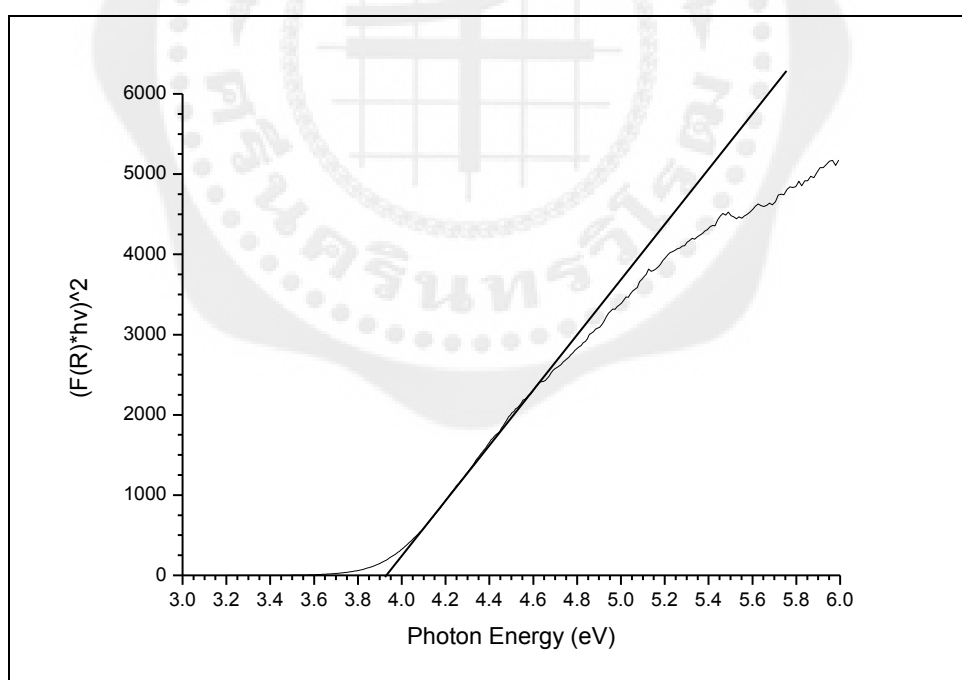
ภาพประกอบ 63 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-0 กรณี $n=2$



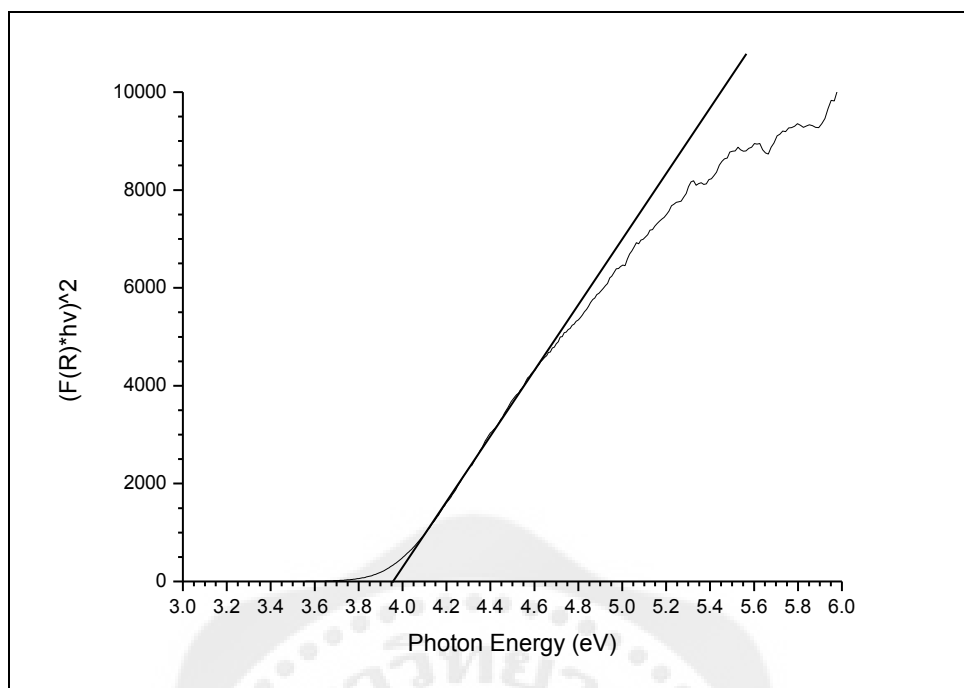
ภาพประกอบ 64 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-0 กรณี $n=2$



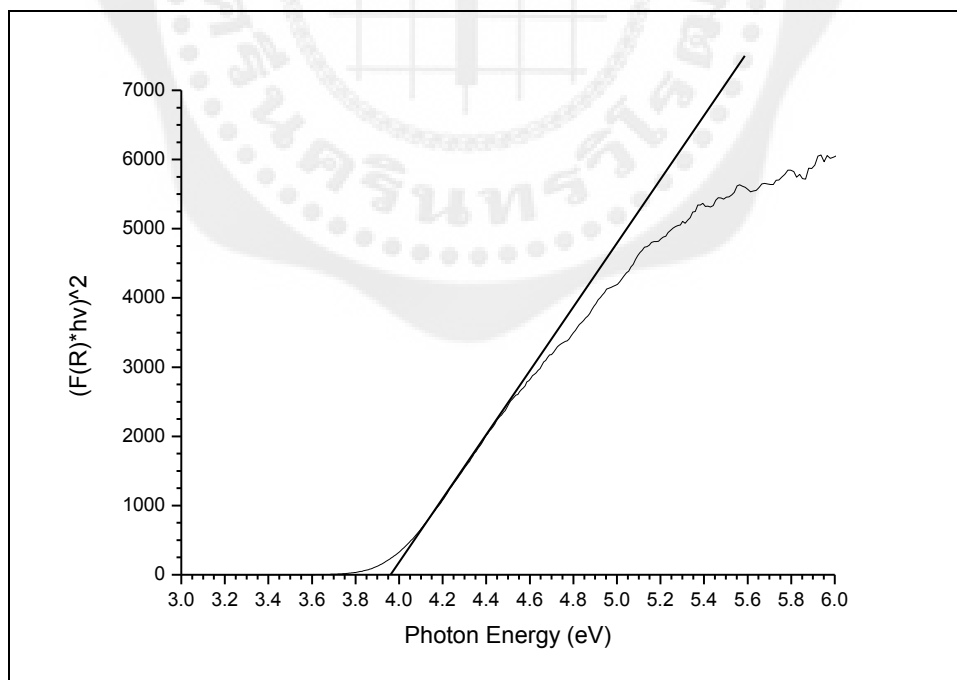
ภาพประกอบ 65 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-0 กรณี $n=2$



ภาพประกอบ 66 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-0 กรณี $n=2$



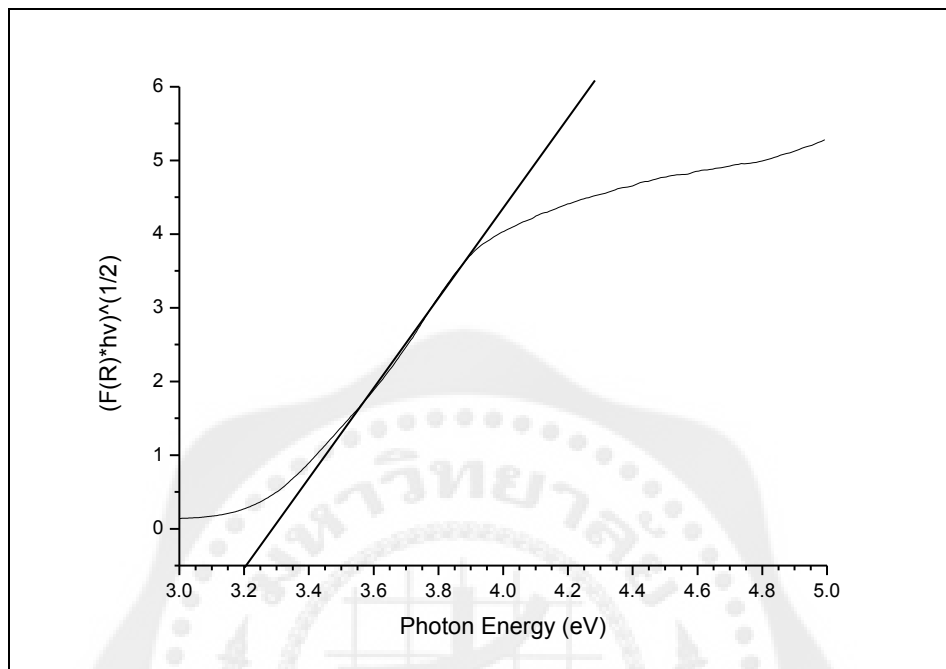
ภาพประกอบ 67 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-0 กรณี $n=2$



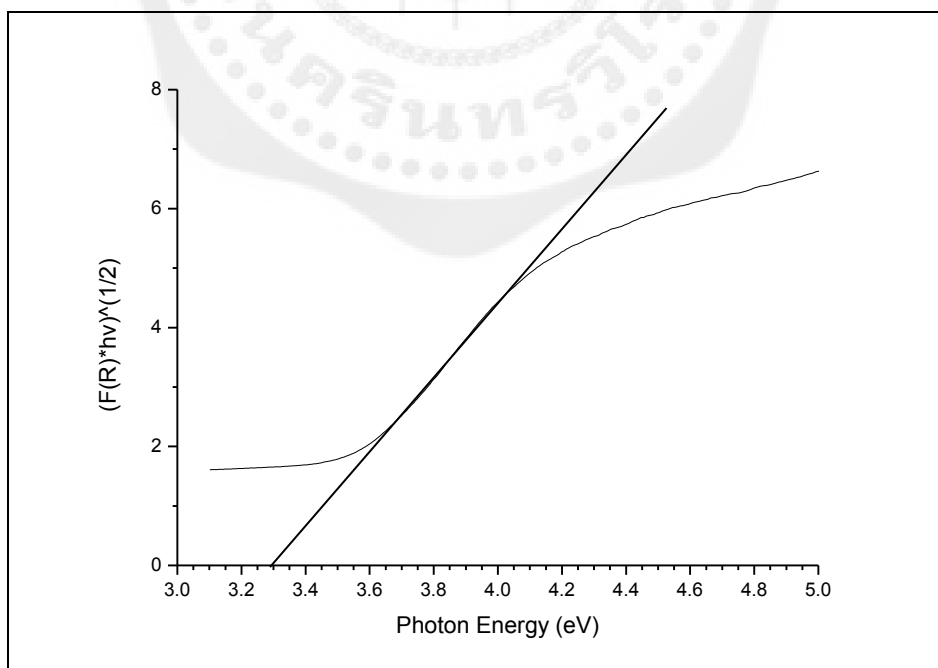
ภาพประกอบ 68 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-0 กรณี $n=2$

6.2 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TFs และ Au-TFs หลังการเผา

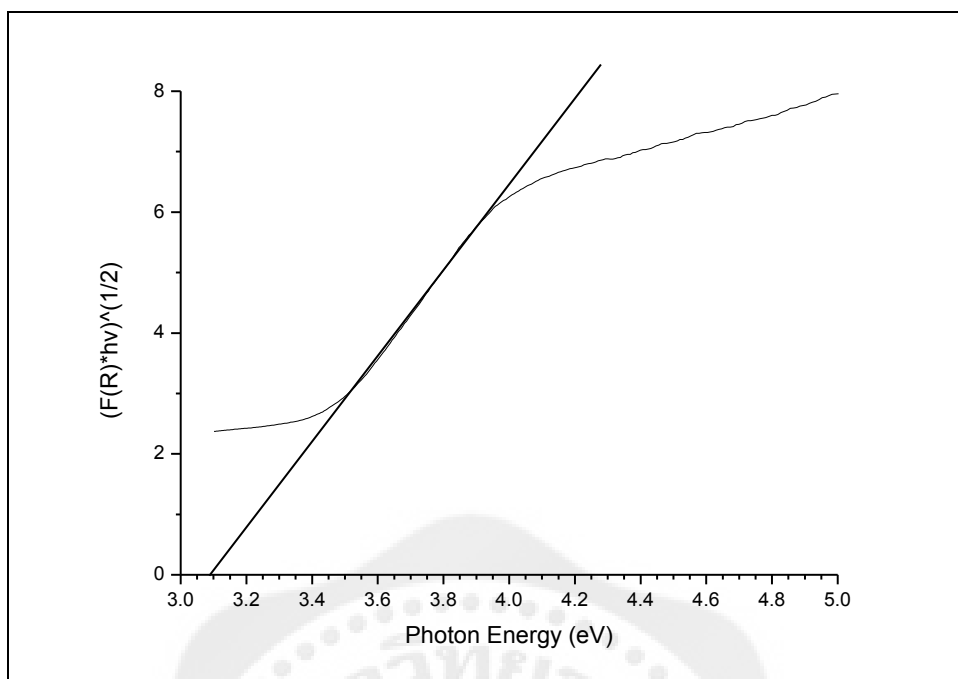
6.2.1 การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง (Indirect absorption) หรือ กรณี $n = \frac{1}{2}$



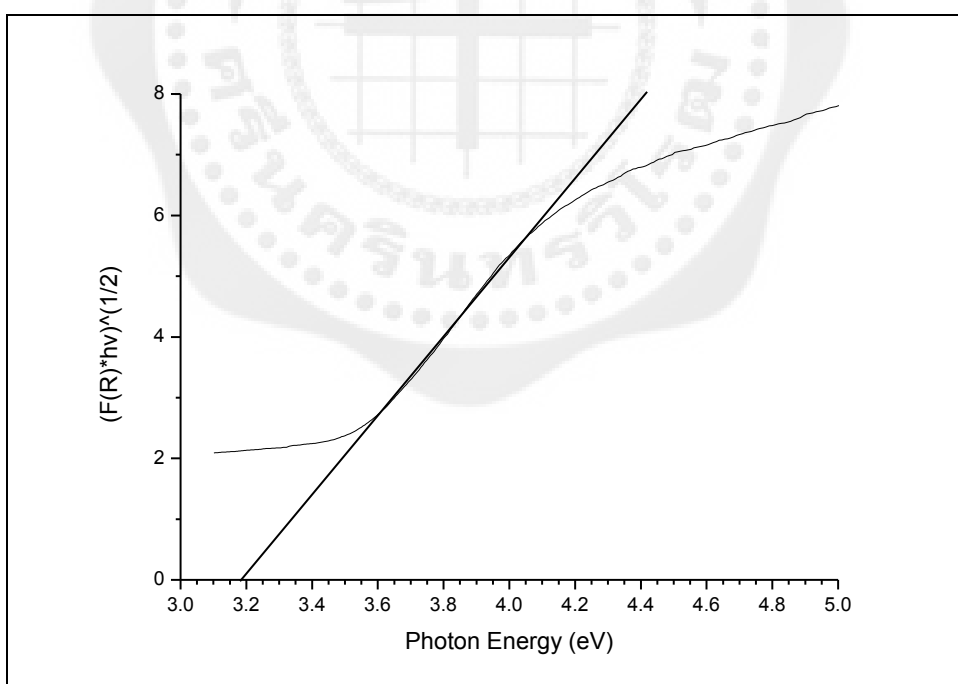
ภาพประกอบ 69 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$



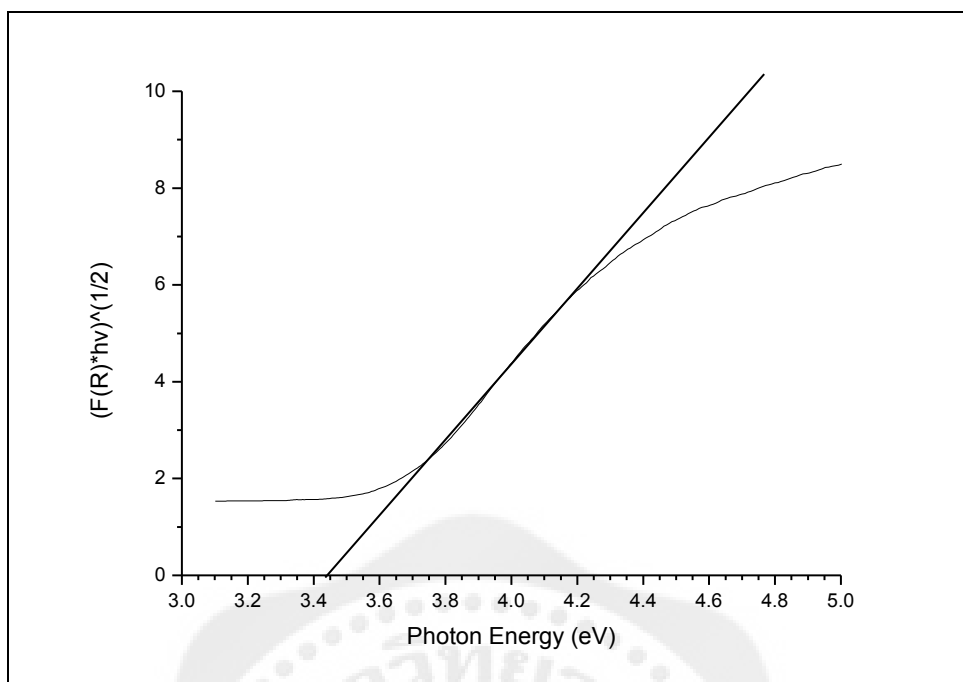
ภาพประกอบ 70 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$



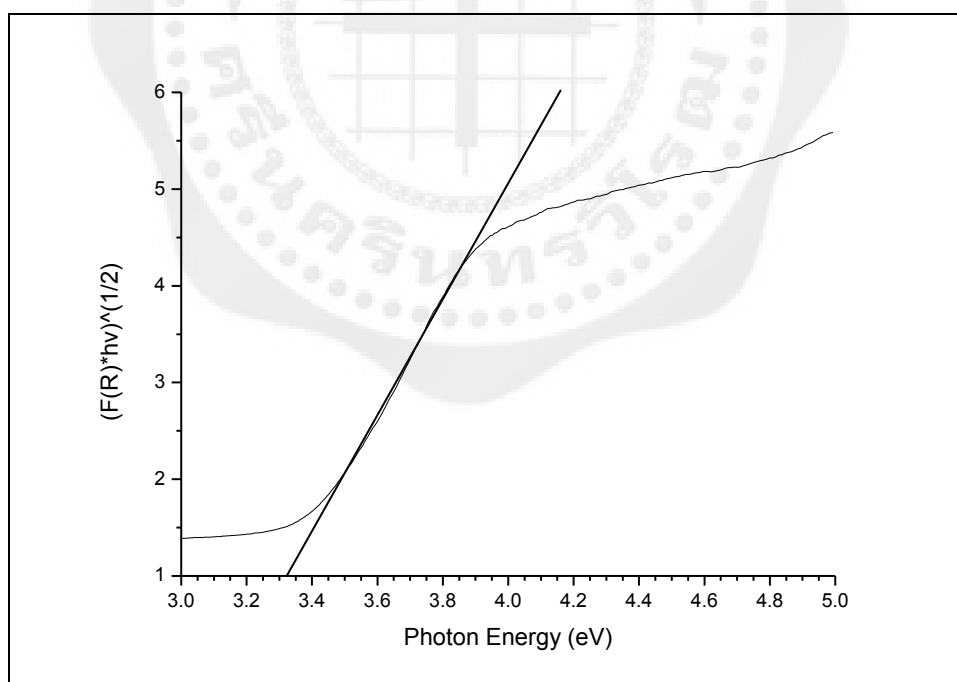
ภาพประกอบ 71 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-450 กรรณี $n = \frac{1}{2}$



ภาพประกอบ 72 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-450 กรรณี $n = \frac{1}{2}$

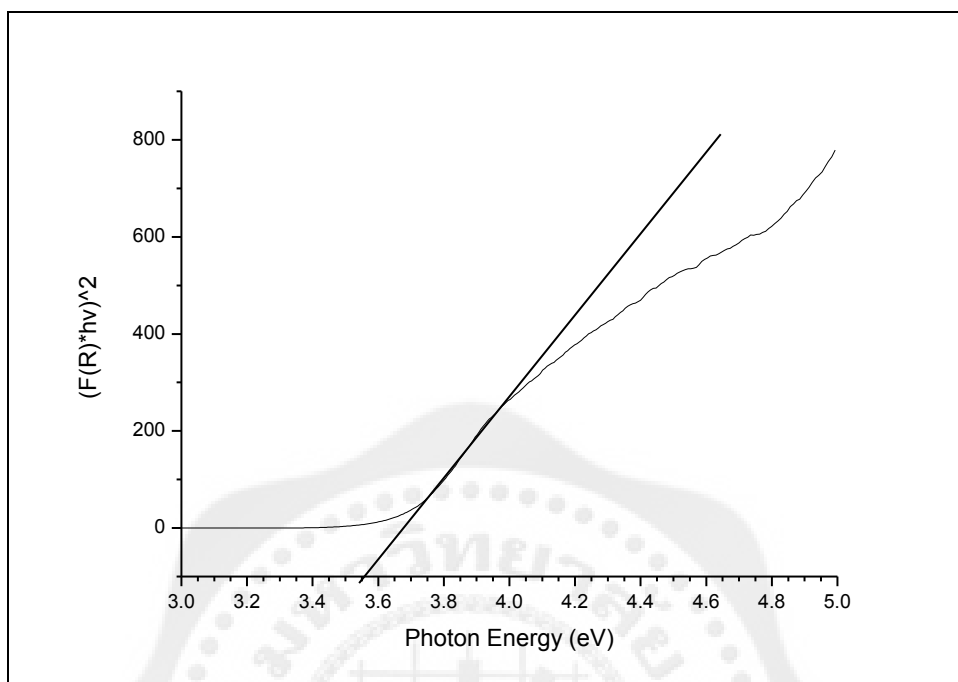


ภาพประกอบ 73 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$

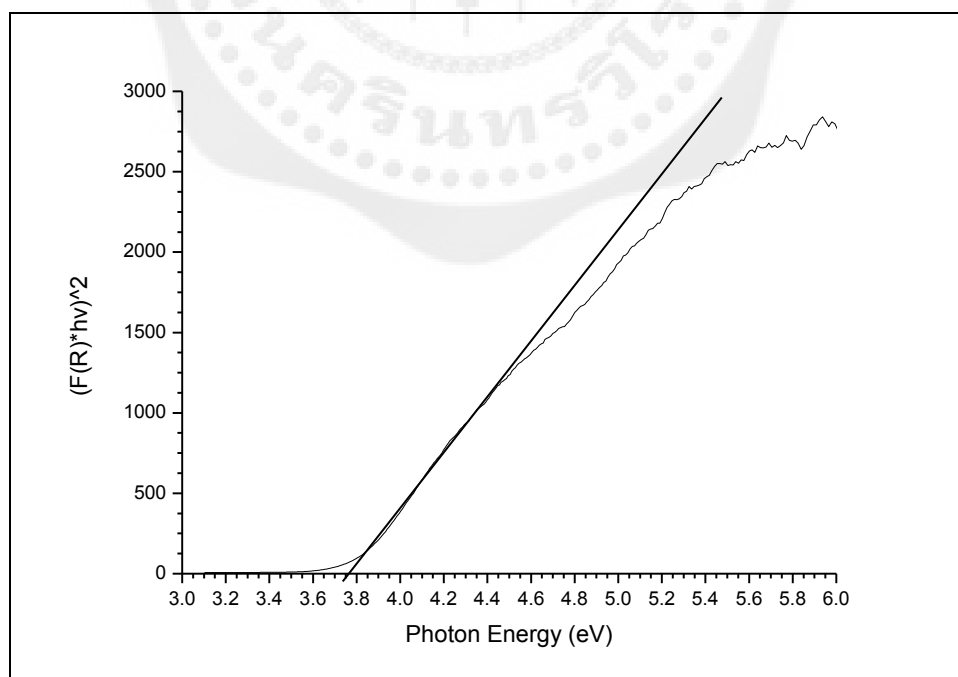


ภาพประกอบ 74 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-450 กรณี $n = \frac{1}{2}$

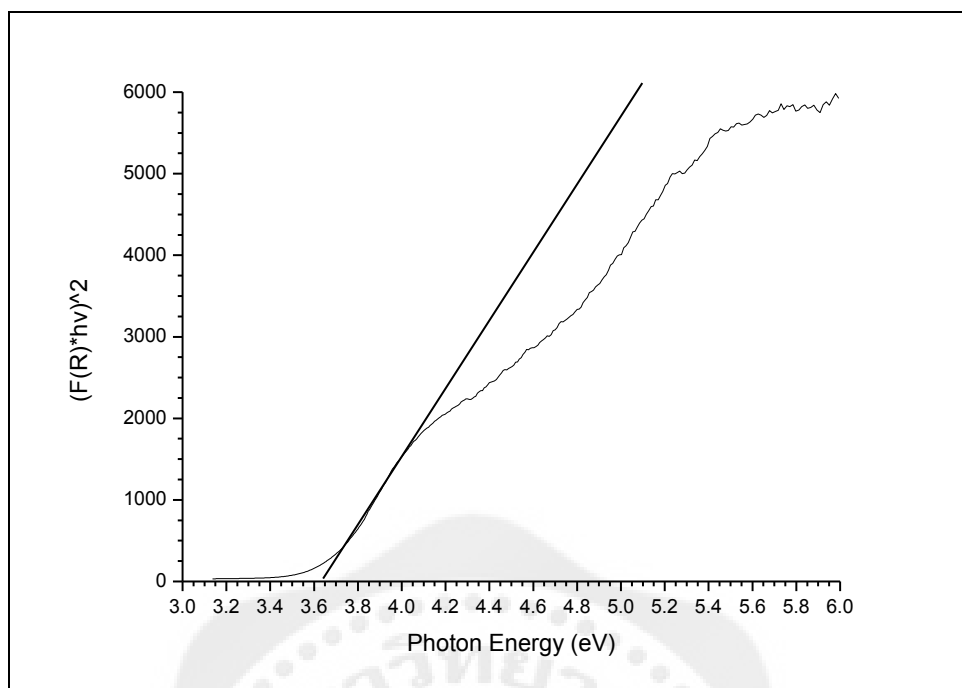
6.2.2 การดูดกลืนแสงแบบตรง (Direct absorption) หรือ กรณี $n=2$



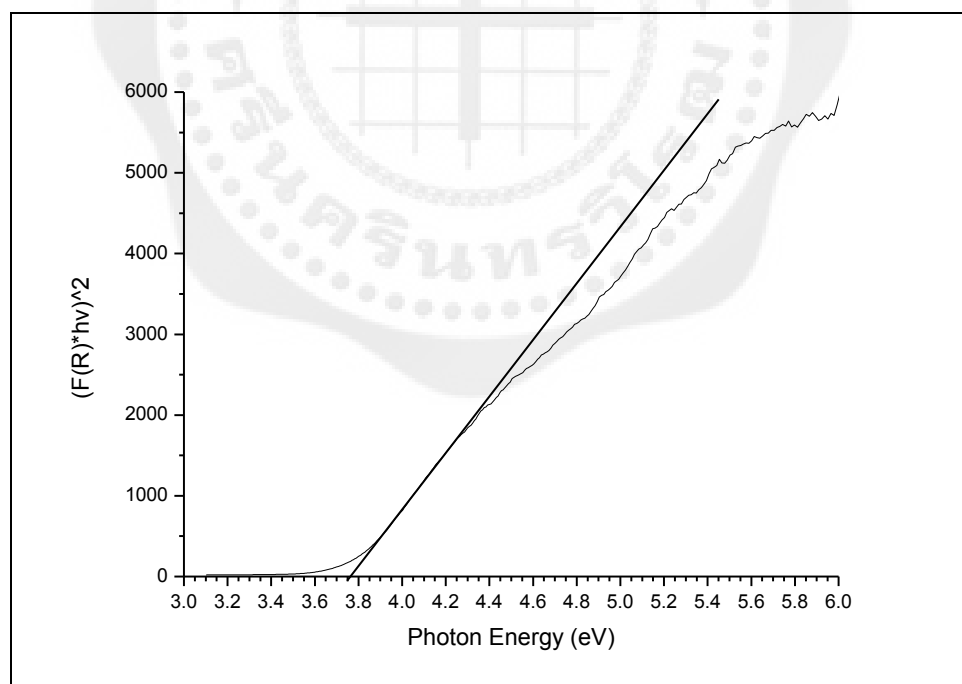
ภาพประกอบ 75 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ A-450 กรณี $n=2$



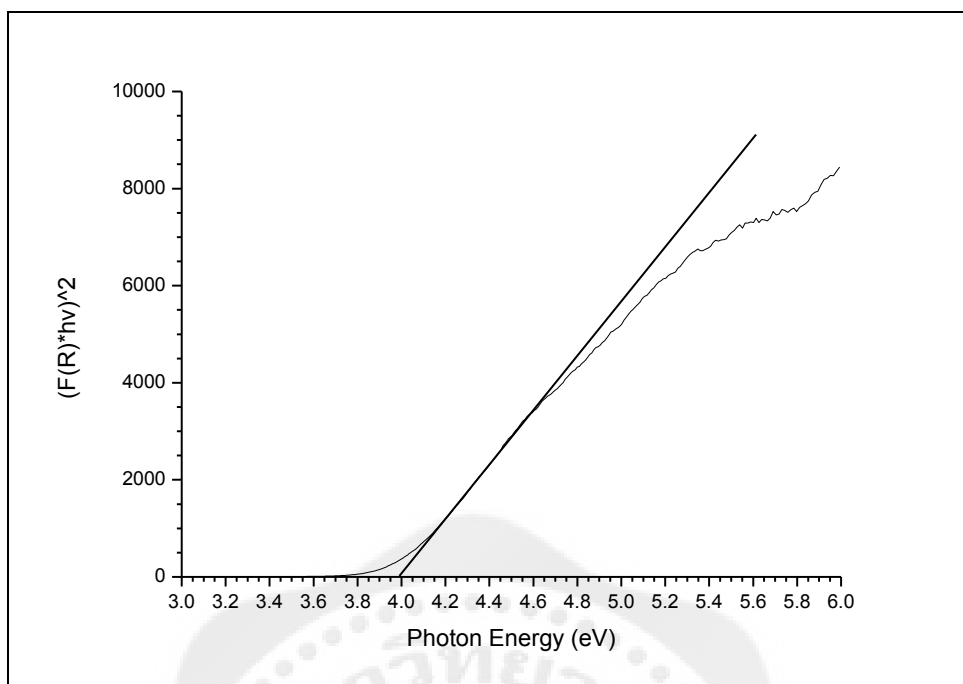
ภาพประกอบ 76 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ B-450 กรณี $n=2$



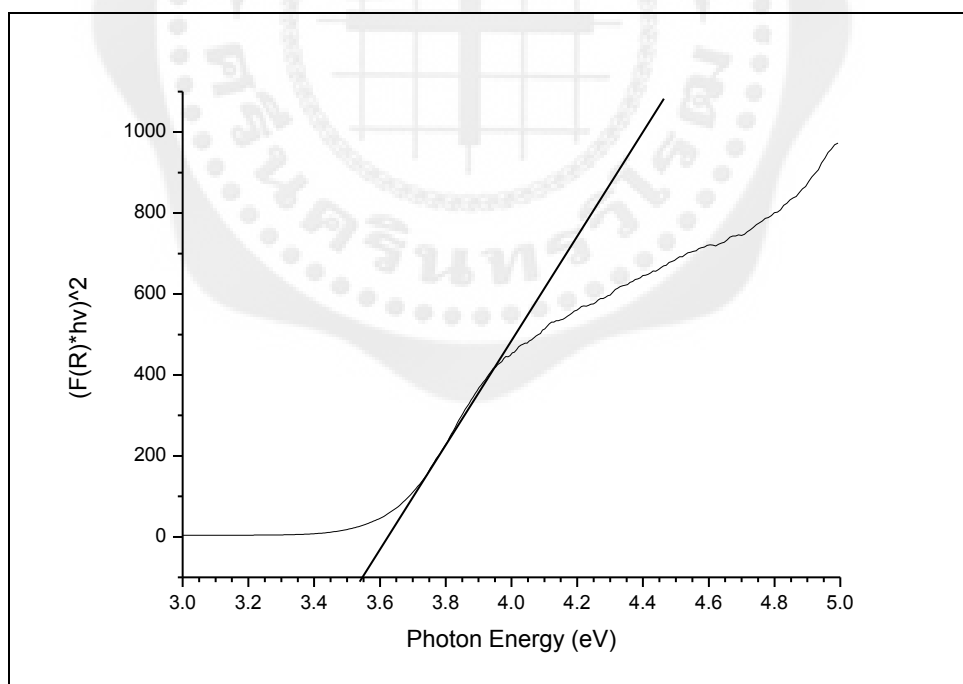
ภาพประกอบ 77 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ C-450 กรณี $n=2$



ภาพประกอบ 78 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ D-450 กรณี $n=2$



ภาพประกอบ 79 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ E-450 กรณี $n=2$



ภาพประกอบ 80 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ F-450 กรณี $n=2$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไทเทเนียมและเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จากการทดลองสามารถแบ่งผลการวิจัยได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1.1 เส้นใยไทเทเนียม (TFs) เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง มีลักษณะผิวเรียบ จากการวิเคราะห์ธาตุ เส้นใยมีส่วนประกอบของออกซิเจน และไทเทเนียม เส้นใยมีลักษณะโครงสร้างเป็น อสัณฐาน เมื่อผ่านการเผาเส้นใยไทเทเนียม จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เส้นใยมีการแตกหัก เนื่องจากพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยถูกกำจัดโดยความร้อน ส่งผลให้ส่วนประกอบออกซิเจนและไทเทเนียมของเส้นใยมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้น ลักษณะผิวขรุขระเป็นผลมาจากพอลิเมอร์ที่ถูกกำจัดไป เส้นใยมีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็น อะนาเทส และ TFs มีการดัดกลืนแสงแบบไม่ตรง

1.2 การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง (Au-TFs) ด้วยการเจือโกลด์คลอไรด์ไฮเดรทในขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล โดยใช้ปริมาณของโกลด์คลอไรด์ไฮเดรท 0.010 0.015 0.020 0.025 และ 0.030 กรัม แล้วเข้าสู่กระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับการสังเคราะห์ TFs จากผลการทดลอง Au-TFs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า TFs และเมื่อเจือปริมาณทองมากขึ้นก็มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นปะปนกับเส้นใย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโซล-เจล จากการวิเคราะห์ธาตุของ Au-TFs พบว่าเส้นใยมีส่วนประกอบของออกซิเจน ไทเทเนียม คลอรีน และ ทอง โดยทองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ย 15.8 นาโนเมตร ทองมีลักษณะเป็นก้อนกลม สีเข้ม ฝังตัวอยู่ในเส้นใย เส้นใยมีโครงสร้างเป็น อสัณฐาน หลังผ่านการเผา Au-TFs ที่ผ่านการเผามีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเมื่อเทียบกับ Au-TFs ก่อนการเผา การเผาเส้นใยทำให้ส่วนประกอบคลอรีนถูกกำจัด เหลือเพียงส่วนประกอบของออกซิเจน ไทเทเนียม และทอง ผลจากการเจือโกลด์คลอไรด์ไฮเดรทในขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล ส่งผลให้ปริมาณอะตอมของทองคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโกลด์คลอไรด์ไฮเดรทที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ผิวของเส้นใยมีลักษณะขรุขระเนื่องจากพอลิเมอร์ถูกกำจัดออก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 11.3 นาโนเมตร เส้นใยมีโครงสร้างเปลี่ยนเป็น อะนาเทส และปรากฏระนาบของทองในทุกลักษณะของทองที่เจือ การเจือโกลด์คลอไรด์ไฮเดรทในปริมาณที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อโครงสร้างเส้นใย TFs และ Au-TFs มีการดัดกลืนแสงแบบไม่ตรง อุณหภูมิการเผามีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงาน การใช้เงื่อนไขของ ขนาดเข็ม กำลังศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง

และ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นทองแดงรองรับเส้นใย มีผลต่อลักษณะของเส้นใย และส่งผลถึงสมบัติบางประการของเส้นใยด้วย

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 การสังเคราะห์เส้นใยด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ต้องอาศัยศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างสูง เลี่ยงการสัมผัสหรือใช้อุปกรณ์ช่วยที่ทำจากโลหะนำไฟฟ้า

2.2 เมื่อเข็มเกิดการติดขัดขณะปั่นเส้นใย ให้ลดกำลังศักย์ไฟฟ้าจนเป็น 0 กิโลโวลต์ แล้วจึงเช็ดด้วยสำลีชุบเอทานอลหมาดๆ

2.3 การสังเคราะห์เส้นใยจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จะต้องใช้เงื่อนไข ขนาดของเข็ม กำลังศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นทองแดงรองรับเส้นใย ให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของโซล-เจลที่เตรียม ควรทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของโซล-เจลที่เตรียม เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ ลักษณะเส้นยาวต่อเนื่อง ไม่เกิดการติดขัดระหว่างการปั่นเส้นใย และไม่เกิดบิดปะปนกับเส้นใย

2.4 การสังเคราะห์เส้นใยสะสมจนเป็นแผ่นหนาประมาณหนึ่ง แล้วทำการเก็บเส้นใย จะช่วยลดการสูญเสียปริมาณเส้นใยที่ติดไปกับแผ่นรองรับ

2.5 การเตรียมการตรวจวัดเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะต้องปั่นเส้นใยลงบนกริดทองแดงโดยตรง ประมาณ 5 วินาที ถ้านานกว่านี้เส้นใยจะหนาจนอิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านได้

2.6 การเตรียมการตรวจวัดเส้นใยที่ผ่านการเผาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เตรียมการโดย เขย่าเส้นใยที่ผ่านการเผาผสมกับเอทานอล เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงหยดลงบนกริดทองแดง แล้วทิ้งให้แห้ง ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

2.7 ศึกษาสมบัติทางด้านอื่นๆ เช่น ความเป็นรูพรุนของเส้นใยไทเทเนียมเจือด้วยทอง ศึกษาการย่อยสลายเมทิลีนบลู เป็นต้น



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. Lin T, Wang X. NEEDLELESS ELECTROSPINNING OF NANOFIBERS: Technology and Applications. Temasek Boulevard, Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd; 2014. pp. 1-59, 71-82.
2. Fang J, Wang X, Lin T. Functional Applications of Electrospun Nanofibers. Nanofibers-Production, Properties and Functional Applications. InTech; 2011. pp. 287-309.
3. Thomas J, Yoon M. Facile synthesis of pure TiO_2 (B) nanofibers doped with gold nanoparticles and solar photocatalytic activities. Applied Catalysis B: Environmental. 2012;111:502-8.
4. Kim H-i, Kim S, Kang J-K, Choi W. Graphene oxide embedded into TiO_2 nanofiber: effective hybrid photocatalyst for solar conversion. Journal of Catalysis. 2014;309:49-57.
5. Liu L, Liu Z, Bai H, Sun DD. Concurrent filtration and solar photocatalytic disinfection/degradation using high-performance Ag/TiO_2 nanofiber membrane. Water research. 2012;46(4):1101-12.
6. Lee SS, Bai H, Liu Z, Sun DD. Novel-structured electrospun TiO_2/CuO composite nanofibers for high efficient photocatalytic cogeneration of clean water and energy from dye wastewater. Water research. 2013;47(12):4059-73.
7. Zhang Z, Wang Z, Cao S-W, Xue C. Au/Pt nanoparticle-decorated TiO_2 nanofibers with plasmon-enhanced photocatalytic activities for solar-to-fuel conversion. The Journal of Physical Chemistry C. 2013;117(49):25939-47.
8. Reddy KR, Hassan M, Gomes VG. Hybrid nanostructures based on titanium dioxide for enhanced photocatalysis. Applied Catalysis A: General. 2015;489:1-16.
9. Salehifar N, Nikfarjam A. Improvement the visible light photocatalytic activity of gold nanoparticle, Co_2O_3 and nitrogen doped TiO_2 nanofibers. Materials Letters. 2017;188:59-62.
10. Mu J, Chen B, Zhang M, Guo Z, Zhang P, Zhang Z, et al. Enhancement of the visible-light photocatalytic activity of $\text{In}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ nanofiber heteroarchitectures. ACS applied materials & interfaces. 2011;4(1):424-30.

11. Su C, Liu L, Zhang M, Zhang Y, Shao C. Fabrication of Ag/TiO₂ nanoheterostructures with visible light photocatalytic function via a solvothermal approach. *CrystEngComm*. 2012;14(11):3989-99.
12. Hou D, Hu X, Hu P, Zhang W, Zhang M, Huang Y. Bi₄Ti₃O₁₂ nanofibers–BiOI nano-sheets p–n junction: facile synthesis and enhanced visible-light photocatalytic activity. *Nanoscale*. 2013;5(20):9764-72.
13. Wu P, Xie R, Shang JK. Enhanced Visible-Light Photocatalytic Disinfection of Bacterial Spores by Palladium-Modified Nitrogen-Doped Titanium Oxide. *Journal of the American Ceramic Society*. 2008;91(9):2957-62.
14. Wang Y, Su Y, Qiao L, Liu L, Su Q, Zhu C, et al. Synthesis of one-dimensional TiO₂/V₂O₅ branched heterostructures and their visible light photocatalytic activity towards Rhodamine B. *Nanotechnology*. 2011;22(22):225702.
15. Yang Y, Wen J, Wei J, Xiong R, Shi J, Pan C. Polypyrrole-decorated Ag-TiO₂ nanofibers exhibiting enhanced photocatalytic activity under visible-light illumination. *ACS applied materials & interfaces*. 2013;5(13):6201-7.
16. Nam SH, Shim H-S, Kim Y-S, Dar MA, Kim JG, Kim WB. Ag or Au nanoparticle-embedded one-dimensional composite TiO₂ nanofibers prepared via electrospinning for use in lithium-ion batteries. *ACS applied materials & interfaces*. 2010;2(7):2046-52.
17. Han H, Song T, Bae J-Y, Nazar LF, Kim H, Paik U. Nitridated TiO₂ hollow nanofibers as an anode material for high power lithium ion batteries. *Energy & Environmental Science*. 2011;4:4532-6.
18. Zhang X, Suresh Kumar P, Aravindan V, Liu HH, Sundaramurthy J, Mhaisalkar SG, et al. Electrospun TiO₂–graphene composite nanofibers as a highly durable insertion anode for lithium ion batteries. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012;116(28):14780-8.
19. Fehse M, Cavaliere S, Lippens P, Savych I, Iadecola A, Monconduit L, et al. Nb-doped TiO₂ nanofibers for lithium ion batteries. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2013;117(27):13827-35.

20. Aravindan V, Sundaramurthy J, Kumar PS, Lee Y-S, Ramakrishna S, Madhavi S. Electrospun nanofibers: A prospective electro-active material for constructing high performance Li-ion batteries. *Chemical Communications*. 2015;51(12): 2225-34.
21. Jamil H, Batool SS, Imran Z, Usman M, Rafiq M, Willander M, et al. Electrospun titanium dioxide nanofiber humidity sensors with high sensitivity. *Ceramics International*. 2012;38(3):2437-41.
22. Li Y, Gong J, He G, Deng Y. Fabrication of polyaniline/titanium dioxide composite nanofibers for gas sensing application. *Materials Chemistry and Physics*. 2011;129(1-2):477-82.
23. Song MY, Kim DK, Ihn KJ, Jo SM, Kim DY. New application of electrospun TiO₂ electrode to solid-state dye-sensitized solar cells. *Synthetic Metals*. 2005;153(1-3):77-80.
24. Pavasupree S, Ngamsinlapasathian S, Nakajima M, Suzuki Y, Yoshikawa S. Synthesis, characterization, photocatalytic activity and dye-sensitized solar cell performance of nanorods/nanoparticles TiO₂ with mesoporous structure. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2006;184(1-2):163-9.
25. Xiao Y, Han G, Li Y, Li M, Wu J. Electrospun lead-doped titanium dioxide nanofibers and the in situ preparation of perovskite-sensitized photoanodes for use in high performance perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2(40):16856-62.
26. Song MY, Kim DK, Ihn KJ, Jo SM, Kim DY. Electrospun TiO₂ electrodes for dye-sensitized solar cells. *Nanotechnology*. 2004;15(12):1861-5.
27. Lin YP, Chen YY, Lee YC, Chen-Yang YW. Effect of wormhole-like mesoporous anatase TiO₂ nanofiber prepared by electrospinning with ionic liquid on dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012;116(24): 13003-12.
28. Hwang SH, Kim C, Song H, Son S, Jang J. Designed Architecture of Multiscale Porous TiO₂ Nanofibers for Dye-Sensitized Solar Cells Photoanode. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2012;4(10):5287-92.

29. Senevirathne K, Hui R, Campbell S, Ye S, Zhang J. Electrocatalytic activity and durability of Pt/NbO₂ and Pt/Ti₄O₇ nanofibers for PEM fuel cell oxygen reduction reaction. *Electrochimica Acta*. 2012;59:538-47.
30. Bauer A, Hui R, Ignaszak A, Zhang J, Jones DJ. Application of a composite structure of carbon nanoparticles and Nb–TiO₂ nanofibers as electrocatalyst support for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2012;210:15-20.
31. Zhou X, Shang C, Gu L, Dong S, Chen X, Han P, et al. Mesoporous coaxial titanium nitride-vanadium nitride fibers of core–shell structures for high-performance supercapacitors. *ACS applied materials & interfaces*. 2011;3(8):3058-63.
32. Feng Y, Hart JN, Patterson RJ, Lowe A. Electrospinning of TiO₂ nanofibers: the influence of Li and Ca doping and vacuum calcination. *Materials Letters*. 2015;139:31-4.
33. Viswanathamurthi P, Bhattarai N, Kim C, Kim H, Lee D. Ruthenium doped TiO₂ fibers by electrospinning. *Inorganic Chemistry Communications*. 2004;7(5):679-82.
34. Yousef A, Barakat NA, El-Newehy MH, Ahmed M, Kim HY. Catalytic hydrolysis of ammonia borane for hydrogen generation using Cu (0) nanoparticles supported on TiO₂ nanofibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015;470:194-201.
35. Xu Z, Yu J, Liu G. Enhancement of ethanol electrooxidation on plasmonic Au/TiO₂ nanotube arrays. *Electrochemistry Communications*. 2011;13(11):1260-3.
36. Zhang P, Shao C, Li X, Zhang M, Zhang X, Sun Y, et al. In situ assembly of well-dispersed Au nanoparticles on TiO₂/ZnO nanofibers: A three-way synergistic heterostructure with enhanced photocatalytic activity. *Journal of hazardous materials*. 2012;237:331-8.
37. Budinski KG, Budinski MK. *ENGINEERING MATERIALS Properties and Selection*. 8th ed. Person Education International; 2005. pp. 688-93.
38. สุพิน แสงสุข. ไทเทเนียมไดออกไซด์. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ. [ออนไลน์]. [20 กรกฎาคม 2550]. สืบค้นเมื่อ 20 มกราคม 2560. จาก URL: http://www.material.chula.ac.th-/Articles/Ti_.html
39. Khatte A, Mansoori AG. *Nanostructured Titanium Dioxide Materials*. Singapore: World Scientific; 2011. pp. 38-97.

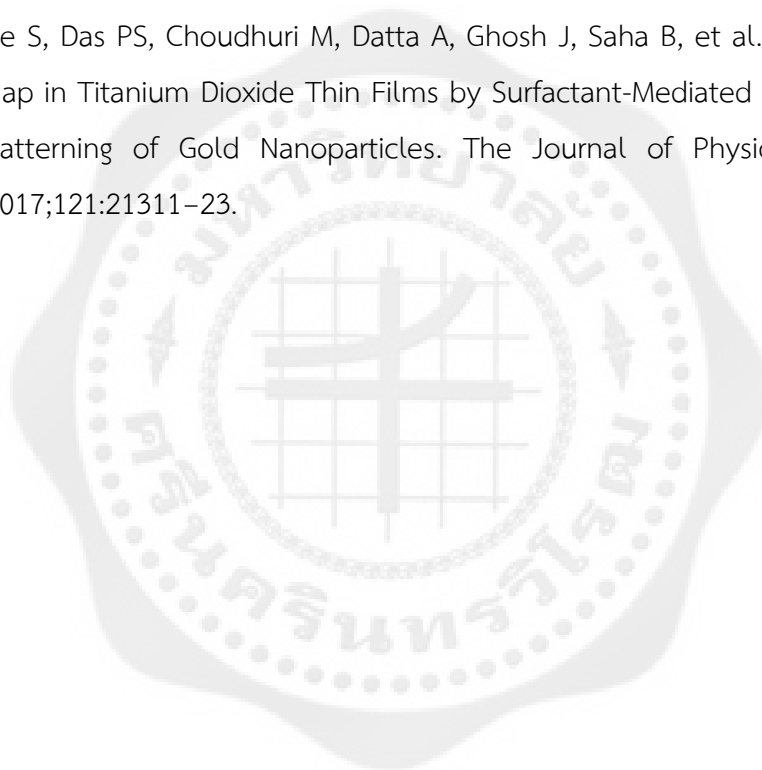
40. Pelaez M, Nolan NT, Pillai SC, Seery MK, Falaras P, Kontos AG, Dunlop PSM, Hamilton JWJ, Byrne JA, O'Shea K, Entezari MH, Dionysiou DD. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*. [serial online]. [August, 2012]. Retrieved January 20, 2017. From URL: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31012016/viewcontent.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1516434943&Signature=VS3B%2BMwbBg5mt2vml%2BDX4cXe%2BGI%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DA_review_on_the_visible_light_active_tit.pdf
41. AbdElmoula M. Optical, Electrical and Catalytic Properties Of Titania Nanotubes, [Dissertation, Ph. D. Physics]. Graduate School of Arts and Sciences Northeastern University Boston; 2011. p. 31.
42. พงศ์ศักดิ์ วิจิต. ทองคำ. กรมทรัพยากรธรณี: กรุงเทพฯ. 2529.
43. รังสรรค์ ดวงสร้อยทอง. วัสดุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่1. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏกาญจนบุรี. 2542.
44. จรูญ ไชยศรีฮาด. ระบบและโครงสร้างผลึก. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ วันที่ 22 มกราคม 2560. จาก URL: <https://sites.google.com/site/watchaduchang/bth-thi-7-rabb-laea-khorngsrang-phluk>
45. ดุสิต เครื่องาม. โพลิตสเตทฟิสิกส์ Solid State Physics. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2535.
- 46 วิชุดา บุญยรัตกลิน. ทฤษฎีแถบพลังงาน Band Theory. PY 611 Solid State Physics. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2559.
47. Gopalakrishna B. What is conduction band?. [serial online]. [August 4, 2016]. Retrieved February 21, 2017. From URL: <https://www.quora.com/What-is-conduction-band>
48. Wagner DJ. Valence Band. [serial online]. [2004]. Retrieved February 21, 2017. From URL: http://www.rpi.edu/dept/phys/SciIT/InformationProcessing/semicond/sc_glossary/scglossary.htm
49. Liang D, Bowers JE. Recent progress in lasers on silicon. *Nature Photonics*. Published online: 30 July 2010. 2014;4:511–7.

50. อัคคพงศ์ พันธุ์พฤกษ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.[ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 14 พฤษภาคม 2560. จาก URL: Thanyaburihttp://www.academia.edu/5206496/บทที่_7_สมบัติเชิงแสงของวัสดุสารกึ่งตัวนำ
51. Hoyle CE, Kinstle JF. Radiation curing of polymeric materials. Washington, D.C.: American Chemical Society. 1990;417.
52. Zeit FT. The kubelka-munk theory of reflectance. Physik, 1931;12, p539.
53. พัชรินทร์ วรรณกุล. Sol-Gel. Technology Bio. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
54. Sakka S. (Ed). Handbook of sol-gel science and technology: processing, characterization and applications. Boston: Kluwer Academic. 2004.
55. Falaize S, Radin S, Ducheyne P. In vitro behavior of silica-based xerogels intended as controlled release carriers. Journal of the American Ceramic Society. 1999;82(4):969-76.
56. Gelest I. Sol-Gel Applications. Enabling Your Technology. [serial online]. Retrieved June 20, 2017. Form URL: <https://www.gelest.com/applications/sol-gel-applications/>.
57. Guzmán-Velderrain V, López YO, Gutiérrez JS, Ortiz AL, Collins-Martínez VH. Tio₂ films synthesis over polypropylene by sol-gel assisted with hydrothermal treatment for the photocatalytic propane degradation. Green and Sustainable Chemistry. 2014;4(03):120.
58. Sajkiewicz PL. Electrospinning. Laboratory of Polymers and Biomaterials, Institute of Fundamental Technological Research. [serial online]. Retrieved May 24, 2017. Form URL: <http://polybiolab.ippt.pan.pl/electrospinning>
59. Lee RE. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Electron Microscopy Center Department of Anatomy and Neurobiology Colorado State University. 1993. p.1-15.
60. Purdue University. Scanning Electron Microscope. [serial online]. Retrieved May 29, 2017. Form URL: <https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm>

61. ดนัย กิจชัยนุกูล. เรื่อนำรู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM). โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม. [ออนไลน์]. [เมษายน 2547ล. สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2559 จาก URL: <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>
- 62 Hilal AA. Microstructure of Concrete. [serial online]. [October 2016]. Retrieved May 29, 2017. Form URL: https://www.researchgate.net/figure/308968131_fig4_Figure-5-Left-the-results-of-interaction-of-electron-beam-with-specimen-Right-the
63. Williams DB, Carter CB. Transmission Electron Microscopy A Textbook for Materials Science. 2nd ed. Springer. 2009.
64. Bose A. Transmission electron microscopy (TEM). Pharmaceutical Information. [serial online]. [2016]. Retrieved May 30, 2017. Form URL: <http://www.pharmainfo.net/book/emerging-trends-nanotechnology-pharmacy-physicochemical-characterization-nano-particles>
65. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ (Principles and Techniques of Instrumental Analysis Spectroscopy). พิมพ์ครั้งที่ 2. ชวนพิมพ์ 50. กรุงเทพฯ. 2554.
66. KITAGAWA K, Desmira EN. Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)I. [serial online]. [2014]. Retrieved May 3, 2017. Form URL: <http://slideplayer.com/slide/3419645/>.
67. Trivedi V, Chaudhary N. UV-Visible Absorption Spectroscopy. [serial online]. [October 22, 2013]. Retrieved May 3, 2017. Form URL: <http://nptel.ac.in/courses/102103044/4>
68. Lipson HH. Steeple H. Interpretation of X-Ray powder diffraction patterns. London: Macmillan; New York: St Martin's Press. 1970.
69. เกียรติพงษ์ ได้การ. X-ray Diffractometer XRD. [serial online]. [19 ตุลาคม 2015]. สืบค้นเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม 2560. จาก URL: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html>
70. ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้. ทำไมต้องเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction). วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ฉบับที่ 66 กรกฎาคม-กันยายน 2555. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2555.

71. He G, Cai Y, Zhao Y, Wang X, Lai C, Xi M, et al. Electrospun anatase-phase TiO₂ nanofibers with different morphological structures and specific surface areas. *Journal of colloid and interface science*. 2013;398:103-11.
72. Jamil H, Batool SS, Imran Z, Usman M, Rafiq M, Willander M, et al. Electrospun titanium dioxide nanofiber humidity sensors with high sensitivity. *Ceramics International*. 2012;38(3):2437-41.
73. Naphade RA, Tathavadekar M, Jog JP, Agarkar S, Ogale S. Plasmonic light harvesting of dye sensitized solar cells by Au-nanoparticle loaded TiO₂ nanofibers. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2(4):975-84.
74. Han XJ, Huang ZM, He CL, Liu L, Wu QS. Coaxial electrospinning of PC(shell)/PU(core) composite nanofibers for textile application. *POLYMER COMPOSITES*. 2008:579-84.
75. Huang ZM, He CL, Yang A, Zhang Y, Han XJ, Yin J, et al. Encapsulating drugs in biodegradable ultrafine fibers through co-axial electrospinning. *ENCAPSULATING DRUGS IN BIODEGRADABLE ULTRAFINE FIBERS*. 2005:169-179.
76. Zhang YZ, Venugopal J, Huang ZM, Lim CT, Ramakrishna S. Crosslinking of the electrospun gelatin nanofibers. *Polymer*. 2006;47(8):2911-7.
77. Zhang YZ, Feng Y, Huang ZM, Ramakrishna S, Lim CT. Fabrication of porous electrospun nanofibres. *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, Nanotechnology*. 2006;17:901-8.
78. Li Y, Huang Z, Lu Y. Electrospinning of nylon-6,6,1010 terpolymer. *European Polymer Journal*. 2006;42:1696-704.
79. Huang C, Chen S, Lai C, Reneker DH, Qiu H, Ye Y, et al. Electrospun polymer nanofibres with small diameters. *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, Nanotechnology*. 2006;17(6):1558-63.
80. Huang XJ, Xu ZK, Wan LS, Innocent C, Seta P. Electrospun Nanofibers Modified with Phospholipid Moieties for Enzyme Immobilization. *Macromol. Rapid Commun*. 2006;27:1341-5.
81. He CL, Huang ZM, Han XJ, Liu L, Zhang HS, Chen LS. Coaxial Electrospun Poly(L-Lactic Acid) Ultrafine Fibers for Sustained Drug Delivery. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 2006;45(4):515-24.

82. Harikishore M, Sandhyarani M, Venkateswarlu K, Nellaippan TA, Rameshbabu N. Effect of Ag doping on Antibacterial and Photocatalytic Activity of Nanocrystalline TiO₂. *Procedia Materials Science*. 2014;6:557–66.
83. Yu Y, Wen W, Qian XY, Liu JB, Wu JM. UV and visible light photocatalytic activity of Au/TiO₂ nanoforests with Anatase/Rutile phase junctions and controlled Au locations. *Scientific Reports*. 7:41253 | DOI: 10.1038/srep41253.
84. Pfeifer V, Erhart P, Li S, Rachut K, Morasch J, Brotz J, et al. Energy Band Alignment between Anatase and Rutile TiO₂. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2013;4(23):4182–7.
85. Mukherjee S, Das PS, Choudhuri M, Datta A, Ghosh J, Saha B, et al. Tuning the Band Gap in Titanium Dioxide Thin Films by Surfactant-Mediated Confinement and Patterning of Gold Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2017;121:21311–23.



ภาคผนวก



ภาคผนวก

ทฤษฎี Kubelka และ Munk

ทฤษฎี Kubelka และ Munk เป็นทฤษฎีประกอบการอธิบายการกระจายของแสงภายในชั้นผิวของชิ้นงาน ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2

จากภาพประกอบ 8 กำหนดให้ i_R คือ ความเข้มแสงในทิศขึ้น และ i_T คือ ความเข้มแสงในทิศลงผ่านช่วงบางๆ มีความกว้าง dx

$$-di_T = -(S + K)i_T dx + i_R S dx \quad (a1)$$

$$di_R = -(S + K)i_R dx + i_T S dx \quad (a2)$$

โดย K คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

S คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง

นำสมการ (a1) คูณด้วย $\frac{1}{i_T}$

$$\frac{(a1)}{i_T} \Rightarrow \frac{-di_T}{i_T} = -\ln i_T = \frac{-(S + K)i_T dx}{i_T} + \frac{i_R}{i_T} S dx \quad (a3)$$

นำสมการ (a2) คูณด้วย $\frac{1}{i_R}$

$$\frac{(a2)}{i_R} \Rightarrow \frac{di_R}{i_R} = \ln i_R = \frac{-(S + K)i_R dx}{i_R} + \frac{i_T}{i_R} S dx \quad (a4)$$

$$(a3) + (a4) = \ln i_R - \ln i_T = -2(S + K)dx + \left(\frac{i_R}{i_T} + \frac{i_T}{i_R} \right) S dx$$

$$\frac{di_R}{i_R} - \frac{di_T}{i_T} = d \left\{ \ln \left\{ \frac{i_R}{i_T} \right\} \right\} = \left(-2(S + K) + S \left(\frac{i_R}{i_T} + \frac{i_T}{i_R} \right) \right) dx \quad (a5)$$

กำหนดให้

$$R = \frac{I}{I_0} \text{ เป็นค่าสะท้อนของแผ่นชิ้นงาน}$$

$$r = \frac{i_R}{i_T} \text{ เป็นค่าสะท้อนของความหนาช่วงเล็กๆ}$$

จะได้

$$d\left\{\ln\left\{\frac{i_R}{i_T}\right\}\right\} = d(\ln r)$$

จาก

$$\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x}$$

$$d(\ln r) = \frac{dr}{r}$$

แทนค่า

$$d\left\{\ln\left\{\frac{i_R}{i_T}\right\}\right\} = \frac{dr}{r}$$

ในสมการ (a5) ฉะนั้น

$$\frac{dr}{r} = \left(-2(S + K) + S\left(\frac{1}{r} + r\right) \right) dx \quad (a6)$$

จัดเรียงใหม่

$$\frac{dr}{r} = \left(-2\left(1 + \frac{K}{S}\right) + \left(\frac{1}{r} + r\right) \right) S dx \quad (a7)$$

จะได้

$$\frac{dr}{r \left[-2 \left(1 + \frac{K}{S} \right) + \left(r + \frac{1}{r} \right) \right]} = S dx \quad (a8)$$

จัดรูป

$$\int_{R'}^R \frac{dr}{r \left[\left(\frac{1}{r} + r \right) - 2 \left(1 + \frac{K}{S} \right) \right]} = S \int_0^X dx$$

$$\int_{R'}^R \frac{dr}{1 + r^2 - 2 \left(\frac{S + K}{S} \right) r} = S \int_0^X dx \quad (a9)$$

กำหนดให้

$$a = \frac{S + K}{S} = 1 + \frac{K}{S} \quad (a10)$$

สมการที่ a9 กลายเป็น

$$\int_{R'}^R \frac{dr}{r^2 - 2ar + 1} = S \int_0^X dx \quad (a11)$$

จาก

$$Ax^2 + Bx + C = 0$$

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

ถ้า

$$r^2 - 2ar + 1 = 0$$

$$r = \frac{2a \pm \sqrt{4a^2 - 4}}{2}$$

$$r = a \pm \sqrt{a^2 - 1} \quad (a12)$$

เมื่อ

$$r^2 - 2ar + 1 = (r - a - \sqrt{a^2 - 1})(r - a + \sqrt{a^2 - 1}) \quad (a13)$$

และ

$$\frac{1}{r^2 - 2ar + 1} = \frac{C}{(r - a - \sqrt{a^2 - 1})} + \frac{D}{(r - a + \sqrt{a^2 - 1})}$$

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2 - 2ar + 1} &= \left[\frac{C}{(r - a - \sqrt{a^2 - 1})} \cdot \frac{(r - a + \sqrt{a^2 - 1})}{(r - a + \sqrt{a^2 - 1})} \right] + \left[\frac{D}{(r - a + \sqrt{a^2 - 1})} \cdot \frac{(r - a - \sqrt{a^2 - 1})}{(r - a - \sqrt{a^2 - 1})} \right] \\ \frac{1}{r^2 - 2ar + 1} &= \frac{C(r - a + \sqrt{a^2 - 1}) + D(r - a - \sqrt{a^2 - 1})}{(r - a - \sqrt{a^2 - 1})(r - a + \sqrt{a^2 - 1})} \quad (a14) \end{aligned}$$

พิจารณา (a12) และ (a13)

ดังนั้น

$$1 = C(r - a + \sqrt{a^2 - 1}) + D(r - a - \sqrt{a^2 - 1}) \quad (a15)$$

แทนค่า r ในสมการ (a15) จะได้

$$1 = C\left((a + \sqrt{a^2 - 1}) - a + \sqrt{a^2 - 1}\right) + D\left((a + \sqrt{a^2 - 1}) - a - \sqrt{a^2 - 1}\right)$$

$$1 = C(2\sqrt{a^2 - 1}) \quad (\text{a16})$$

หรือ

$$1 = C\left((a - \sqrt{a^2 - 1}) - a + \sqrt{a^2 - 1}\right) + D\left((a - \sqrt{a^2 - 1}) - a - \sqrt{a^2 - 1}\right)$$

$$1 = D(-2\sqrt{a^2 - 1}) \quad (\text{a17})$$

ดังนั้น (a16) = (a17) จะได้

$$1 = C(2\sqrt{a^2 - 1}) = D(-2\sqrt{a^2 - 1}) \quad (\text{a18})$$

$$C = \frac{D(-2\sqrt{a^2 - 1})}{2\sqrt{a^2 - 1}}$$

$$C = -D$$

$$C + D = 0$$

จากสมการ (a18)

$$C = \frac{1}{2\sqrt{a^2 - 1}} \quad (\text{a19})$$

และ

$$D = \frac{-1}{2\sqrt{a^2 - 1}} \quad (\text{a20})$$

จะได้สมการ (a11) เป็น

$$\int_{R'}^R \frac{C}{r-a-\sqrt{a^2-1}} + \frac{D}{r-a+\sqrt{a^2-1}} dr = S \int_0^x dx \quad (a21)$$

แทนค่า C และ D ใน (a21)

$$\int_{R'}^R \frac{1}{(2\sqrt{a^2-1})(r-a-\sqrt{a^2-1})} + \frac{-1}{(2\sqrt{a^2-1})(r-a+\sqrt{a^2-1})} dr = S \int_0^x dx$$

จะได้

$$\int_{R'}^R \frac{1}{r-a-\sqrt{a^2-1}} - \frac{1}{r-a+\sqrt{a^2-1}} dr = 2\sqrt{a^2-1}S \int_0^x dx \quad (a22)$$

จาก

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x} dx = \ln x \Big|_{x_1}^{x_2}$$

$$\ln x_2 - \ln x_1 = \ln \left[\frac{x_2}{x_1} \right]$$

ถ้า

$$\ln \left[\frac{x_2}{x_1} \right] - \ln \left[\frac{x'_2}{x'_1} \right] = \ln \left[\frac{\frac{x_2}{x_1}}{\frac{x'_2}{x'_1}} \right] = \ln \left[\frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{x'_1}{x'_2} \right]$$

จะได้สมการ (a21) เป็น

$$\left[\ln(r-a-\sqrt{a^2-1}) - \ln(r-a+\sqrt{a^2-1}) \right]_{R'}^R = 2\sqrt{a^2-1}Sx \Big|_0^x \quad (a23)$$

จะได้

$$\left[\ln \left\{ \frac{r-a-\sqrt{a^2-1}}{r-a+\sqrt{a^2-1}} \right\} \right]_{R'}^R = 2\sqrt{a^2-1}SX \quad (a24)$$

$$\ln \left[\frac{R-a-\sqrt{a^2-1}}{R-a+\sqrt{a^2-1}} \bullet \frac{R'-a+\sqrt{a^2-1}}{R'-a-\sqrt{a^2-1}} \right] = 2\sqrt{a^2-1}SX \quad (a25)$$

กำหนดให้

$$b = \sqrt{a^2-1}$$

จะได้

$$\ln \left[\frac{R-a-b}{R-a+b} \bullet \frac{R'-a+b}{R'-a-b} \right] = 2bSX \quad (a26)$$

พิจารณาเงื่อนไข ข้อจำกัด ที่ $X = \infty$, $R = R_\infty$ และ R' สามารถใช้ค่าตั้งแต่ไม่ได้รับแสง

$$R' = 0$$

ด้านซ้าย ของสมการ (a26) ต้องเท่ากับ ∞ นั่นคือ ตัวหารต้องเท่ากับ 0

$$R_\infty = a - b = a - \sqrt{a^2-1} \quad (a27)$$

แทนค่า a จากสมการ (a10)

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\left(1 + \frac{K}{S}\right)^2 - 1} \quad (a28)$$

จะได้

$$R_{\infty} = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + \frac{2K}{S}} \quad (\text{a29})$$

$$(K = 4\pi \frac{k}{\lambda}; \lambda \text{ คือ ความยาวคลื่น})$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบ $\frac{K}{S}$ จะได้

$$R_{\infty} = \left(1 + \frac{K}{S}\right) - \sqrt{\frac{K}{S} \left(\frac{K}{S} + 2\right)}$$

$$\sqrt{\frac{K}{S} \left(\frac{K}{S} + 2\right)} = \left(1 + \frac{K}{S}\right) - R_{\infty} \quad (\text{a30})$$

ยกกำลังสองทั้งสมการ จะได้

$$\frac{K}{S} \left(\frac{K}{S} + 2\right) = \left(\left(1 + \frac{K}{S}\right) - R_{\infty}\right)^2$$

$$\frac{K}{S} \left(\frac{K}{S} + 2\right) = \left(1 + 2\frac{K}{S} + \frac{K^2}{S^2}\right) - 2\left(1 + \frac{K}{S}\right)R_{\infty} + R_{\infty}^2$$

$$\frac{K^2}{S^2} + 2\frac{K}{S} - 1 - 2\frac{K}{S} - \frac{K^2}{S^2} = -2R_{\infty} - 2R_{\infty} \frac{K}{S} + R_{\infty}^2$$

$$-1 + 2R_{\infty} \frac{K}{S} = R_{\infty}^2 - 2R_{\infty}$$

$$2R_{\infty} \frac{K}{S} = R_{\infty}^2 - 2R_{\infty} + 1$$

$$\frac{K}{S} = \frac{R_{\infty}^2 - 2R_{\infty} + 1}{2R_{\infty}}$$

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (\text{a31})$$

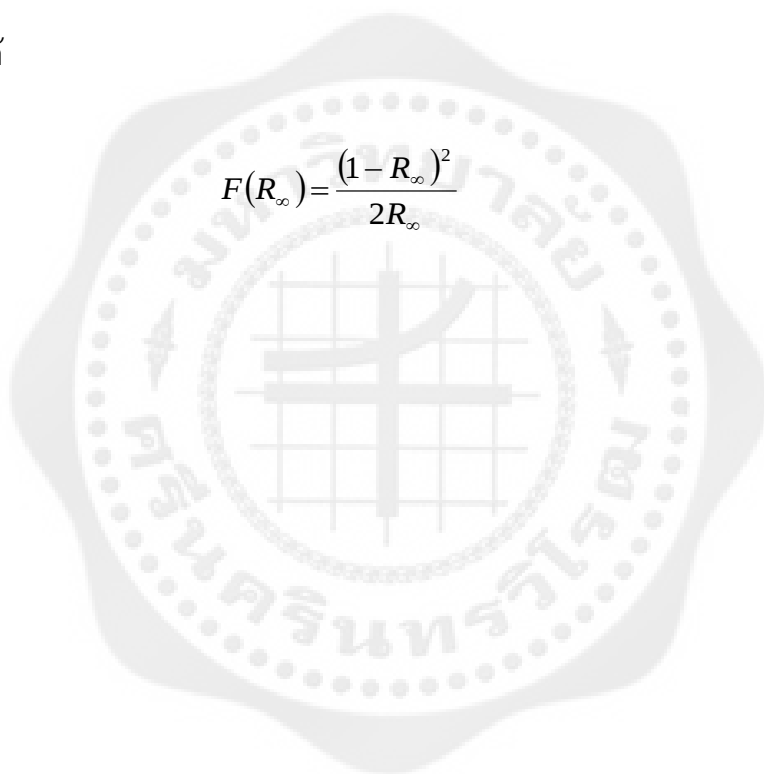
เห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีสัดส่วนใกล้เคียงกับความเข้มข้น

เมื่อ

$$F(R_\infty) = \frac{K}{S}$$

จะได้

$$F(R_\infty) = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (\text{a32})$$



ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล

นางสาว อรณภา เกลาฉืด

วัน เดือน ปีเกิด

24 กุมภาพันธ์ 2534

สถานที่เกิด

พัทลุง

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

2117/5 ตำบลอ่าวพาร์ทเมนต์ ซอย รามคำแหง 43

ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ

กรุงเทพมหานคร 10240

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2552

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนป่าพะยอมพิทยาคม จ.พัทลุง

พ.ศ. 2557

ศึกษาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์)

จากมหาวิทยาลัยทักษิณ จ.สงขลา

พ.ศ. 2561

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์)

จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กทม.