

การศึกษาช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางของสารประกอบทอง/ไททาเนีย



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2560

การศึกษาช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางของสารประกอบทอง/ไททาเนีย



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางของสารประกอบทอง/ไททาเนีย



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2560

ชฎานันท์ กาลปลูก. (2560). การศึกษาช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางของสารประกอบทอง/ไททาเนียม.

ปริญญาโท วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีญา เอี่ยมบุญ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ ( $\text{Au/TiO}_2$ ) โดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบบนกระแสไฟฟ้า (FTO) นำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ เเผ่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียส ศึกษาลักษณะทางสัณฐานและความหนาของตัวอย่างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) จากผลทดลองพบว่าพื้นผิวของฟิล์มหนาแน่นและสม่ำเสมอความหนาของฟิล์มที่เตรียมโดยการวัดภาพตัดขวางของฟิล์มโดยใช้ FE-SEM ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มประมาณ 100-200 นาโนเมตร และใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDS) เพื่อหาอนุภาคนาโนทองคำในฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จากนั้นศึกษาแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มโดยใช้เทคนิคสเปกตรัมการสะท้อนแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปโตรสโกปี จากการทดลองพบว่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผ่า ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มที่เผ่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำสูงกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ เพราะเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Burstein–Moss shift ของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

STUDYING THE BAND GAP OF GOLD AND TITANIA NANOCOMPOSITE THIN FILMS



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Master of Science Program in Physics

at Srinakharinwirot University

December 2017

Chayanan Kanpook. (2017). **Studying the Band Gap of Gold and Titania Nanocomposite Thin Films**. Master's Thesis, M.Sc. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist. Prof. Dr. Areeya Aeimbhu.

In this study, titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) thin films and gold nanoparticles-doped titanium dioxide ( $\text{Au/TiO}_2$ ) thin films were coated on the fluorine doped tin oxide glass (FTO) using the dip-coating technique. The coated films were heated at  $80^\circ\text{C}$  and  $500^\circ\text{C}$ . The morphology and thickness of the samples were characterised by the use of Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM). The band gap energy of the films were examined from the optical reflectance spectra. The FE-SEM surface morphology results showed that dense and uniform film deposited on fluorine doped tin oxide glass. The thickness of the prepared films were measured by taking cross sectional view of the films by FE-SEM. The average thickness of the films was approximately 100-200 nm. The presence of gold nanoparticles in the film was confirmed by Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDS). It was found that the energy gap of the prepared thin films were dependent on the heated treatment temperature. The values of energy gap for the films heated at  $500^\circ\text{C}$  were lower than that at  $80^\circ\text{C}$ . Moreover, the energy gap of gold-doped titanium dioxide films was higher than the pure titanium dioxide thin film. The broadening of the energy gap can be explained by Moss-Burstein effect.

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีญา เตียมบุญ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนความช่วยเหลือในการทำวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นราธิป วิทยากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญาโท และได้ให้คำแนะนำ แก้ไขปริญญาโทฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์ศิริบุญ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญาโท และได้ให้คำแนะนำ แก้ไขปริญญาโทฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และผู้มีพระคุณทั้งหลาย ที่อยู่เคียงข้างและให้การสนับสนุนต่อการทำปริญญาโทมาโดยตลอด

ชฎานันท์ กาลปลุก

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	4
ทองคำ (Gold).....	5
ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	6
การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ.....	8
การดูดกลืนแสง.....	8
ทฤษฎี Kubelka และ Munk.....	10
แถบช่องว่างพลังงาน.....	13
กระบวนการไฮล-เจล.....	15
ไฮล (Sol).....	15
เจล (Gelatin).....	15
การเกิดเจล (Gel).....	15
สภาวะที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
สภาวะที่ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
การเคลือบฟิล์ม (Coating).....	19
หลักการการทำงานของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผล.....	19
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope:FE-SEM).....	20

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
เทคนิควิเคราะห์ด้วย (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:EDS)	
การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Furier Transform Infrared Spectroscopy:FT-IR).....	22
วิเคราะห์ด้วยยูวี-วิส สเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy).....	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์งานวิจัย.....	35
สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	35
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
การเตรียมพื้นผิว.....	35
เตรียมซิล-เจล.....	36
การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำ.....	36
การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	36
การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ.....	37
ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy: $E_g$ ).....	37
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	38
ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบาง (FTO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มบาง- ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า	
ฟิล์มดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟูลอโรไรด์บนกระจก (FTO).....	38
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า.....	38
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคทองคำนาโนบนกระจกนำไฟฟ้า.....	48
การวิเคราะห์สมบัติทางแสง.....	53
ศึกษาผลการเจือทองที่มีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโทรสโกปีแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	54
แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ.....	54
5 สรุปผลการวิจัย.....	61
สรุปผลการวิจัย.....	61
ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก.....	71
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	74

## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2 สมบัติของทองคำ.....	6
3 ข้อดีและข้อเสียของวิธีโซล-เจล.....	18
4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำที่เจือบนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	31
5 แสดงค่าพื้นที่ผิว แถบช่องว่างพลังงานและอัตราการสลายตัว.....	32
6 แถบช่องว่างพลังงานของวัสดุประกอบ Au@TiO <sub>2</sub> .....	33
7 เปรียบเทียบค่าพลังงานพื้นผิวของอัตราส่วนการเจืออนุภาคทองคำต่อไทเทเนียม.....	33
8 แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำ.....	59

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์.....	4
2 โครงสร้างผลึกของทองคำแบบ Face Centre Cubic (FCC).....	6
3 โครงสร้างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	7
4 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ( $T \geq 0$ เคลวิน).....	7
5 กลไกการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ.....	8
6 การเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอน.....	10
7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงตามทฤษฎี Kubelca and Munk.....	11
8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะที่ใช้กรด.....	16
9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นในสภาวะที่ใช้กรด.....	16
10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะที่ใช้ด่าง.....	17
11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นในสภาวะที่ใช้ด่าง.....	17
12 การเติบโตของโพลีเมอร์และการเกิดเจล.....	17
13 การเติบโตของโพลีเมอร์และการเกิดเจลแบบมีเงื่อนไข.....	18
14 แสดงขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่ม.....	20
15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(FE-SEM).....	21
16 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโดยใช้กล้อง (SEM-EDS).....	22
17 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน.....	23
18 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	26
19 ปฏิกิริยาการเกิดของแสงที่เกิดขึ้นบนผิววัตถุ.....	27
20 การวัดการส่งผ่านและการสะท้อนของแสงด้วย Integrating sphere.....	28
21 การวัดการสะท้อนแสง.....	29
22 ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางดีบุกเคลือบบนกระจกด้วย (fe sem) ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า.....	39
23 เเผที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	40
24 องค์ประกอบของฟิล์มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	41
25 เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	42

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
26 องค์ประกอบของฟิล์มที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เจือด้วยอนุภาคของคาร์บอนาโนทงค้ำบนกระจกนำไฟฟ้า.....	43
27 เเผที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	44
28 องค์ประกอบของฟิล์มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	45
29 เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	46
30 องค์ประกอบของฟิล์มที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	47
31 สเปกตรัม FT-IR ของกระจกนำไฟฟ้าสเปกตรัม FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์.....	48
32 เเผที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	49
33 เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสสเปกตรัม FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมได ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคของคาร์บอนาโน.....	50
34 เเผที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	51
35 เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	52
36 สเปกตรัมการส่องแสง (optical Transmittance).....	53
37 สเปกตรัมสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสง (optical Reflectance).....	54
38 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เเผที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	55
39 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	56
40 ค่าแถบช่องว่างพลังงานฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคของคาร์ เเผที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	57
41 ค่าแถบช่องว่างพลังงานฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคของคาร์ เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	58
42 ปราคฏการณ์ Burstein–Moss shift ของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	60

# บทที่ 1

## บทนำ

### ภูมิหลัง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์มากมายโดยเฉพาะการนำมาใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบอื่น เช่น การเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และการเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis) นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง[1]

การนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมได-ออกไซด์ เช่น โครงสร้างผลึก (Phase structure) ขนาดอนุภาค (Particle size) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ซึ่งเป็นผลโดยตรงต่อกลไกการทำให้เกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส[2]

อย่างไรก็ตามการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสมีข้อจำกัดของแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความกว้างประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต(Ultraviolet light) ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 นาโนเมตรเท่านั้นเพื่อให้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสามารถทำได้โดยการเจือสารในไทเทเนียมไดออกไซด์สารเจือที่นำมาใช้ในไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มโลหะทรานซิชัน เช่น โครเมียม(Cr) ทองแดง(Cu) เหล็ก(Fe) และกลุ่มโลหะมีสกุลเช่น ทองคำ (Au) เงิน (Ag) แพลตินัม (Pt) [3]

อนุภาคนาโนทองคำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีเพราะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่นซึ่งพิจารณาได้จากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Standard reduction potential :  $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 1.6 โวลต์เมื่อเทียบกับโลหะอื่นเช่น เงิน มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเท่ากับ 0.8 โวลต์ จึงทำให้อนุภาคนาโนทองคำ มีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนออกมาจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอน(Electron hole recombination) ได้เป็นอย่างดี

ขนาดของอนุภาคทองคำที่เจือลงในโลหะออกไซด์มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก[4] และวิธีการสังเคราะห์ [5] มีการเจือทองคำ แพลตินัมและเงินในไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าเมื่อเจือทองคำจะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสได้ดีมากยิ่งขึ้น และเจือ

อนุภาคนาโนทองคำในไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้แถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำลดลงเป็น 3.07 อิเล็กตรอนโวลต์[6]

งานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือของอนุภาคนาโนทองคำลงบนกระจกนำไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการโซล-เจลศึกษาผลของอนุภาคนาโนทองคำที่มีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ที่เตรียมด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ

### ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำด้วยกระบวนการโซล-เจล จุ่มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า
2. ศึกษาลักษณะพื้นฐาน(Morphology) และปริมาณธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า
3. ศึกษาผลของการเจืออนุภาคทองคำที่มีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียม-ไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

### ความสำคัญของการวิจัย

1. สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจืออนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าได้ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ
2. ทำให้ทราบถึงผลของอนุภาคนาโนทองคำที่เจือต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

### ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำด้วยกระบวนการโซล-เจล
2. เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ
3. ศึกษาลักษณะพื้นฐาน (Morphology) และปริมาณธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

4. ศึกษาผลของการเจืออนุภาคนาโนทองคำที่มีต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานด้วยเครื่องยูวี-วิสสเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าได้
2. ทำให้ทราบค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

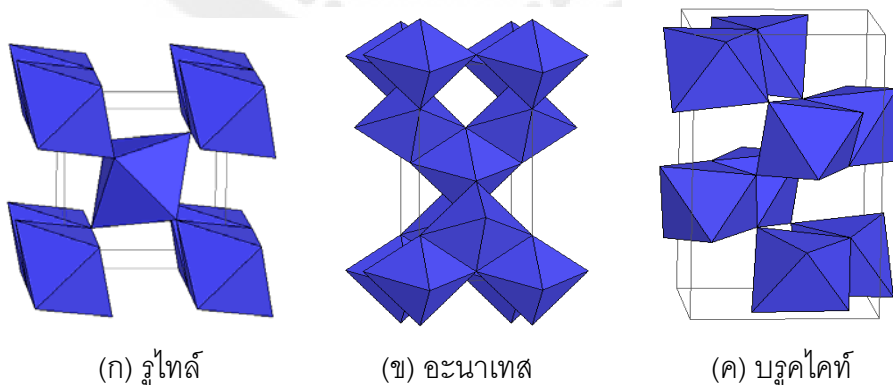
### 1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ [7]

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้มากในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะค่าช่องว่างพลังงานมีค่าประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่านี้ใกล้เคียงกับค่าพลังงานการกระตุ้นของรังสีอัลตรา-ไวโอเล็ต (~ 380 นาโนเมตร) สำหรับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ก็มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ไม่นิยมนำมาใช้เนื่องจากมีความเป็นพิษ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า ละลายน้ำได้น้อยกว่าแคดเมียมซัลไฟด์และซิงค์ออกไซด์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เสียคุณสมบัติไปมากเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากการกัดกร่อนน้อยมากนอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึกอยู่ 3 แบบได้แก่

1. รูไทล์ (Rutile) มีความเสถียรภาพมากที่สุดที่อุณหภูมิสูง ๆ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนมากจะเป็นรูไทล์เกือบทุกโรงงาน เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหารหรือบางครั้งพบในหินอัคนี

2. อะนาเทส (Anatase) มีความเสถียรภาพได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงชั้นสูง

3. บรูคไคท์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละรูปแบบแสดงดังรูปที่ 1



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) รูไทล์ (ข) แอนาเทส (ค) บรูคไคท์ [8]

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส นั้นจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส มีค่าเท่ากับ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคท์ ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่ายทั้งที่ยังมีความสามารถในการดูดซับรังสีต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส แต่โครงสร้างแบบอะนาเทสจะไม่เสถียรเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น [9] และสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบบรูคไคท์และรูไทล์ได้ง่าย ในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างแบบอะนาเทสมากกว่าแบบอื่นลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 1

ตาราง 1 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์ และอะนาเทส [10]

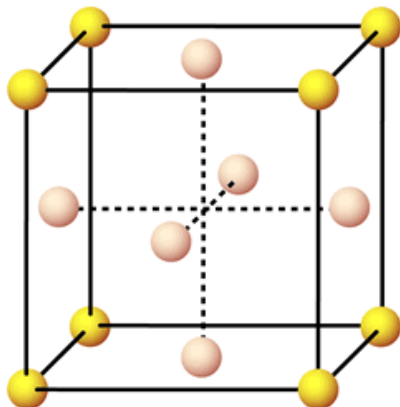
ลักษณะสมบัติ	รูไทล์	อะนาเทส	บรูคไคท์
รูปร่างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โธอมบิก
ค่าช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)	3.02	3.23	1.90
ค่าความกระด้าง (โมห์)	6.0 – 7.0	5.5 – 6.0	5.5-6
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	3.895	4.274	4.123
ค่าคงที่โครงร่าง, a (Å)	4.593	3.784	9.134
ค่าคงที่โครงร่าง, b (Å)	4.593	3.784	5.447
ค่าคงที่โครงร่าง, c (Å)	2.959	9.515	5.145
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	1858	เปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่ อุณหภูมิสูง	เปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่ อุณหภูมิสูง

## 2. ทองคำ (Gold) [11]

ทองคำ (Au) เป็นธาตุโลหะทรานซิชัน มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสีเหลืองเงา ทนต่อการผุกร่อนไม่เป็นสนิมกับอากาศ ทองคำสามารถละลายในกรดกัดทองคำ (Aquaregia)

มีโครงสร้างผลึกแบบ (Face Centre Cubic; FCC) ดังรูปที่ 2 ทองคำมีความหนาแน่น 19.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจุดหลอมเหลวทองคำบริสุทธิ์ที่ 1,064 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 2,860

องศาเซลเซียสของค่าสามารถนำไฟฟ้าได้ดี สมบัติของทองคำแสดงดังตารางที่ 2



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างผลึกของทองคำแบบFace centered cubic (FCC)

ตาราง 2 สมบัติของทองคำ

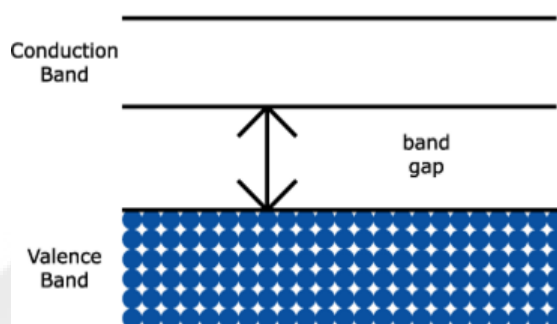
สมบัติของทองคำ	
มวลอะตอม	196.97
เลขอะตอม	79
จุดหลอมเหลว	1,064
จุดเดือด	2,860
โครงสร้างผลึก	FCC
การนำความร้อน(วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)	310
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	19.3
ความต้านทานไฟฟ้า (ไมโครโอห์ม-เมตร) ที่ 20 องศาเซลเซียส	0.022

### 3. ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [12,13]

การศึกษาทางด้านกลศาสตร์ควอนตัมทำให้ทราบถึงพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุเป็นปริมาณควอนตัมหรือมีค่าที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นไปตามชนิดของธาตุ อะตอมที่อยู่อย่างโดดเดี่ยวจะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมนั้นมีค่าระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องแต่เมื่อมีอะตอม  $N$  ตัวเข้ามาอยู่ใกล้กันจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะตอมทำให้เกิดการแยกระดับของพลังงานออกเป็น  $N$  ระดับเพื่อให้อิเล็กตรอนของอะตอมสามารถมีระดับพลังงานที่ไม่ซ้ำซ้อนกัน ระดับพลังงานที่แยกออกมาจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันและเรียงกันอย่างต่อเนื่องเป็นแถบๆเรียกว่าแถบพลังงานยินยอม (Allowed band) โดยแต่ละแถบจะ

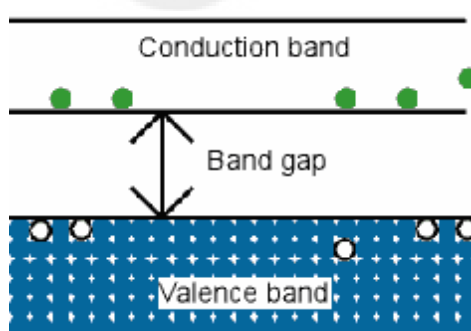
แยกออกจากกัน แถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden band) หรือแถบช่องว่าง (Band gap :  $E_g$ ) เป็นแถบที่ปราศจากอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนในของแข็งจะเคลื่อนที่ในแถบยินยอมเท่านั้น

แถบยินยอมที่อยู่ด้านบนสุดเรียกว่าแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งเป็นแถบที่ปราศจากอิเล็กตรอน (Empty band) แถบถัดมาจะเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน (Filled band) เรียกว่าแถบเวเลนซ์ (Valence band) โดยที่ทั้งสองแถบถูกแยกออกจากกันด้วยแถบพลังงานต้องห้าม ดังรูปที่ 3



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [14]

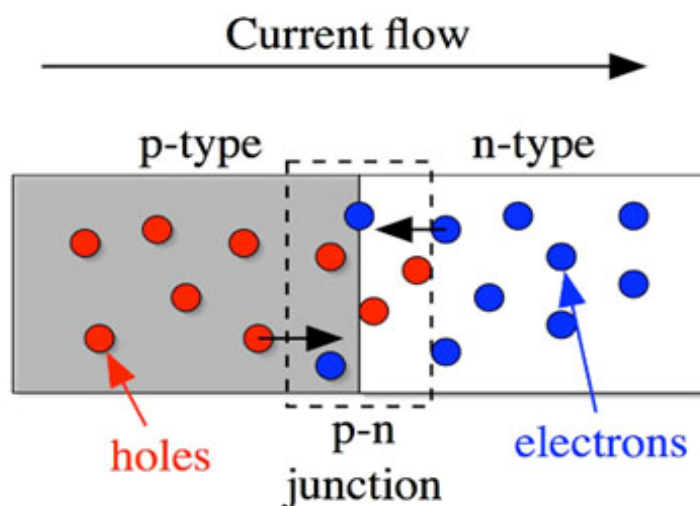
พลังงานของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T=0$  เคลวิน) อิเล็กตรอนจะอยู่ในแถบเวเลนซ์เท่านั้นส่งผลให้ในแถบนำไฟฟ้าไม่มีอิเล็กตรอนอยู่จึงทำให้สารกึ่งตัวนำอยู่ในสถานะที่เป็นฉนวนไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T>0$  เคลวิน) อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานความร้อน หรือพลังงานจากโฟตอนแล้วถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ในเวลาเดียวกันแถบเวเลนซ์เกิดช่องว่าง เรียกว่าโฮล (Hole) โดยจำนวนโฮลจะเท่ากับอิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไป ดังรูปที่ 4 ส่งผลให้สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้



ภาพประกอบ 4 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ( $T>0$  เคลวิน) [14]

#### 4. การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [15]

กลไกการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำคือในสารกึ่งตัวนำนั้น พาหะที่จะเป็นตัวนำไฟฟ้า มีทั้งอิเล็กตรอนและโฮลดังรูปที่ 5 อิเล็กตรอนจะไหลในทิศทางสวนกับสนามไฟฟ้า ส่วนโฮลจะไหลในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า เรียกการนำไฟฟ้าด้วยพาหะอิเล็กตรอนและโฮลพร้อมๆกันว่าการนำไฟฟ้าแบบ Ambipolar Conduction



ภาพประกอบ 5 กลไกการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [16]

จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำขึ้นเดียวกันอาจมีความแตกต่างกัน ทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำเป็นสารเป็นสารกึ่งตัวนำ 3 ชนิดได้แก่

1. ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนมีมากกว่าจำนวนโฮล เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n type semiconductor)
2. ถ้าจำนวนโฮลมีมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p type semiconductor)
3. ถ้าจำนวนโฮลและจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากันเรียกว่าสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor)

#### 5. การดูดกลืนแสง [12,17]

การดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนสถานะอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Fundamental absorption) การดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจึงต้องแสดงลักษณะของแถบพลังงานโดยให้เป็นฟังก์ชันของคลื่น (Wave number :  $k$ )

ของอิเล็กตรอนโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $p = \hbar k$  การเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสงเพราะมีการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่งในลักษณะมีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นและค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงสถานะจะต้องมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนของแสงที่ดูดกลืนซึ่งต้องเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน (Law of conservation of energy) เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนฟังก์ชันของเลขคลื่นจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงกล่าวได้ว่ากระบวนการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนเนื่องจากการดูดกลืนแสงค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะต้องคงที่เสมอทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงสถานะ เรียกว่ากฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนรับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ 2 ลักษณะคือ

1. การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง (Indirection absorption) เป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าโดยที่มีฟังก์ชันของเลขคลื่น  $k$  เปลี่ยนแปลง(ดังรูปที่ 6 ก.) การดูดกลืนแสงลักษณะนี้เป็นไปได้โดยให้อิเล็กตรอนรับหรือคายพลังงานโฟนอนเพื่อช่วยให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงานและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\hbar\omega = E_g \pm \hbar\Omega \quad : \text{กฎ}$$

อนุรักษ์พลังงาน

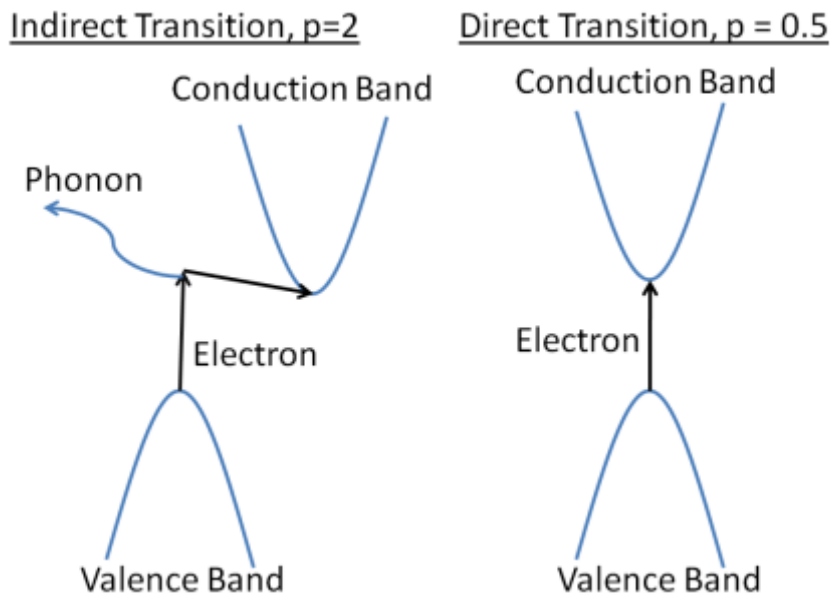
$$\hbar k_{CB} = \hbar k_{VB} \pm \hbar k_{phonon} \quad : \text{กฎการ}$$

อนุรักษ์โมเมนตัม

โดยที่  $\Omega$  เป็นความถี่ของโฟนอน

2. การดูดกลืนแสงแบบตรง (Direction absorption) เป็นการดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่โมเมนตัมของอิเล็กตรอนก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันของเลขคลื่น  $k$  ของอิเล็กตรอน เป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ที่ตำแหน่ง  $k=0$  และจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $k=0$  ดังรูปที่ 6 ข.

ก. การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรงข. การดูดกลืนแสงแบบตรง



ภาพประกอบ 6 การเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอน [17]

#### 6. ทฤษฎี Kubelka และ Munk [18,19]

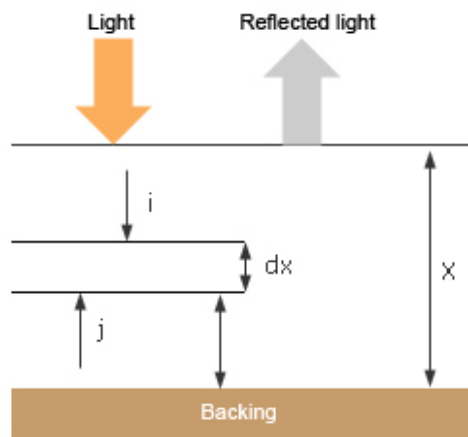
Kubelka และ Munk ได้เสนอสมการเชิงอนุพันธ์โดยการอ้างรูปแบบของการกระจายของแสงภายในชั้นเคลือบผิว โดยแสงจะแผ่กระจายในชั้นของตัวกลางซึ่งขนานกับฐานรองรับโดยมีการกำหนดดังนี้

1. ตัวกลางมีลักษณะเป็นระนาบที่มีความหนาจำกัดแต่ความยาวและความกว้างมีขนาดได้ไม่จำกัด
2. แสงที่ตกกระทบกับพื้นผิวมีลักษณะการกระจายแบบสมบูรณ์ (Perfectly diffuse light)
3. อันตรกิริยาของแสงเมื่อกระทำกับตัวกลางจะเกิดการกระเจิงและการดูดแสงเท่านั้น
4. ตัวกลางมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) และโฮโมจีเนียส (Homogeneous) ซึ่งประกอบด้วยแสงที่มีลักษณะแบบเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous) มีโอกาสทำให้เกิดการกระจายแสงภายในตัวกลาง
5. ไม่เกิดการสะท้อนแสงที่พื้นผิวภายในและภายนอก

จากข้อกำหนดของสมการจะพิจารณาเฉพาะความหนาของชั้นผิวเคลือบวัสดุ และความเข้มแสงที่ตกกระทบ สะท้อนและส่องผ่านกำหนดให้แสงมีลักษณะการกระจายแบบสมบูรณ์ แสงมีทิศทางเคลื่อนที่ 2 ทิศทางคือทิศขึ้นและทิศลง

กำหนดให้ i คือ ฟลักซ์แสงที่เคลื่อนที่ในทิศลง

j คือฟลักซ์แสง ที่เคลื่อนที่ในทิศขึ้นผ่านชั้นบางที่มีความหนา  $dx$  ดังรูปที่ 7



ภาพประกอบ 7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงตามทฤษฎี Kubelca and Munk

เมื่อพิจารณาชั้นบาง  $dx$  เมื่อแสงส่องผ่านฟลักซ์ของแสงจะมีค่าลดลงเพราะการดูดกลืนแสง  $sdx$  และการกระเจิงของแสง  $rdx$  เมื่อ  $s$  คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและ  $r$  คือค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านชั้นบาง  $dx$  ฟลักซ์  $i$  มีค่าลดลง  $(s+r)idx$  แสงบางส่วนจะมีการสูญเสียเนื่องจากเกิดการดูดกลืนกระเจิงของแสงบนชั้น  $dx$  เมื่อพิจารณาฟลักซ์  $j$  บางส่วนของฟลักซ์  $j$  ที่เคลื่อนที่ขึ้นจะเกิดการกระเจิงกลับที่มีทิศทางเดียวกันกับฟลักซ์  $i$  ดังนั้นฟลักซ์  $i$  จะมีค่าเท่ากับสมการเชิงอนุพันธ์

$$-di = -(s+r)idx + rjdx \quad (1)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของฟลักซ์  $j$  เคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นผ่านชั้นบาง

$$dj = -(s+r)jdx + ridx \quad (2)$$

เครื่องหมายลบ (-) ด้านซ้ายมือของสมการที่ 1 เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์  $i$  ตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์  $j$

กำหนดให้อัตราการสะท้อนแสง  $h$  เป็นสัดส่วนระหว่างฟลักซ์  $j$  กับฟลักซ์  $i$

$$h = \frac{j}{i} \quad (3)$$

ผลรวมสมการที่ 1 และสมการที่ 2 คือ

$$dh = [rh^2 - 2(r+s)h + r]dx \quad (4)$$

เงื่อนไขขอบเขต

$$x = X, h = R \text{ (ค่าสะท้อนสัมประสิทธิ์การเคลือบผิว)}$$

และ  $x = 0, h = R_0$  (ค่าการสะท้อนที่ฐานรอง)

$X$  คือ ความหนาของผิวเคลือบ

กำหนดให้  $a = 1 + \frac{s}{r}$

ผลเฉลยของสมการที่ 4 คือ

$$\ln \frac{(R-a-\sqrt{a^2-1})(R_0-a+\sqrt{a^2-1})}{(R_0-a-\sqrt{a^2-1})(R-a+\sqrt{a^2-1})} = 2rx\sqrt{a^2-1} \quad (5)$$

กำหนดให้ผิวเคลือบของวัสดุมีความหนาเป็นอนันต์ ( $x \rightarrow \infty$ )

ดังนั้นค่าสะท้อนที่ฐานรอง ( $R_0 \rightarrow \infty$ )

สมการที่ 5 ให้ค่าการสะท้อน  $R$  ที่  $x > \infty$  ในรูปของ  $R_\infty$  จะได้

$$(R_\infty - a + \sqrt{a^2 - 1})(R_0 - a - \sqrt{a^2 - 1}) = 0 \quad (6)$$

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

แทน  $a = 1 + \frac{s}{r}$  ในสมการ 7 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน  $F(R_\infty)$

$$\frac{s}{r} = F(R_\infty) = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (8)$$

เรียกสมการที่ 8 ว่าฟังก์ชัน Kubelka และ Munk

## 7. แถบช่องว่างพลังงาน [20]

ฟังก์ชัน Kubelca และ Munk หรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน  $F(R_{\infty})$  จากสมการที่ 8 อยู่ในเทอมค่าการสะท้อนแบบกระจาย (diffuse reflection:  $R_{\infty}$ ) การคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band-gab energy:  $E_g$ ) พบว่าค่าการสะท้อนแบบกระจาย ( $R_{\infty}$ ) สัมพันธ์กับค่าแถบช่องว่างพลังงานเริ่มจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity :  $\epsilon$ ) และดัชนีหักเหเชิงซ้อน ( $N$ )

$$\epsilon = N^2 \quad (9)$$

เมื่อ 
$$N_i = n_i + ik_i \quad (10)$$

$n_i$  คือ ดัชนีหักเหส่วนจริง

$k_i$  คือ ดัชนีหักเหส่วนจินตภาพ

นิยามค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption Coefficient :  $\alpha$ ) มีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และดัชนีหักเหส่วนจินตภาพ ( $k_i$ )

$$\alpha = \frac{2\omega k_i}{c} = \frac{2\pi k_i}{\lambda} \quad (11)$$

เมื่อ  $c$  คือค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับสภาพยอมส่วนจินตภาพ (Imaginary permittivity:  $\epsilon_i$ )

$$k_i = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} = \frac{\epsilon_i}{n_i} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\omega \epsilon_i}{cn_i} \quad (13)$$

สภาพยอมส่วนจินตภาพมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของสถานะ (Joint density of states) ดังสมการ

$$\epsilon_i = c_1 \frac{|P_{cv}|^2}{\omega^2} D_j \quad (14)$$

เมื่อ  $D_j$  คือ ความหนาแน่นรวมของสถานะ และ  $P_{cv}$  คือ (Transition matrix element)

$$D_j = \frac{1}{4\pi^3} \int \frac{ds_k}{|v_k (E_c - E_v)|} \quad (15)$$

$$P_{cv} = \langle \psi_c | -e\vec{E} \cdot \vec{r} | \psi_v \rangle \quad (16)$$

กำหนดให้  $s_k$  คือ ค่าคงที่พลังงานพื้นผิว (Constant energy surface) สำหรับพลังงาน  $E_c - E_v$

กำหนดค่าความหนาแน่นของสถานะ พบว่าค่าสภาพยอมจินตภาพอยู่ในเทอมของแถบช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ )

$$\epsilon_i = C_2 \frac{1}{(\omega\hbar)^2} (\omega\hbar - E_g)^p \quad (17)$$

$$\alpha\omega\hbar = C(\omega\hbar - E_g)^p \quad (18)$$

เมื่อ  $\omega\hbar$  คือ พลังงานโฟตอน

$E_g$  คือ แถบช่องว่างพลังงาน

$p$  คือ band gap transition

$C$  คือ ค่าคงที่

จากสมการที่ 18 จะถูกต้องก็ต่อเมื่อพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน โดย  $p$  ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนสถานะของแถบพลังงาน สำหรับ  $p = \frac{1}{2}$  เป็นการเปลี่ยนสถานะจากพลังงานโดยตรง (Direct transition) และการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect transition) มีค่า  $p = 2$

## 8. กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process)[21]

8.1 โซล (Sol) การแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลวโดยที่โซลจะมีความหนาแน่นอนุภาคของแข็งมากกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆอนุภาคของของแข็งที่อยู่ภายในของเหลวจะมีขนาดเล็กมาก (~1-1000 นาโนเมตร) จนมีแรงต้านทานแรงโน้มถ่วงจึงไม่มีการตกตะกอน และมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปโดยที่คอลลอยด์บางชนิดจะเปลี่ยนสภาพจากโซลเป็นเจล หรือจากเจลไปเป็นโซลได้ขึ้นอยู่กับสภาวะ เช่น อุณหภูมิ

### 8.2 เจล (Gelatin)

เจลเป็นสารละลายแขวนลอยชนิดหนึ่งซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้น ซึ่งมีความหนืดสูงจนสารละลายมีความยืดหยุ่นอย่างของแข็ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโครงข่าย (Network) ของเฟสที่กระจาย (Dispersed-Phase) หรือคอลลอยด์ (Colloid) และสารตัวกลางทำกระจาย (Dispersed Medium) วนเวียนอยู่ทั่วโครงข่ายนั้น ที่โครงสร้างของของแข็งเกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยง 3 มิติและมีความพรุนกระจายปกคลุมทั่วเฟสของของเหลว มีขนาดไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากโซลที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า คอลลอยด์เจล (Colloidal Gel) ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าคอลลอยด์เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่าโพลีเมอริคเจล (Polymeric Gel)

### 8.3 การเกิดเจล (Gel)

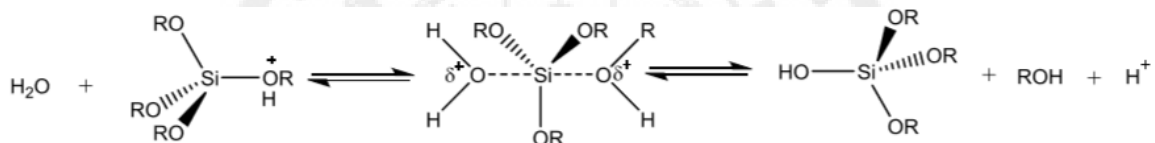
เจลเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยโครงข่ายต่อเนื่องของของแข็งปกคลุมทั่วเฟสของเหลวซึ่งความต่อเนื่องของโครงข่ายของแข็งทำให้เจลมีความยืดหยุ่น ซึ่งเจลสามารถเกิดจากสารละลายได้เมื่อเกิดแรงกระทำแพร่กระจายเชื่อมโยงไปยังโมเลกุลอื่นในทิศทางที่ทำให้เกิดเป็นโครงร่างแหโดยทั่วไป เจลจะขึ้นอยู่กับการรวมตัวระหว่างโครงข่ายของของแข็งและตัวกลางของเหลว ถ้าของเหลวประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่าเอควาเจล (Aquagel) หรือไฮโดรเจล (Hydrogel) แต่ถ้าของเหลวประกอบด้วยแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า อัลโคเจล (Alcogel)

การเกิดเจลอาจเกิดได้จากการระเหยอย่างรวดเร็วของตัวทำละลายซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเตรียมฟิล์มหรือไฟเบอร์โครงร่างแหของเจลจะเคลื่อนย้ายต่อไปยังตำแหน่งต่างๆจนเกิดการควบแน่นต่อไปเรื่อยๆ คือมีทั้งโซลโครงร่างแหของเจลและโพลีเมอร์เล็ก ๆ ที่อนุภาคยังสามารถเชื่อมต่อและทำให้เกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงการหดตัวของเจล (Shrinkage) อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการสังเคราะห์หรือการระเหยของของเหลวในระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงร่างแหและการไล่น้ำออกจากรู-พรุน การอบแห้ง (Drying) ทำโดยการระเหยภายใต้สภาวะปกติ จะทำให้เกิดการหดตัวของโครงข่ายของเจลทำให้ปริมาตรลดลง 5 ถึง 10 เท่าจากเดิมซึ่งเจลที่เกิดจากการอบแห้งที่สภาวะปกติเรียกว่า ซีโร-เจล (Xerogel) แต่ถ้านำเจลไปอบแห้งในเครื่องอบไอน้ำความดันสูง (Autoclave) ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Condition) ซึ่งไม่มีชั้นผิวสัมผัสระหว่าง

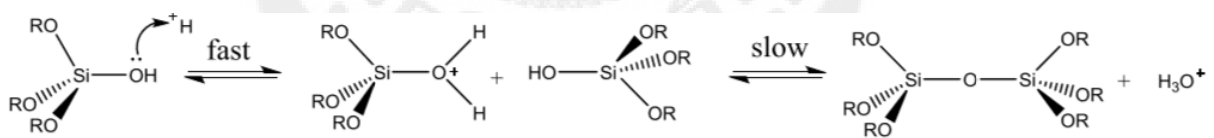
ของเหลวและไอน้ำ ดังนั้นจึงไม่มีแรงดันคาปิลลารี (Capillary Pressure) ทำให้เกิดการหดตัวเพียงเล็กน้อยของเจลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแบบนี้เรียกว่า แอโรเจล (Aerogel) ซึ่งได้จากของแข็งที่มีขนาดเล็กถึงประมาณ 1 ไมครอน ซึ่งเกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิส-เจลดิวเทรชันที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในกระบวนการไฮโดร-เจลดิวเทรชัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทั้งสองสภาวะนี้จะส่งผลต่อการเกิดเจลที่ต่างกัน

### 8.3.1 สภาวะที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในสภาวะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเร็วกว่าปฏิกิริยาการควบแน่น โดยในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นจะนำไปสู่การขยายตัวของโพลิเมอร์สายโซ่ตรงและโพลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งการเกิดเจลจะเกิดขึ้นเมื่อโพลิเมอร์ที่กำลังขยายตัวมีการพันกันและเกิดพันธะข้ามระหว่างสายโซ่และกรดจะเป็นตัวช่วยทำให้อนุภาคของโลหะอัลคอกไซด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งกรดที่เลือกมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก



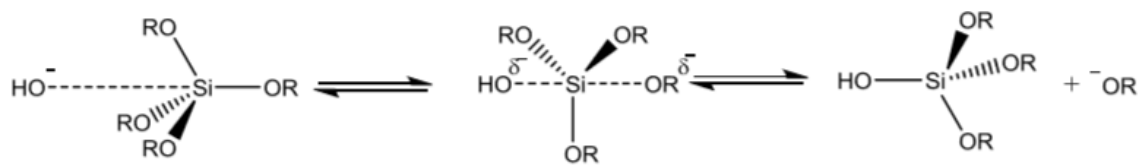
ภาพประกอบ 8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะที่ใช้กรด[22]



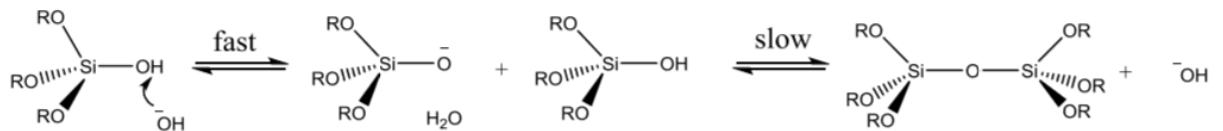
ภาพประกอบ 9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นในสภาวะที่ใช้กรด [22]

### 8.3.2 สภาวะที่ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

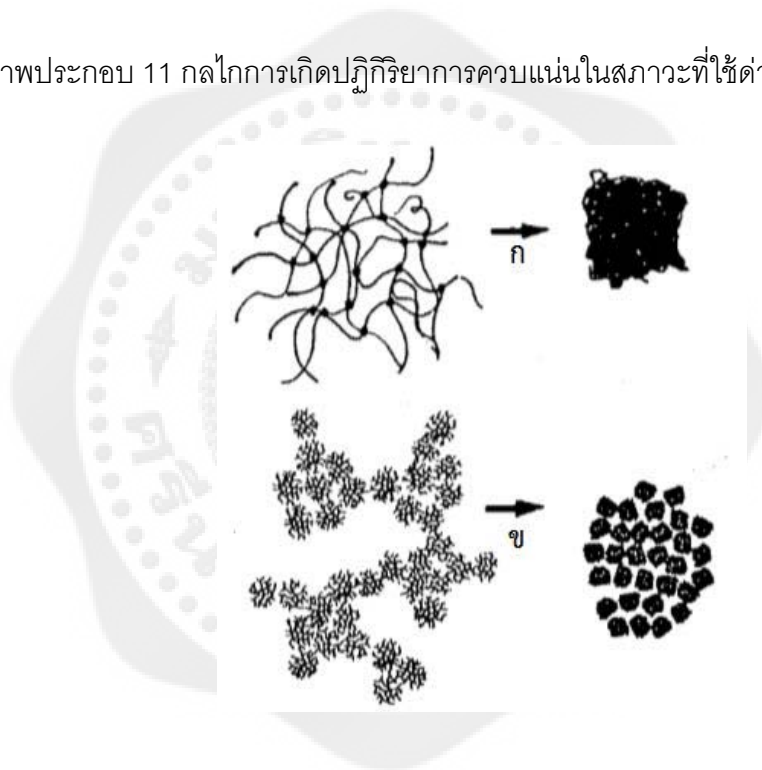
ในสภาวะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาการควบแน่นจะทำให้เกิดกลุ่มของโพลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่กิ่ง (Branched Polymer Cluster) ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 และเจลจะเกิดขึ้นเมื่อมีการต่อเชื่อมกันระหว่างกลุ่มโพลิเมอร์ ทั้งนี้กรด ด่างและอุณหภูมิยังส่งผลต่อการเกิดเจล ทำให้การเชื่อมต่อกันของกลุ่มโพลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 12 และ รูปที่ 13



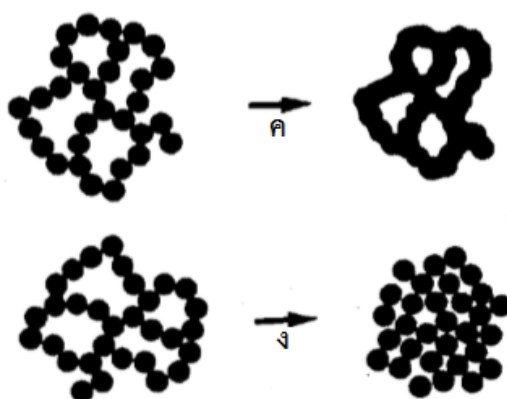
ภาพประกอบ 10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะที่ใช้ต่าง [22]



ภาพประกอบ 11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นในสภาวะที่ใช้ต่าง [22]



ภาพประกอบ 12 การเติบโตของโพลิเมอร์และการเกิดเจล (ก) สภาวะนี้ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) สภาวะใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [21]



ภาพประกอบ 13 การเติบโตของโพลิเมอร์และการเกิดเจลภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ (ค) อุณหภูมิสูง (ง) อุณหภูมิต่ำ[21]

ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของวิธีโซล-เจล

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง	1. เกิดการหดตัวมากระหว่างกระบวนการผลิต
2. ได้โครงสร้างเอกพันธ์(Homogeneity	2. เกิดโครงสร้างขนาดเล็กระหว่างโครงสร้าง
3. ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง	3. สารละลายอินทรีย์บางชนิดมีความเป็นพิษสูง
4. ได้เจลที่มีลักษณะจำเพาะ	4. ใช้เวลานาน
5. สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ	5. สารเคมีมีราคาสูง
6. ประหยัดพลังงาน	
7. ได้ของแข็งอสัณฐานชนิดใหม่	
8. ได้ของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกชนิดใหม่	

#### 8.4 การเคลือบฟิล์ม (Coating)

ฟิล์มบางของตัวเร่งปฏิกิริยาไวแสงมีคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการหลายอย่าง เช่น การทำความสะอาดผิวด้วยตัวเองและการฆ่าเชื้อด้วยตัวเองการเลือกวิธีเคลือบที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับนำไปประยุกต์ใช้การเคลือบฟิล์มมี 2 วิธีคือ

1. การเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายเป็นสารตั้งต้นโดยสร้างฟิล์มภายใต้ความดันอากาศปกติเช่น การเคลือบแบบจุ่ม (Dip Coating) การเคลือบแบบปั่น (Spin Coating) วิธีการเคลือบแบบจุ่ม (Dip- Coating) เป็นวิธีที่สะดวกสามารถทำได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

2. การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศเช่น วิธีการเคลือบแบบสปัตเตอริง (Sputtering) วิธีการเคลือบแบบปั่น (Spin Coating) ต้องอาศัยความเร็วรอบที่แตกต่างกันในการหมุนเพื่อให้ได้น้ำหนักของฟิล์มที่เท่ากัน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบ วิธีการสปัตเตอริงเป็นวิธีที่ต้องควบคุมความดัน อุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและใช้เวลานานดังนั้นในโครงการวิจัยนี้เลือกวิธีการเคลือบแบบจุ่มจึงจะกล่าวเฉพาะวิธีการเคลือบเพียงการเคลือบแบบจุ่ม

#### 8.4.1 การเคลือบแบบจุ่ม

การเคลือบแบบจุ่มเป็นวิธีการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวอย่างช้าๆ การจุ่มจะนำสารละลายมาเคลือบบนพื้นผิวอย่างช้าๆ ซึ่งมีการควบคุมความเร็วในการดึงให้คงที่ เพื่อให้ผิวของวัสดุมีความเรียบสม่ำเสมอและความหนาของฟิล์มน้อย หากต้องการฟิล์มที่มีความหนาน้อยให้ใช้ความเร็วในการเคลือบแบบจุ่มเร็ว แต่ถ้าต้องการเคลือบแบบหนามากต้องลดความเร็ว หรือจะทำการจุ่มหลายๆ ครั้งเพื่อเพิ่มความหนาให้กับฟิล์มได้เช่นกัน การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มพิจารณาจากแรง Drag Flow เกิดจากผลของความหนืดของสารละลายและความเร็วในการจุ่ม (Dipping speed) ซึ่งตัวแปรทั้งสองจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์ม สารละลายที่ใช้มีความหนืดมาก และใช้ความเร็วในการเคลือบสูงมากขึ้น จะทำให้แรง Drag Flow มากขึ้นและทำให้เนื้อสารที่เคลือบบนพื้นผิววัสดุมากตามไปด้วยจึงทำให้ฟิล์มหนา

ขั้นตอนในการเคลือบแบบจุ่ม(Dip Coating) มี 5 ขั้นตอนดังนี้

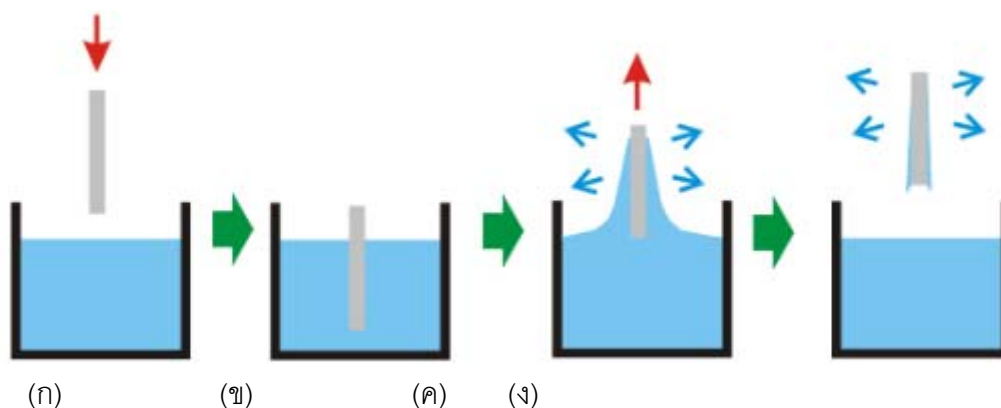
1. การเคลือบแบบจุ่ม (Immersion) เป็นขั้นตอนการนำวัสดุที่ต้องการเคลือบมาจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 14 (ก)

2. การดึง (Start Up) เป็นขั้นตอนของการดึงวัสดุที่จุ่มเคลือบขึ้นจากสารละลาย โดยขณะดึงขึ้นควบคุมความเร็วในการดึงให้คงที่เพื่อให้สารละลายสามารถเกาะติดวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอดังรูปที่ 14 (ข)

3. การเกาะติด (Deposition) เป็นขั้นตอนที่ใช้พิจารณาความสามารถของสารละลายว่าสามารถเกาะติดกับพื้นผิวของวัสดุได้หรือไม่ ถ้าสารละลายไม่สามารถเกาะติดกับผิววัสดุได้ สารละลายจะไหลออกจากผิววัสดุทำให้การเคลือบผิววัสดุเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ดังรูปที่ 14 (ค)

4. การระเหย (Evaporation) เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารละลายที่เกาะติดอยู่ที่พื้นผิววัสดุมีลักษณะคล้ายกับเจลเนื่องจากการระเหยสารละลายบางส่วนออกไปทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 14 (ง)

5. การระบายทิ้ง (Drainage) เป็นขั้นตอนการกำจัดสารละลายส่วนเกินออกไปโดยการปล่อยให้สารละลายไหลออกจากผิววัสดุซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกที่จะทำให้สารละลายบางส่วนออกจากวัสดุรวมทั้งยังทำให้สารละลายที่เคลือบบนผิววัสดุมีความบางมากขึ้น



ภาพประกอบ 14 แสดงขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่ม [23]

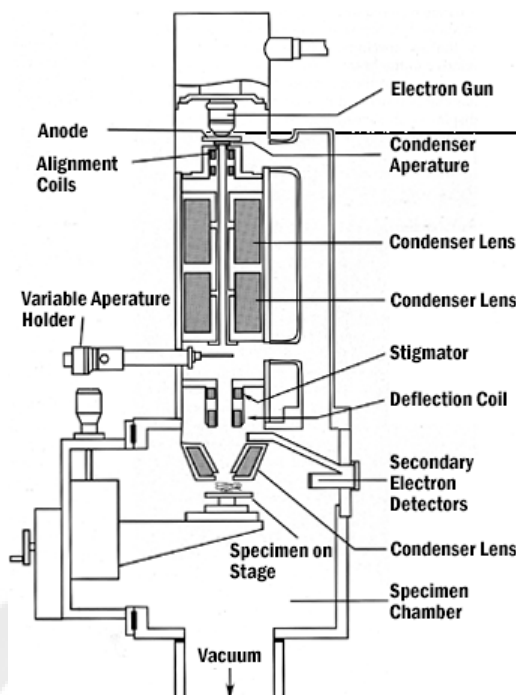
## 9. หลักการทำงานของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผล

### 9.1 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope :FESEM)[24]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของอนุภาคและลักษณะการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาคโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ดังรูปที่ 15

FESEM สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้

นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ( Electron Backscatter Diffraction; EBSD) เชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลายขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam - Lithography)



ภาพประกอบ 15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FESEM[25]

FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีความละเอียดสูงถึง 1.2 นาโนเมตรที่ 30 กิโลโวลต์ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 กิโลโวลต์ง่ายต่อการใช้งานเพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์สัญญาณภาพที่ได้จาก FESEM แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้จากหัววัดที่ต่างกัน ได้แก่

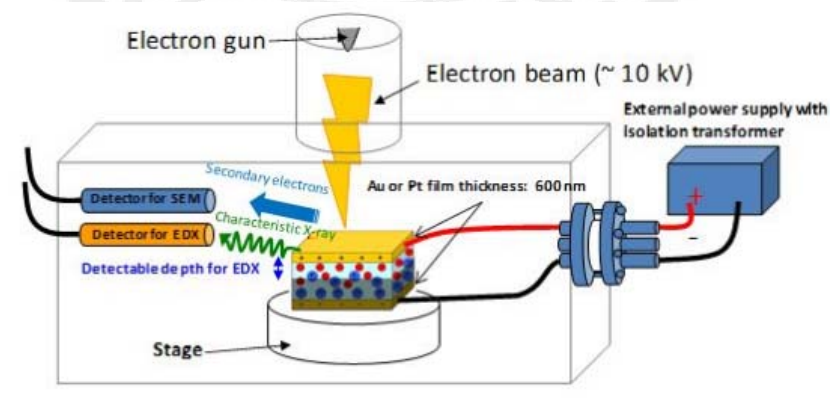
1. ภาพของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จากการรับเอาพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงานเมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนมาประมวลผลภาพที่ได้แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 กิโลโวลต์ตามประเภทของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึงประมาณ 1,000,000 เท่า ภายใต้สภาวะการใช้งานที่เหมาะสมโดยทั่วไปการใช้งานปกติมักจะได้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่าและยังสามารถเลือกโหมดป้องกันการสะสมของประจุบนชิ้นงานโดยใส่ความต่างศักย์ไปยังชิ้นงานเพื่อไล่ประจุสะสม

2. ภาพการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอน (Backscattered Electron Image; BEI) เป็นสัญญาณภาพที่เกิดจากอิเล็กตรอนสะท้อนกลับจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผลโดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณจะแปรตามเลขอะตอม (atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้นๆ ภาพที่ได้จึงมีความสว่าง เข้มหรืออ่อนตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร BEIจึงสามารถแสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้

3. ภาพการส่งผ่านของอิเล็กตรอน (Transmission Electron Image; TEI) เป็นสัญญาณภาพที่วัดได้จากการส่งผ่านของอิเล็กตรอนโดยอาศัยหลักการของการส่งผ่านอิเล็กตรอนมาติดตั้งในระบบของ FESEM ศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ตั้งไว้สำหรับระบบนี้เป็นค่าสูงสุดคือ 30 กิโลโวลต์สามารถเพิ่มกำลังขยายได้ถึงประมาณ 300,000 เท่า

## 9.2 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:EDS)[26]

เครื่องอิเล็กตรอนแบบกระจายพลังงานโดยทั่วไปติดตั้งคู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง โดย EDX เป็นเทคนิคในระดับจุลภาค ที่มีพื้นฐานมาจากลักษณะเฉพาะของอิเล็กตรอน ก่อให้เกิดยอดคลื่นเมื่อลำของอิเล็กตรอนพลังงานสูงไปกระทบกับตัวอย่าง เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดจะให้ลายพิมพ์ของสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงสามารถใช้ระบุชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ความหนาแน่นของยอดสเปกตรัมสามารถใช้หาความเข้มข้นของธาตุแต่ละชนิดในตัวอย่างได้ สัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกตรวจจับโดย หัววัดซิลิกอน ลิเทียม (Silicon-Lithium) ในการให้มีประสิทธิภาพต้องตั้งค่าหัววัดในระดับต่ำกว่าเลขอะตอมของธาตุที่จะนำมาตรวจวัด โดยทั่วไปธาตุที่หนักกว่าคาร์บอน ( $Z=6$ ) จะสามารถตรวจวัดได้ รูปที่ 16 แสดงผลจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงตกกระทบพื้นผิวของสารตัวอย่าง



ภาพประกอบ 16 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโดยใช้กล้อง SEM-EDX [27]

หลักการการทำงานของเครื่อง เมื่ออิเล็กตรอนชนกับตัวอย่างจะเกิดการถ่ายเทพลังงานทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมมีพลังงานสูงขึ้น หากพลังงานนั้นมากพอจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสได้ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนในระดับ

พลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า รังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 17



ภาพประกอบ 17 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน[28]

เมื่อนำห้วงวัดความเข้มและพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้น แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ก็ได้สเปกตรัมการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ การแยกชนิดของธาตุต่างๆ สามารถทำได้ด้วยการพิจารณาค่าพลังงานของพีคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แล้วระบุค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นเป็นธาตุชนิดใด เพราะว่าในแต่ละค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ในแต่ละธาตุมีค่าพลังงานที่แน่นอน

9.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

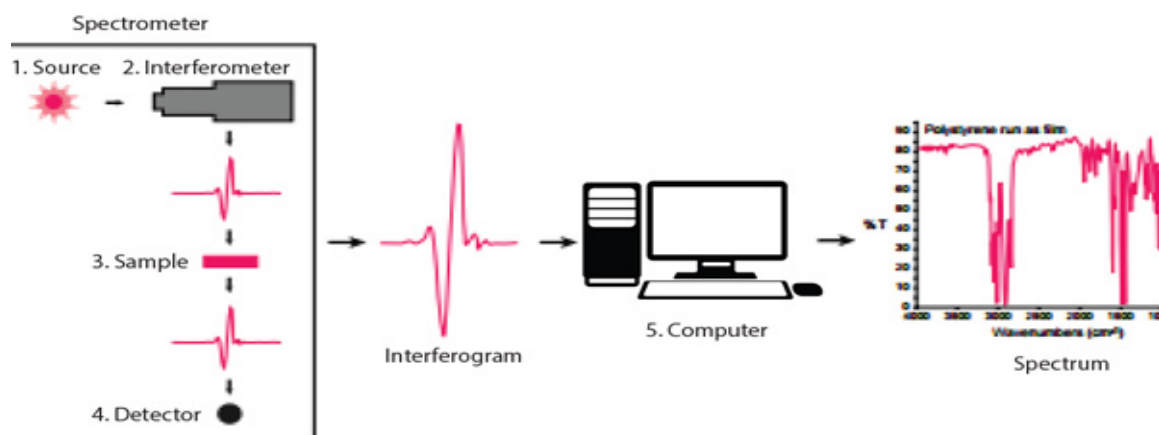
ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปเป็นหนึ่งเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic (IR) ที่ใช้ในการจำแนกประเภทสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์พันธะเคมี และองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด การวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR มีความรวดเร็วและระยะเวลาในการทดสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ ตัวอย่างที่วิเคราะห์ไม่ถูกทำลาย IR เป็นหนึ่งในเทคนิค Spectroscopic ทั่วไปที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์และเคมีอนินทรีย์โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตัวอย่างที่คลื่นความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ หรือเปรียบเสมือนเป็นลายพิมพ์โมเลกุลสามารถแบ่งแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ Dispersive Infrared Spectroscopy และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy การดูดกลืนรังสีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่

ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายออกมายังโมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดทั้งสังเกตได้ จะมีค่าไม่เท่ากับการสันมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลงทั้งนี้เพราะจะมีแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด

หลักการการทำงานของเครื่องรังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยังอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) ซึ่งตัวที่นิยมใช้คือ Michelson Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตั้งอยู่อยู่กับที่โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง โดยส่วนใหญ่ทำมาจากการนำฟิล์มบางของเจอร์มาเนียมวางลงบน KBr ที่ตัวแยกแสงลำสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตั้งอยู่อยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกรวมตัวกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด

Path Difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพันธ์ระหว่างกระจกทั้งสอง ถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีความยาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองจะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากันมีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง  $\lambda/4$  ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น  $\lambda/2$  รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก  $\lambda/4$  ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น  $\lambda$  รังสีทั้งสองจะกลับมามีเฟสตรงกันอีกครั้ง

เมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ด้วยความเร็วคงที่ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัด วัดได้จะมีลักษณะของอินเตอร์เฟอโรแกรม (Interferogram) ซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์ (sine) โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่มีค่าความถี่ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผล ผลที่ได้ขึ้นกับเวลาให้กลายเป็นค่าความถี่และความเข้ม



ภาพประกอบ 17 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์[29]

#### 9.4 การวิเคราะห์ด้วยยูวี-วิส สเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy) [30]

เครื่องยูวี-วิส (UV-Vis Spectroscopy) ใช้หลักการการดูดกลืนแสงของสารประกอบในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร และแสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

เมื่อแสงเคลื่อนที่ไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนสามารถผ่านตัวอย่างออกไป แสงที่ถูกดูดกลืนจะไปกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น (Ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited state) การวิเคราะห์ที่ใช้กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ในการวัดปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืน ซึ่งกล่าวได้ว่ารังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (Parallel beam) และเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ค่าการดูดกลืนของแสง (Absorbance) จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่างและระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่างสามารถเขียนเป็นรูปสมการได้ดังต่อไปนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon b C \quad (22)$$

เมื่อ **A** คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

**$I_0$**  คือ ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (Intensity of Incident Light)

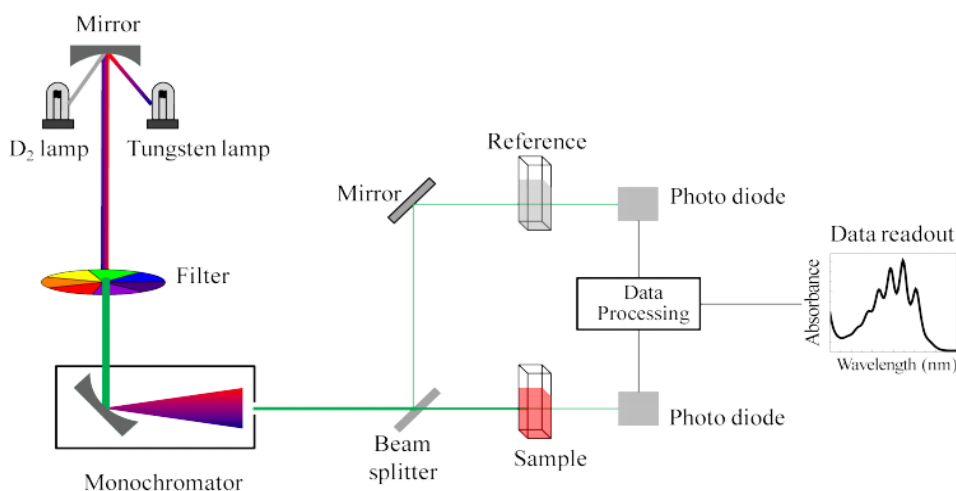
**$I$**  คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (Intensity of Transmitted Light)

**b** คือ ความหนาแน่นของสารละลาย หรือระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (cm)

**C** คือ คือความเข้มข้นของตัวอย่าง (mol/L)

**$\epsilon$**  คือ Molar absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง

## ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์



ภาพประกอบ 18 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์[31]

เครื่องยูวี-วิสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

### 1. แหล่งกำเนิดรังสี(Source)

ก. หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360nm มีทั้งประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 โวลต์) และประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำประมาณ 40 โวลต์ หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มข้นสูงถึงความยาวคลื่นประมาณ 360 นาโนเมตรหลังจากนั้นความเข้มข้นของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ข. หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนซึ่งอยู่ในหลอดสุญญากาศให้รังสีที่มีความยาวคลื่น ตั้งแต่ช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตใกล้ช่วงที่ตามองเห็น จนถึงช่วงรังสีอินฟราเรด

2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของยูวี-วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว ในช่วงที่ตามองเห็นอาจใช้ปริซึมแก้วช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์ สำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีราคาแพง มักใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ diffraction grating ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีร่องเป็นจำนวนมากและมีความกว้างของร่องที่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นรังสี

3. อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Recorder) หลังจากทีลำรังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารที่ต้องการวัดการดูดกลืนแล้วจะไปตกที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งให้ข้อมูลการดูดกลืน สำหรับยูวี-วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ราคาถูก ข้อมูลนี้จะปรากฏออกมาในรูปแบบของการเบนเข็มบนหน้าปัดมิเตอร์ หรืออาจจะปรากฏแบบตัวเลข ต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้สำหรับแต่ละช่วงความยาวคลื่นในกระดาษ

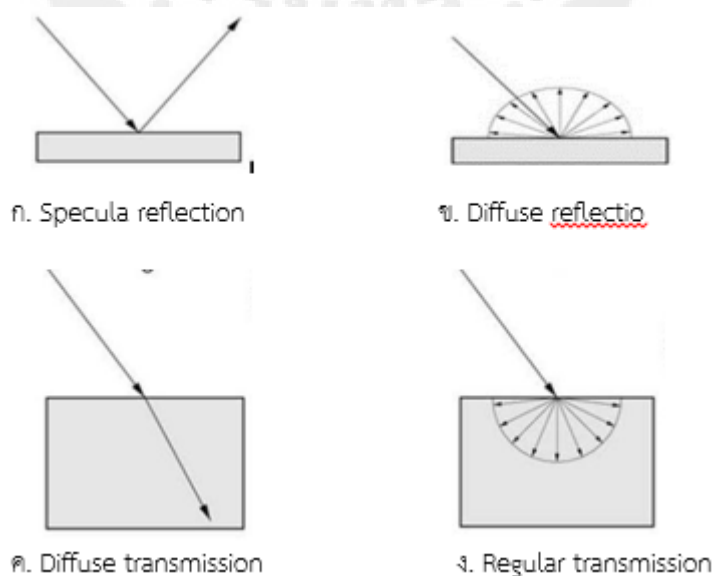
กราฟ เส้นที่เชื่อมจุดต่างๆ ก็คือสเปกตรัม สำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นเองโดยอัตโนมัติจะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอยู่ด้วยสามารถบันทึกออกมาเป็นสเปกตรัมได้โดยตรง

4. เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง (Cell compartment) เนื่องจากแก้วธรรมดาดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต จึงต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยควอตซ์ เซลล์ที่ใช้มีความหนา 1.00 เซนติเมตร เซลล์เป็นวัสดุที่ทำจากวัสดุ Optical glass ใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 300 นาโนเมตร ส่วนเซลล์ที่ทำจากพลาสติกใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 350 นาโนเมตรขึ้นไปและเซลล์ที่ทำจากควอตซ์สามารถใช้ได้ตลอดช่วงที่ตามองเห็น

5. เครื่องวัดแสง (Detector) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงที่ตกกระทบผิวหน้าที่มีคุณสมบัติเป็น Semi-Conductivity ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าเป็นส่วนที่ทำการวัดแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง

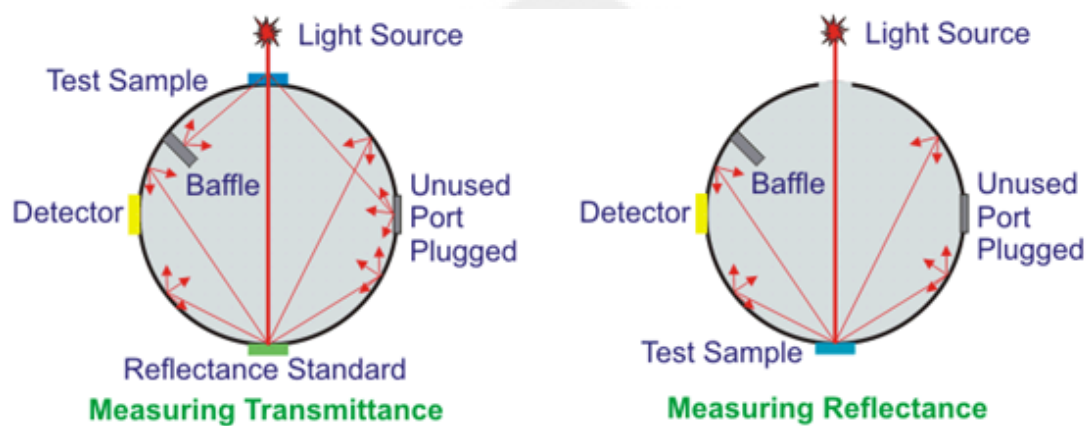
การใช้งานอินทิเกรตติงสเฟียร์ร่วมกับเครื่องยูวี-วิสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [32]

ในวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวและสีที่แตกต่างกันย่อมเกิดจากการสะท้อน การส่องผ่านและการดูดกลืนของแสงที่แตกต่างกันออกไป วัตถุที่ทึบแสงที่ลักษณะของผิวมีความมันเงาจะมีการสะท้อนของแสงเสมือนจริง (Specular reflection) โดยลักษณะการสะท้อนของแสงที่มีมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบเมื่อเทียบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวของวัตถุ หากลักษณะพื้นผิวของวัตถุไม่เรียบและไม่มีความเงา มันเมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปกระทบวัตถุจะเกิดการกระเจิงของแสง ซึ่งเรียกการสะท้อนของแสงนี้ว่า การสะท้อนการกระจายแสง (Diffuse reflection) ส่วนวัตถุโปร่งแสงจะเกิดการกระเจิงของแสงที่ส่งผ่านที่เรียกว่า การส่องผ่านแสงการกระจาย (Diffuse transmission) แต่หากวัตถุมีความโปร่งใสจะเกิดการส่องผ่านทะลุวัตถุ ซึ่งเรียกว่า การส่องผ่านปกติ (Regular transmission) ดังรูปที่ 19



ภาพประกอบ 19 ปรัชญาการณของแสงที่เกิดขึ้นบนผิววัตถุ ก.วัตถุที่ทึบแสงผิวมัน ข.วัตถุที่ทึบแสงผิวขรุขระ ค.วัตถุโปร่งแสง ง.วัตถุโปร่งใส

แสงสามารถวัดออกมาเป็นร้อยละของการสะท้อนหรือการส่งผ่านด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ผลของการวัดอาจคลาดเคลื่อนเล็กน้อยสาเหตุมาจากวัตถุเองจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนและการหักเหของลำแสงที่ตกกระทบตัวรับสัญญาณในตำแหน่งที่ต่างกันและเพิ่มจำนวนหักเหของแสงในระบบทำให้ค่าสัญญาณที่ได้ไม่ใช่ค่าการสะท้อนหรือการส่งผ่านที่เพียงอย่างเดียว การใช้ Integrating sphere เป็นวิธีการที่จะหลีกเลี่ยง Systematic error ที่เกิดจากการสะท้อนหรือการกระเจิงของวัตถุ Integrating sphere เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการสะท้อนและการส่งผ่านของแสง ซึ่งลักษณะภายในเป็นทรงกลมเคลือบด้วยวัสดุที่มีสีขาวเพื่อให้เกิดการกระจายของแสงมากที่สุดมีช่องเปิดให้แสงสามารถผ่านเข้าและออกได้ ดังรูปที่ 20



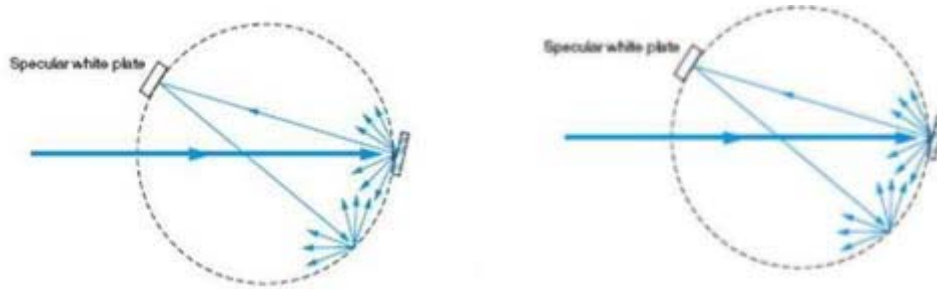
ภาพประกอบ 20 การวัดการส่งผ่านและการสะท้อนของแสงด้วย Integrating sphere [33]

การวัดการสะท้อนแสงโดยใช้ Integrating sphere การวัดการสะท้อนแสงของวัตถุโดยปราศจากผลของความมันและลักษณะของพื้นผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง ค่าสะท้อนของแสงที่ได้จะวัดออกมาในรูปแบบร้อยละของการสะท้อน (% reflectance) วิธีการใช้ Integrating sphere ในการวัดการสะท้อนของแสงมี 2 แบบ คือ

1. การวัดแบบ Specular excluded mode คือการวัดการสะท้อนแสงแบบ Diffuse อย่างเดียว การสะท้อนเหมือนจริงจะถูกแยกออกด้วย Specular light trap หรือ Gloss trap ซึ่งเป็นช่อง Port ไว้สำหรับให้แสงเหมือนจริงออกดังรูปที่ 24 (ก).

เนื่องจากขนาดของช่องถูกจำกัดด้วยขนาดของเครื่องมือ ถ้าทำการวัดพื้นผิววัตถุที่มีความมันสูงแสง Specular จะออกไปทางช่องได้ทั้งหมด ถ้าทำการวัดพื้นผิวที่มีความมันปานกลางและความมันต่ำหรือพื้นผิวที่มีความหยาบจะทำให้แสง Specular มีมุมโตกว่าตำแหน่งของช่อง ดังนั้นจึงมีแสง Specular เล็กน้อยที่เข้ามารวมอยู่ด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2. การวัดแบบ Specular included mode คือการวัดการสะท้อนแสงทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยการสะท้อนแบบการกระจายและการสะท้อนแบบเสมือนจริง ดังนั้นการวัดการสะท้อนแสงแบบนี้จะไม่ใช้ Specular light trap ดังรูปที่ 21(ข)การวัดแบบนี้เป็นการหลีกเลี่ยงผลของลักษณะพื้นผิวของวัตถุ เช่น ความมัน ความหยาบและลวดลาย



ก. Specular excluded mode      ข. Specular included mode

ภาพประกอบ 21 การวัดการสะท้อนแสงแบบก. Specular excluded mode และ ข. Specular included mode [34]

การวัดการส่งผ่านของแสงโดยใช้ Integrating sphere

ใช้ในการวัดการส่งผ่านของแสงและวัดสีในของแข็งที่โปร่งแสงเช่นแก้ว พลาสติก โดยจะวัดออกมาในรูปของ total transmittance หรือ regulartransmittance ซึ่งเป็นแสงที่ส่งผ่านวัตถุออกไปตรงๆเท่านั้น ส่วน diffuse transmittance เป็นการส่งผ่านของแสงแบบกระเจิงทำให้สีของวัตถุกลายเป็นสีด้านหรือสีมัว (Haze) จึงใช้ในการวัดความดำมัน Integrating sphere สามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้แก่ การวัดค่าการสะท้อนแสงของซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) วัดการส่งผ่านของแสงในกระจกประหยัดพลังงานและโซลาร์เซลล์ วัดสีของวัสดุต่างๆ ทั้งที่เป็นของแข็งและเป็นผงเช่นแก้ว พลาสติก สิ่งทอ เซรามิกส์ เม็ดสี

## 10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

10.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2004 ลิเลียนาและโจเซฟ [35] ได้ศึกษาคุณสมบัติของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซลเจลและจุ่มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า การเตรียมฟิล์มที่บางหรือหนาจะขึ้นกับจำนวนครั้งการจุ่มเคลือบ ผลการทดลองพบว่าการจุ่มเคลือบครั้งแรกฟิล์มบางมีความหนา 88 นาโนเมตรและทำการจุ่มเคลือบทั้งหมด 3 ครั้งฟิล์มที่ได้มีความหนา 201 นาโนเมตรจากนั้นวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงได้ในช่วง 280-300 นาโนเมตรและจาก

ผลการทดลองสรุปได้ว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้ามีความหนามากขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงได้มากยิ่งขึ้น

10.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

ในปี ค.ศ 2008 ชาง ยู ชินและคณะ [36] ได้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)และเวลาที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดเซชันต่อการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโดยเริ่มจากการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมที่มีความหนา 700-900 นาโนเมตร บนกระจกด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) จากนั้นได้สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10-20 โวลต์กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.25 ถึง 1 โดยปริมาตรและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดเซชัน 60 นาที จากผลการทดลองแสดงว่าจะสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกได้ในเงื่อนไขดังนี้ เมื่อให้ความต่างศักย์ในกระบวนการแอนโนไดเซชันเท่ากับ 10-20 โวลต์จะใช้กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรและเมื่อความต่างศักย์ในกระบวนการแอนโนไดเซชัน 10 โวลต์ ใช้กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ถึง 1.0 โดยปริมาตร

ในปี ค.ศ 2008 ยูชิน ชางและคณะ [37] ได้ศึกษาวิธีการเตรียมและการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเริ่มจากการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (radio frequency- magnetron sputtering; RFMS) ใช้ความดันอาร์กอน (Ar) 0.5 ปาสคาล กำลัง 150 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันโดยใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ความเข้มข้น 0.5 โดยปริมาตร ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมงผลการทดลองพบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีความหนา 700-900 นาโนเมตรเมื่อแอนโนไดเซชันฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้าพบว่าเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความยาวประมาณ 750-1100 นาโนเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 50-75 นาโนเมตร

ในปี ค.ศ 2008 เอบู เซกค์และคณะ [38] ได้ศึกษากระบวนการแอนโนไดเซชันฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้าโดยเตรียมฟิล์มไทเทเนียมด้วยกระบวนการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล มีความเข้มข้น 0.5 โดยปริมาตร เวลาที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดเซชัน คือ 5 10 45 และ 80 นาที ซึ่งผลการ

ทดลองแสดงว่า เมื่อให้ความต่างศักย์ 5-20 โวลต์ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดเซชันที่เวลา 5 นาทีและ 10 นาที ไม่เกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้า แต่ที่เวลา 45 นาที เริ่มเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ยังไม่สม่ำเสมอ และที่เวลา 80 นาที เกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายเต็มแผ่นกระจกนำไฟฟ้า

10.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าพลังงานพื้นผิวของการเจือทองบนไทเทเนียมไดออกไซด์

ในปี ค.ศ 2004 เดเบลลา บาสาร์มาและคณะ [39] ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคทองคำที่เจือบนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล ผลการทดลองแสดงว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคทองคำจะมีค่าลดลงและยังพบว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองจะมีค่าลดลงมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังตารางที่ 4

ตาราง 4 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำที่เจือบนไทเทเนียมไดออกไซด์

	Band gap energy (eV)	
	Indirect ( $\pm 0.01$ )	Direct ( $\pm 0.03$ )
TiO <sub>2</sub>		
Dry TiO <sub>2</sub>	3.19	3.47
200 °C, O <sub>2</sub>	3.26	3.49
300 °C, O <sub>2</sub>	3.27	3.47
400 °C, O <sub>2</sub>	3.26	3.46
500 °C, O <sub>2</sub>	3.24	3.40
600 °C, O <sub>2</sub>	3.08	3.32
700 °C, O <sub>2</sub>	3.00	3.11
700 °C, Ar	2.96	3.11

ตาราง 4 (ต่อ)

	Band gap energy (eV)	
	Indirect ( $\pm 0.01$ )	Direct ( $\pm 0.03$ )
Commercial	3.23	3.42
Au- TiO <sub>2</sub>		
Dry Au-TiO <sub>2</sub>	3.18	3.47
200 °C, O <sub>2</sub>	3.21	3.45
300 °C, O <sub>2</sub>	3.19	3.45
400 °C, O <sub>2</sub>	3.18	3.44
500 °C, O <sub>2</sub>	3.13	3.39
600 °C, O <sub>2</sub>	3.07	3.37
700 °C, O <sub>2</sub>	2.90	3.25
700 °C, Ar	2.89	3.08

ในปี ค.ศ 2012 เมลินและคณะ [40] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคทองคำที่ส่งผลต่อค่าช่องว่างพลังงาน โดย TA 1 คือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับทองคำที่มีขนาดอนุภาค 5 นาโนเมตร และ TA 2 คือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับทองคำที่มีขนาดอนุภาค 22 นาโนเมตร จากการทดลองพบว่าค่าช่องว่างพลังงานลดลงแสดงดังตารางที่ 5

ตาราง 5 แสดงค่าพื้นที่ผิว แถบช่องว่างพลังงานและอัตราการสลายตัว

Sample name	E <sub>g</sub> [eV]
TiO <sub>2</sub>	3
TA 1	2.86
TA 2	2.88

ในปี ค.ศ 2013 อ้นซาลิ ซาเจด และคณะ [41] ได้ศึกษาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคทองคำที่เจือบนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการการโซล-เจล ผลการทดลองแสดงว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของวัสดุประกอบ Au@TiO<sub>2</sub> มีค่า 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่มีค่าแถบช่องว่างบริสุทธิ์ 3.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังตารางที่ 6

ตาราง 6 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของวัสดุประกอบ Au@TiO<sub>2</sub> และไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

Sample	Band gap energy (E <sub>g</sub> , eV)
Au@TiO <sub>2</sub>	2.4
TiO <sub>2</sub> (P25)	3.1

ในปี ค.ศ 2013 กัลเทคิน เอแทค [42] ได้ศึกษาการเจืออนุภาคทองคำลงบนฟิล์มไทเทเนียมได-ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล มีสัดส่วน Au/Ti เท่ากับร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยอะตอม จากนั้นคำนวณค่าช่องว่างพลังงานตามทฤษฎีของ Kubelka และ Munk จากผลการทดลองแสดงว่าเมื่อเจือด้วยอนุภาคทองคำที่มีปริมาณมาก เป็นผลให้ค่าช่องว่างพลังงานเพิ่มมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 7

ตาราง 7 เปรียบเทียบค่าพลังงานพื้นผิวของอัตราส่วนการเจืออนุภาคทองคำต่อไทเทเนียม

Material	D (cm)	T@ 500 nm (%)	E <sub>g</sub> (eV)
Pure TiO <sub>2</sub>	132	78.8	3.74
10% Au dope TiO <sub>2</sub>	138	87.8	3.75
20% Au dope TiO <sub>2</sub>	144	88.4	3.78
30% Au dope TiO <sub>2</sub>	149	93.3	3.84
40% Au dope TiO <sub>2</sub>	154	67.2	3.86
50% Au dope TiO <sub>2</sub>	166	58.5	3.89

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า เพื่อศึกษาหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน โดยใช้กระบวนการโซล-เจล และใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสารเคมี	คุณสมบัติ
Titanium(IV)Butoxide	M = 340.32 g/mol
Ti(OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 1.00 \text{ g/cm}^3$
Aldrich	Reagent grade 97%
Ethanol	M = 46.07 g/mol
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 0.789 \text{ g/cm}^3$
Carlo Erba	Reagents grade 99.9%
Ethylene glycol	M = 62.07 g/mol
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	$\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 1.113 \text{ g/cm}^3$
Carlo Erba	Reagents grade 99.5%
Diethanolamine	M = 105.14 g/mol
HN(CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub>	$\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 1.097 \text{ g/cm}^3$
Aldrich	Reagent grade 97%
Gold colloidal	Colloidal Gold -20 nm
Kestrel Bio Science	
Distilled water	M = 18.02 g/mol pH = 6.9
H <sub>2</sub> O	$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 0.998 \text{ g/cm}^3$

### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 กระจกนำไฟฟ้า FTO ขนาด 2×2 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร
- 2.2 ปีกเกอร์
- 2.3 ขวดแก้วแบบมีฝาปิด
- 2.4 แท่งแก้วคนสาร
- 2.5 เครื่องอัลตราโซนิก
- 2.6 กล้องใส่ชิ้นตัวอย่างแบบสุญญากาศ
- 2.7 เตาอบ
- 2.8 เตาเผา
- 2.9 เครื่องกวนสารแม่เหล็กไฟฟ้า (Stirling)

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์งานวิจัย

- 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Scanning Electron Microscope)
- 3.2 การวิเคราะห์เชิงธาตุพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
- 3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy:FT-IR)
- 3.4 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy)

### 3.4 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

- 4.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 4.2 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 4.3 ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 4.4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- 4.5 ศูนย์เครื่องมือนวัตกรรม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 1. การเตรียมพื้นผิว

นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้า (FTO) มีขนาด 2×2 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร นำมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตนจากนั้นนำไปเป่าให้แห้งหลังจากนั้นเก็บชิ้นงานเข้าสู่กล้องสุญญากาศเพื่อป้องกันฝุ่นเกาะบนพื้นผิวกระจก

## 2. เตรียมโซล-เจล

เตรียมสารละลายทั้งหมด 50 มิลลิลิตรปริมาณสารมีสัดส่วนดังต่อไปนี้

2.1 เอทานอล 33.5 มิลลิลิตร ไดเอทานอลลาไมน์ 2.4 มิลลิลิตร และ Titanium (IV) butoxide 8.5 มิลลิลิตร จากนั้นกวนบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 120 นาที

2.2 เติมน้ำปราศจากไอออน 0.5 มิลลิเมตร เอทานอล 5 มิลลิลิตร และเอทิลีนไกลคอล

2.4 มิลลิลิตร จากนั้นกวนบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 120 นาที

2.3 เก็บโซล ที่ได้ใส่ลงในขวดแก้วปิดฝาให้มิดชิดเพื่อเข้าสู่กระบวนการจุ่มเคลือบต่อไป

## 4. การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำ

การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำด้วยกระบวนการโซล-เจล ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ มีรายละเอียดการสังเคราะห์ฟิล์มดังต่อไปนี้

4.1 นำโซลที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 2 ปริมาณ 10 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ ผสมกับอนุภาคนาโนคอลลอยด์ 1.7 มิลลิลิตร จากนั้นกวนบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 7 นาที

4.2 นำกระจกที่เตรียมไว้จุ่มเคลือบในโซล 3 วินาที ต่อ 1 รอบ ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นแบ่งชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

4.3 นำชิ้นงานออกจากเตาเผา เก็บชิ้นงานเข้าสู่กล่องสุญญากาศเพื่อรอทำการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงาน

## 5. การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ มีรายละเอียดการสังเคราะห์ฟิล์มดังต่อไปนี้

5.1 นำโซลที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 2 ปริมาณ 10 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นกวนบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 60 นาที

5.2 นำกระจกที่เตรียมไว้จุ่มเคลือบในโซล 3 วินาที ต่อ 1 รอบ ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นแบ่งชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

5.3 นำชิ้นงานออกจากเตาเผา เก็บชิ้นงานเข้าสู่กล่องสุญญากาศเพื่อรอทำการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงาน

6. การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ
- 6.1 นำชิ้นงานมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของพื้นผิวกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM) และหาความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์ด้วย (SEM)
  - 6.2 วิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานเชิงพลังงาน (EDX)
  - 6.3 วิเคราะห์พันธะทางเคมี โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ FT-IR

7. ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy:  $E_g$ )

เตรียมชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการจุ่มเคลือบมาวิเคราะห์หาค่าแถบช่องว่างพลังงานโดยใช้เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy) วัดที่อุณหภูมิห้องที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโน-เมตร



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

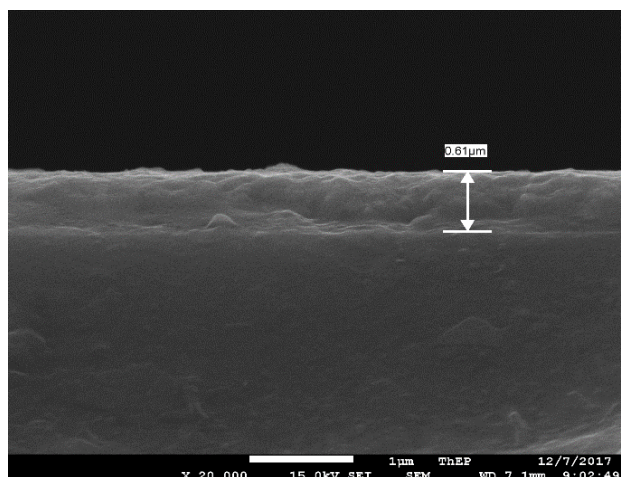
ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า(FTO) ด้วยกระบวนการโซลเจลและใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ นำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope: SEM) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน( Field Scanning Electron Microscope : FE-SEM) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy :FT-IR)แล้วนำมาวิเคราะห์การสะท้อนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy) เพื่อคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ

1. ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟูลอโรไรต์ที่เคลือบบนกระจก (FTO) ฟิล์มบางไทเทเนียมได-ออกไซด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค (FE-SEM)

วิเคราะห์ความหนาของฟิล์มดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟูลอโรไรต์ที่เคลือบบนกระจกด้วย (fe sem) ศึกษาผลจากการเตรียมฟิล์มบางฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าตามเงื่อนไขที่กำหนดนั้น ได้ผลการสังเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของกระจกนำไฟฟ้า FTO

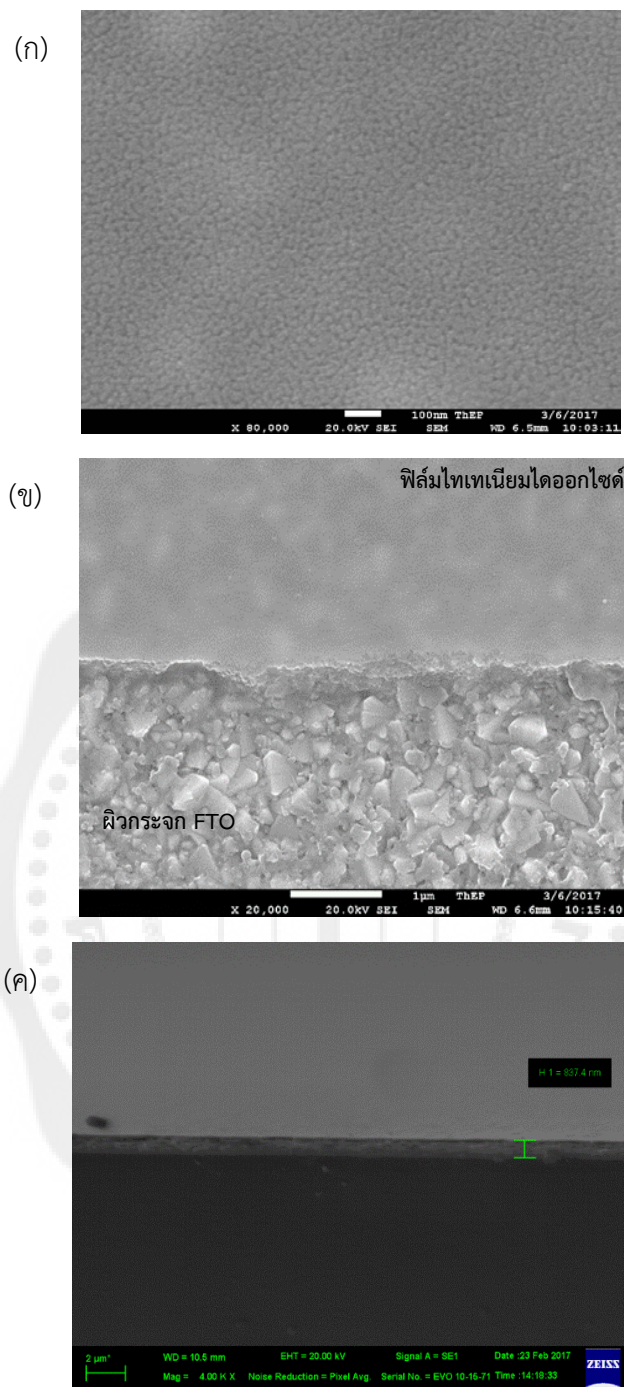
รูปที่ 22 แสดงลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟูลอโรไรต์เคลือบบนกระจกจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (FE-SEM) พบว่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟูลอโรไรต์มีความหนา 610 นาโนเมตร ความหนาของฟิล์มที่วัดได้มีความสม่ำเสมอ  
รูป



ภาพประกอบ 22 ความหนาของฟิล์มดีบุกออกไซด์เจ็ดด้วยฟูลออไรด์เคลือบบนกระจก

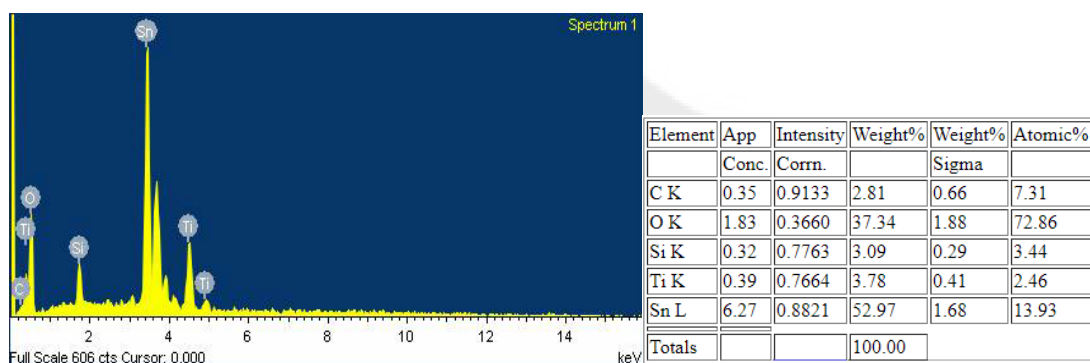
1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานและองค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

รูปที่ 23 แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าที่เผาที่ (ก) อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ข) แสดงพื้นผิวฟิล์มและพื้นผิวกระจกและ (ค) ฟิล์มมีความหนา 227.4 นาโนเมตร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความราบเรียบ และมีความหนาที่สม่ำเสมอตั้งรูป



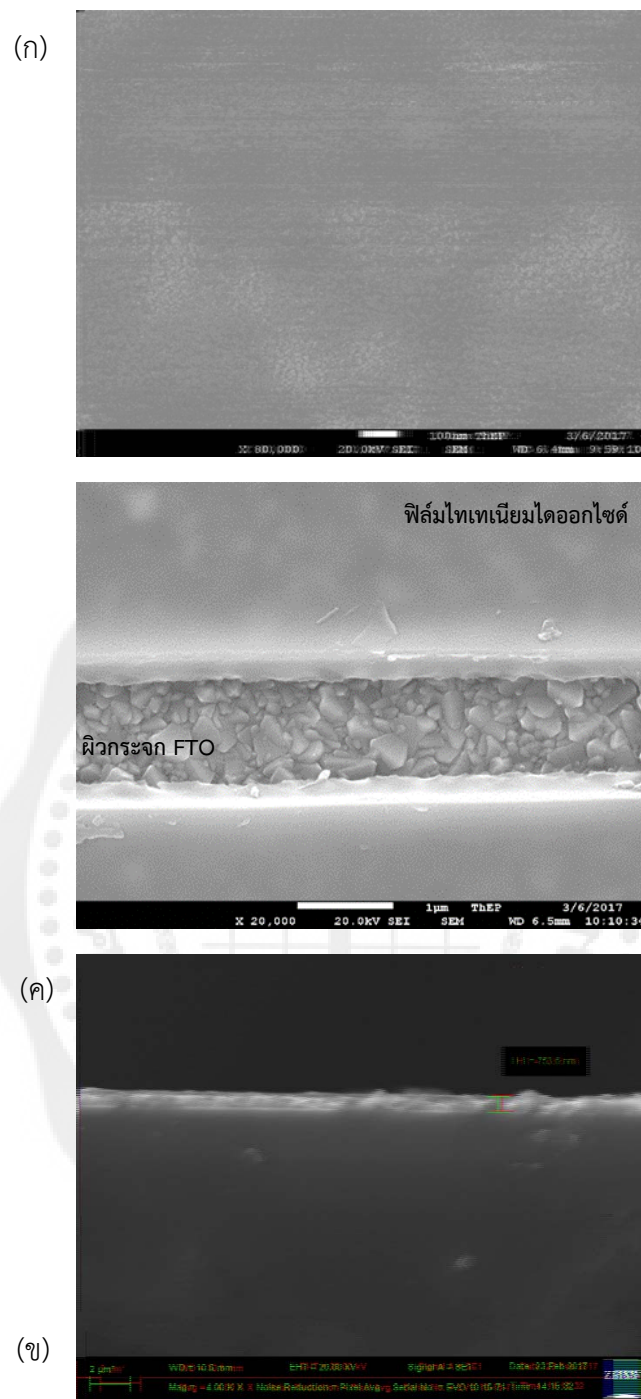
ภาพประกอบ 23 (ก) และ(ข) ภาพ FE-SEM ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า และ (ค) ภาพ SEM ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 24 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าประกอบด้วย ไทเทเนียม(Ti) ร้อยละ 3.78 โดยน้ำหนัก ออกซิเจน(O) ร้อยละ 37.34 โดยน้ำหนัก ซิลิกอน(Si) ร้อยละ 3.09 โดยน้ำหนัก คาร์บอน(C) ร้อยละ 2.81 โดยน้ำหนัก และดีบุก(Sn) ร้อยละ 52.97 โดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นดีบุกเนื่องจากพื้นผิวของกระจกเคลือบด้วยดีบุก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมได-ออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้มีความหนาไม่มาก



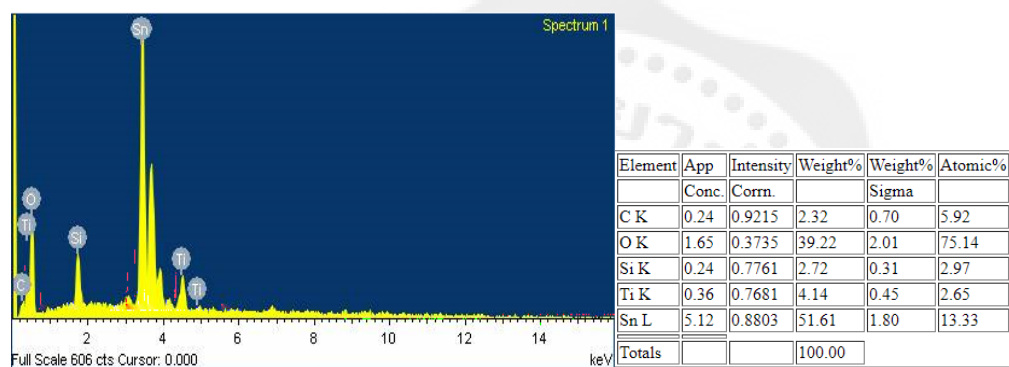
ภาพประกอบ 24 องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 25แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าที่เผาที่ (ก) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ข) แสดงพื้นผิวฟิล์มและพื้นผิวกระจกและ (ค) และฟิล์มมีความหนา 143.6 นาโนเมตรลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความราบเรียบและมีความหนาลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 25(ก) และ(ข) ภาพ FE-SEM ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า และ (ค) ภาพ SEM ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

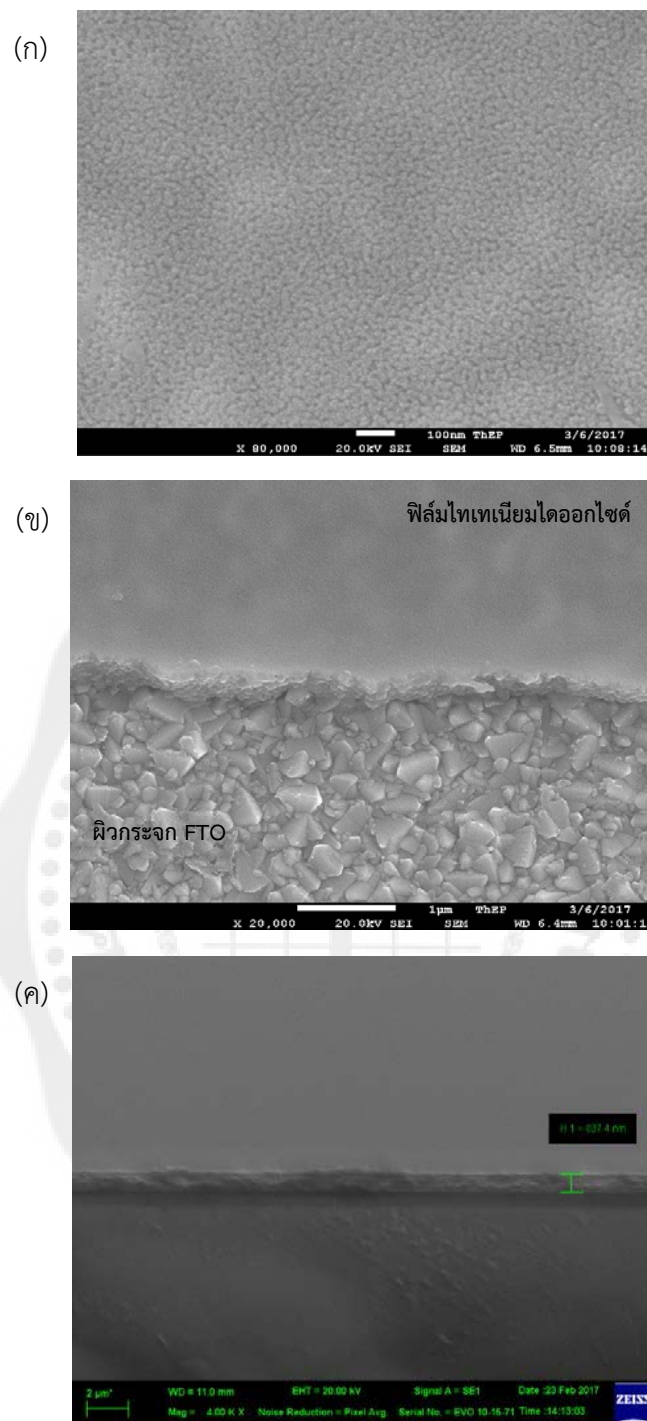
รูปที่ 26 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าประกอบด้วย ไทเทเนียม(Ti) ร้อยละ 4.14 โดยน้ำหนัก ออกซิเจน(O) ร้อยละ 39.22 โดยน้ำหนัก ซิลิกอน(Si) ร้อยละ 2.72 โดยน้ำหนัก คาร์บอน(C) ร้อยละ 2.32 โดยน้ำหนัก และดีบุก(Sn) ร้อยละ 51.61 โดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นดีบุกเนื่องจากพื้นผิวของกระจกเคลือบด้วยดีบุก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมได-ออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้มีความหนาไม่มาก



ภาพประกอบ 26 องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศา-เซลเซียส

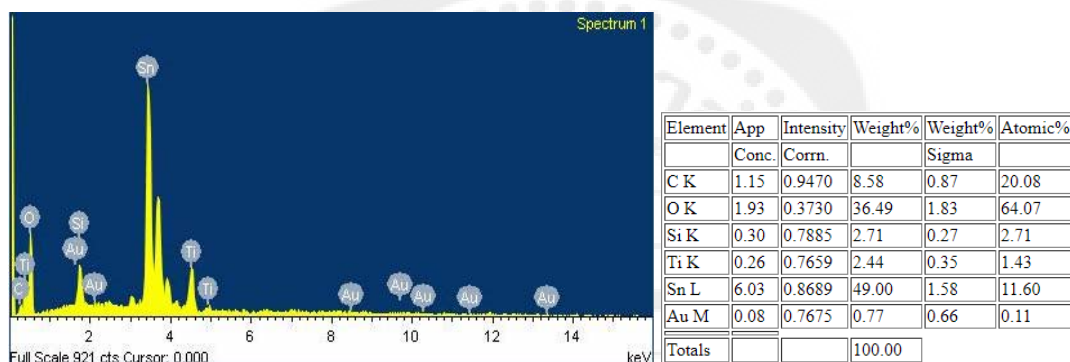
1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและองค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมได-ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

รูปที่ 27 แสดงลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าที่เผาที่ (ก) อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ข) แสดงพื้นผิวฟิล์มและพื้นผิวกระจกและ (ค) ฟิล์มมีความหนา 227.4 นาโนเมตร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความราบเรียบ และมีความหนาที่สม่ำเสมอดังรูป



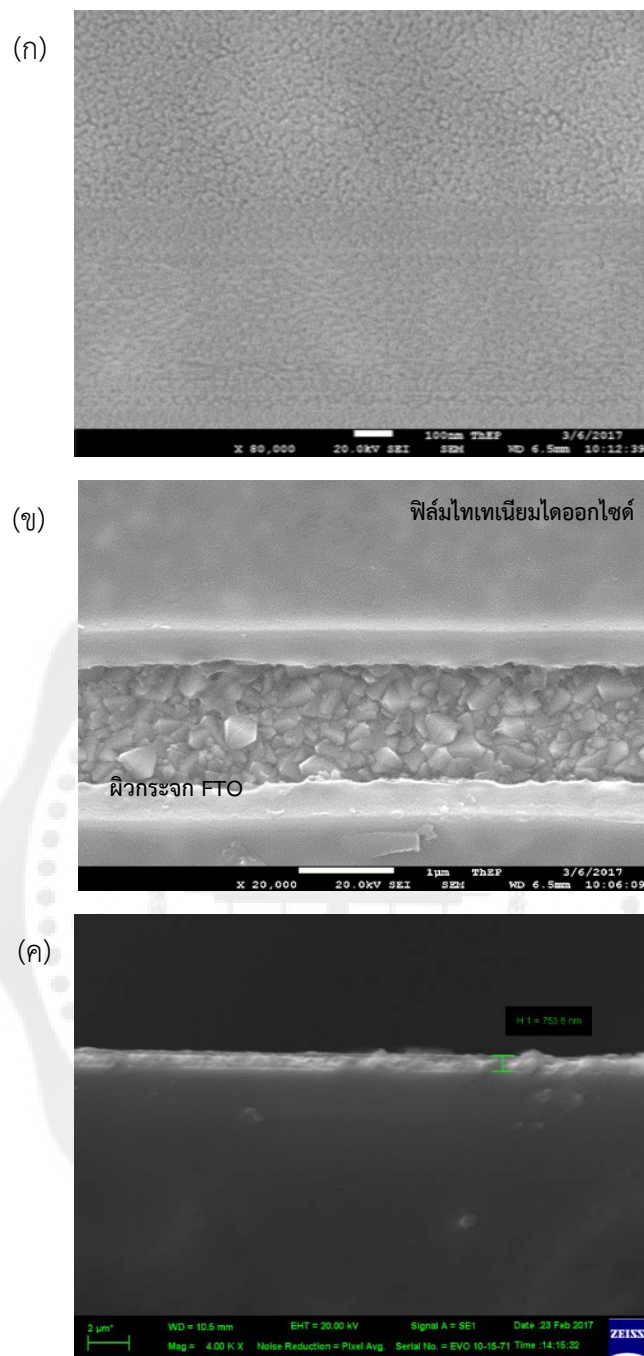
ภาพประกอบ 27(ก) และ(ข) ภาพ FE-SEM แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์  
 เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและ (ค) ภาพ  
 SEM แสดงความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจก  
 นำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 28 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าประกอบด้วย ไทเทเนียม(Ti) ร้อยละ 2.44 โดยน้ำหนัก ออกซิเจน(O) ร้อยละ 36.49 โดยน้ำหนัก ซิลิกอน(Si) ร้อยละ 2.71 โดยน้ำหนัก คาร์บอน(C) ร้อยละ 8.57 โดยน้ำหนัก อนุภาคทองคำ(Au) ร้อยละ 0.77โดยน้ำหนัก และดีบุก(Sn) ร้อยละ 49.00 โดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นดีบุกเนื่องจากพื้นผิวของกระจกเคลือบด้วยดีบุก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้มีความหนาไม่มาก และพบอนุภาคนาโนที่เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์



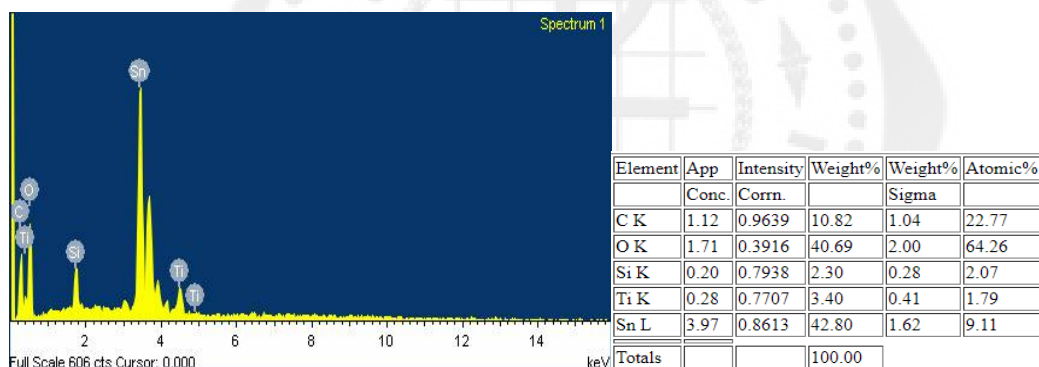
ภาพประกอบ 28 องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 29 แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าที่เผาที่ (ก) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ข) แสดงพื้นผิวฟิล์มและพื้นผิวกระจกและ (ค) ฟิล์มมีความหนา 143.6 นาโนเมตรลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้มีความราบเรียบและมีความหนาที่สม่ำเสมอ



ภาพประกอบ 29(ก) และ(ข) ภาพ FE-SEM ลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและ(ค) ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

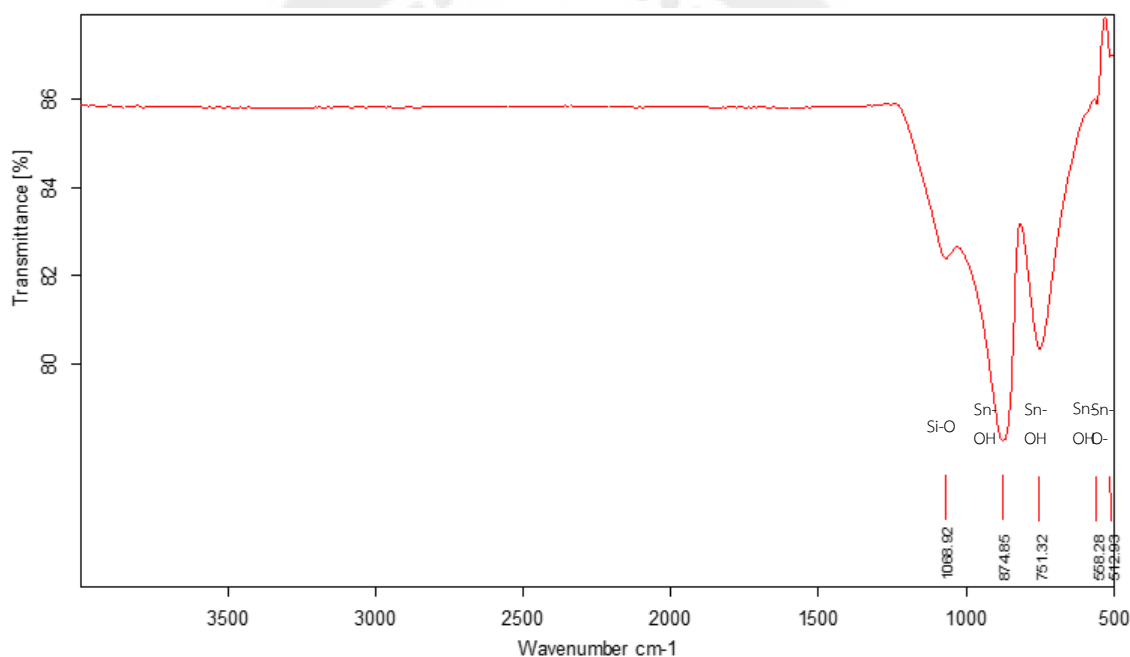
รูปที่ 30 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าประกอบด้วย ไทเทเนียม(Ti) ร้อยละ 3.40 โดยน้ำหนัก ออกซิเจน(O) ร้อยละ 40.69 โดยน้ำหนัก ซิลิกอน(Si) ร้อยละ 2.30 โดยน้ำหนัก คาร์บอน(C) ร้อยละ 10.82 โดยน้ำหนัก และดีบุก(Sn) ร้อยละ 42.80 โดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นดีบุกเนื่องจากพื้นผิวของกระจกเคลือบด้วยดีบุก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้มีความหนาไม่มาก และจากการวิเคราะห์ที่ไม่ปรากฏพีคของอนุภาคนาโนทองคำที่เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์เพราะอนุภาคนาโนทองคำที่เจือจะถูกหลอมที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากขนาดของอนุภาคทองคำนาโนที่มีขนาด 22 นาโนเมตร ซึ่งเป็นอนุภาคทองคำที่มีขนาดเล็กมาก[43]



ภาพประกอบ 30 องค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคทองคำนาโนบนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

2. ผลการศึกษาห่มู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมได-ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคทองคำนาโนบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FT-IR)

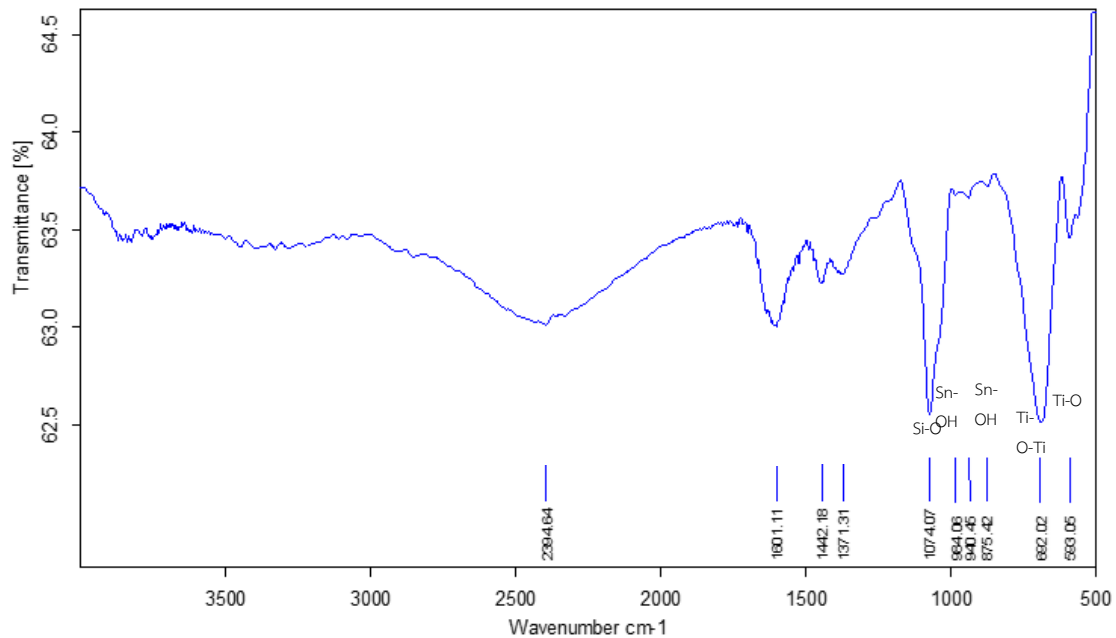
รูปที่ 31 แสดงสเปกตรัมของFT-IR ของกระจกนำไฟฟ้า FTO ทำการวิเคราะห์เลขคลื่น 500  $\text{cm}^{-1}$  - 3500  $\text{cm}^{-1}$  จากผลการทดลอง พบเลขคลื่นที่ 1068.92  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Si-O เลขคลื่นที่ 874.85  $\text{cm}^{-1}$  และ 751.32  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่นที่ 558.28  $\text{cm}^{-1}$  และ 512.93  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-O และ Sn-O-Sn ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยFT-IR ของกระจกนำไฟฟ้า FTOแสดงให้เห็นว่ามีฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เคลือบอยู่บนกระจก



ภาพประกอบ 31 สเปกตรัมFT-IR ของกระจกนำไฟฟ้า FTO

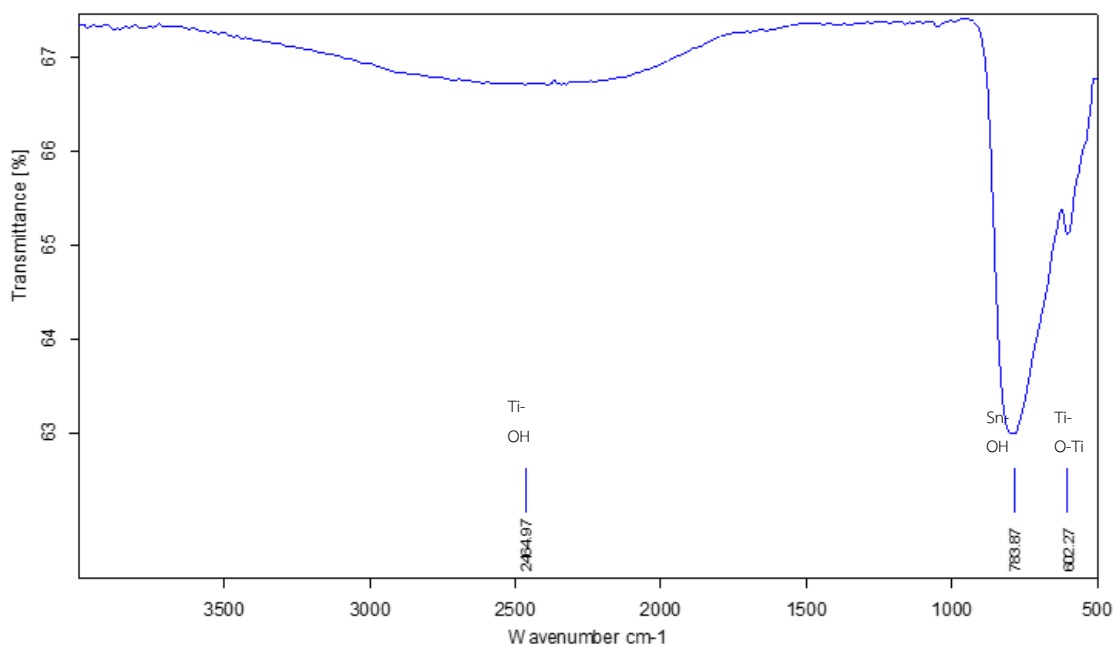
รูปที่ 32 แสดงสเปกตรัมของ FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า FTO เมาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสทำการวิเคราะห์เลขคลื่น 500  $\text{cm}^{-1}$  - 3500  $\text{cm}^{-1}$  จากผลการทดลอง เลขคลื่นที่ 2394.64  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค  $\text{CO}_2$  เลขคลื่นที่ 1601.12  $\text{cm}^{-1}$ , 1442.18  $\text{cm}^{-1}$  และ 751.32  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่นที่ 1074.07  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Si-O เลขคลื่น 940.45  $\text{cm}^{-1}$  และ 875.42  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่น 692.02  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-O-Ti เลขคลื่น 593.05  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-O เห็นได้

ว่าสเปกตรัมที่แสดงตามเลขคลื่นต่างๆแสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าได้



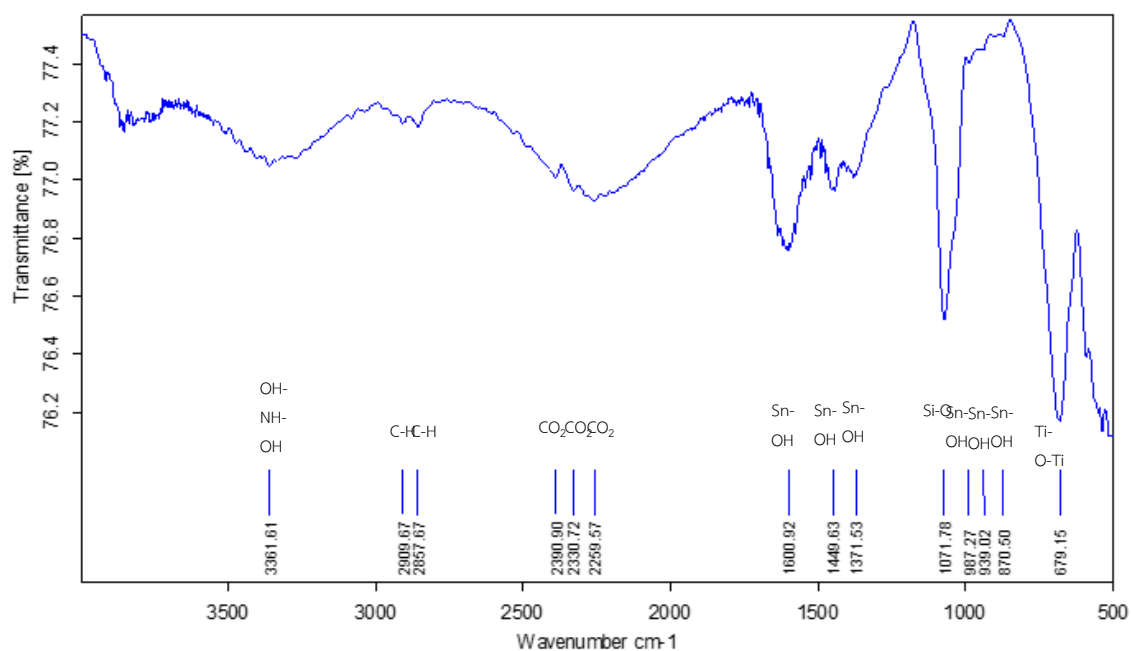
ภาพประกอบ 32 สเปกตรัม FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 33 แสดงสเปกตรัมของ FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า FTO เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสทำการวิเคราะห์เลขคลื่น  $500\text{ cm}^{-1}$  -  $3500\text{ cm}^{-1}$  จากผลการทดลองเลขคลื่นที่  $2464.97\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-OH ของไทเทเนียมที่มีโครงสร้างแบบอะนาเทส เลขคลื่นที่  $783.87\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่นที่  $602.27$  แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-O-Ti แสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ได้โดยการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



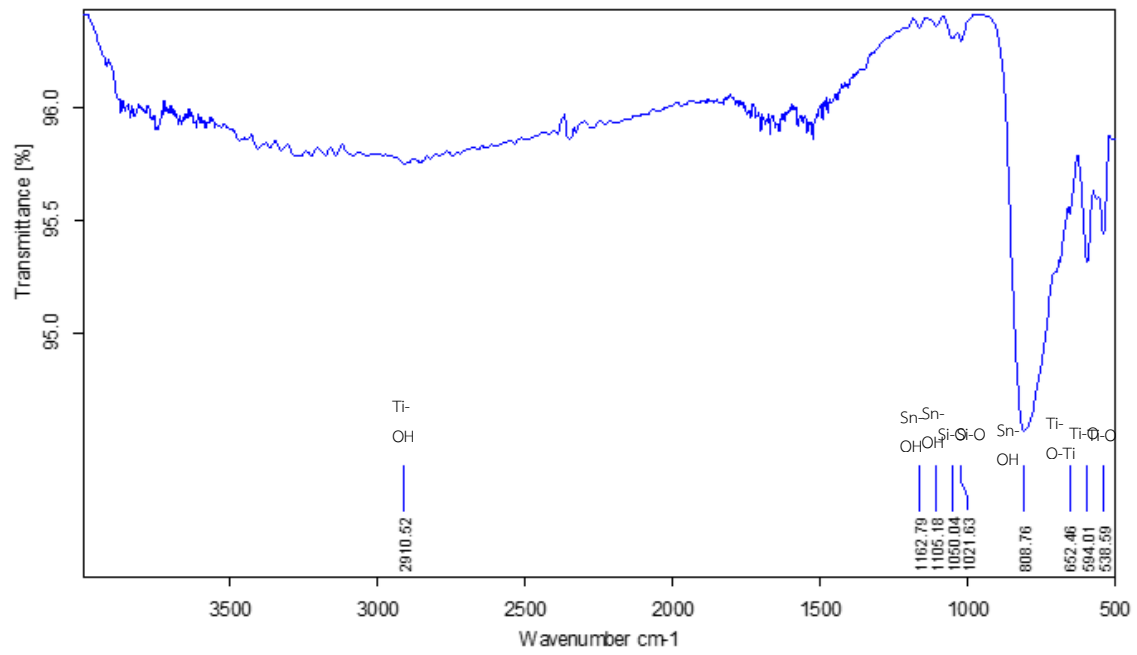
ภาพประกอบ 33 สเปกตรัม FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

รูปที่ 34 แสดงสเปกตรัมของ FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโน ทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า FTO เผาทีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสทำการวิเคราะห์เลขคลื่น 500 cm<sup>-1</sup>-3500 cm<sup>-1</sup> จากผลการทดลอง พบว่า เลขคลื่นที่ 3361.61 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค OH-NH-OH ซึ่งเป็นพันธะของสารประกอบอนุภาคนาโนทองคำ เลขคลื่นที่ 2857.67 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค C-H stretching เลขคลื่นที่ 2390.91 cm<sup>-1</sup>, 2330.72 cm<sup>-1</sup> และ 2259.57 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค CO<sub>2</sub> เลขคลื่นที่ 1600.92 cm<sup>-1</sup>, 1449.63 cm<sup>-1</sup> และ 1371.53 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่นที่ 1071.78 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Si-O เลขคลื่นที่ 987.27 cm<sup>-1</sup>, 939.02 cm<sup>-1</sup> และ 870.49 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่น 679.15 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-O-Ti เลขคลื่น 589.76 cm<sup>-1</sup>, 548.14 cm<sup>-1</sup> และ 535.39 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-O จากสเปกตรัมที่ แสดงให้เห็นได้ว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำได้โดยมี สัญญาณเลขคลื่นที่ 3361.61 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงการสั่นของ OH-NH-OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันประกอบของ อนุภาคทองคำนาโน



ภาพประกอบ 34 สเปกตรัม FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคทองคำนาโนบนกระจกนำไฟฟ้าเผาทีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 35 แสดงสเปกตรัมของ FT-IR ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำบนกระจกนำไฟฟ้า FTO เผาทีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสทำการวิเคราะห์เลขคลื่น 500 cm<sup>-1</sup>-3500 cm<sup>-1</sup> จากผลการทดลอง พบ เลขคลื่นที่ 2910.52 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-OH เลขคลื่นที่ 1162.79 cm<sup>-1</sup> และ 1105.18 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Sn-OH เลขคลื่นที่ 2390.91 cm<sup>-1</sup>, 2330.72 cm<sup>-1</sup> และ 2259.57 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค CO<sub>2</sub> เลขคลื่นที่ 1050.04 cm<sup>-1</sup> และ 1021.63 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Si-OH เลขคลื่นที่ 808.76 cm<sup>-1</sup>, 594.01 cm<sup>-1</sup> และ 538.59 cm<sup>-1</sup> แสดงการสั่นของอนุภาค Ti-O จากสเปกตรัมที่แสดงให้เห็นได้ว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำเผาทีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏพีกสัญญาณการสั่นของอนุภาคนาโนทองคำที่แสดงการสั่นของ OH-NH-OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันประกอบของอนุภาคทองคำนาโน



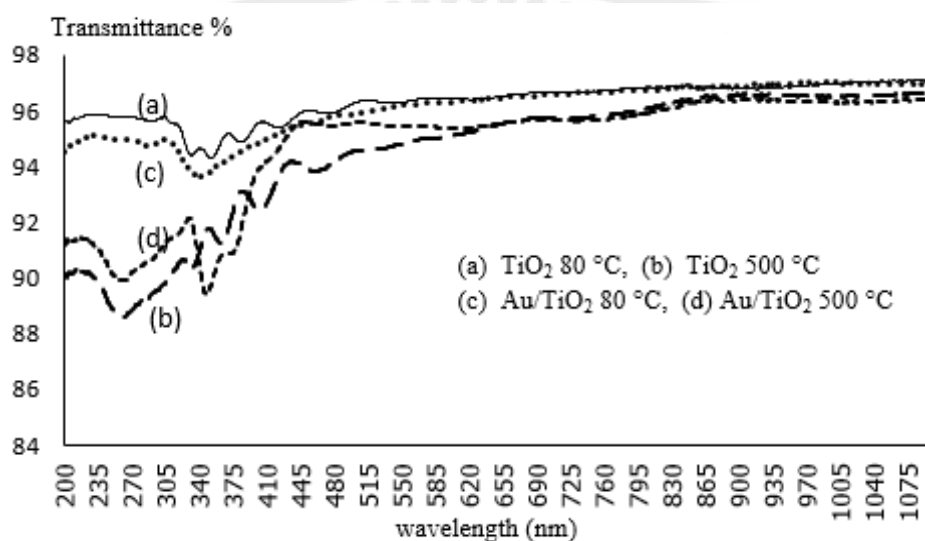
ภาพประกอบ 35 สเปตรัม FT-IR ของของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคทองคำนาโนบนกระจกนำไฟฟ้าเผ่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



### 3. การวิเคราะห์สมบัติทางแสง

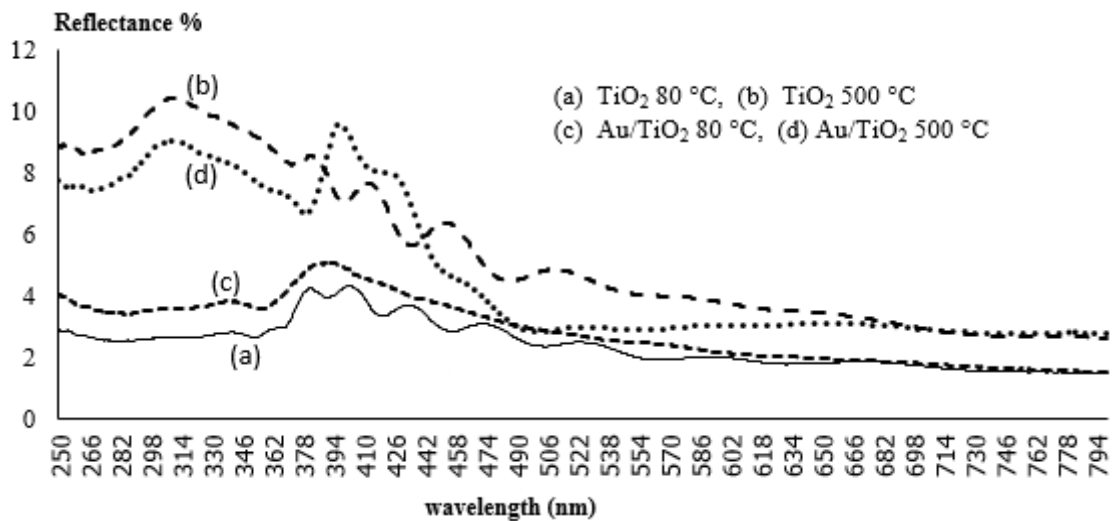
การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy โดยใช้เทคนิคการส่องผ่านของแสง (optical Transmittance) และการสะท้อนกลับของแสง (optical Reflectance)

2.1 จากสเปกตรัมการส่องแสง (optical Transmittance) ที่ทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 200-1075 นาโนเมตร ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ เผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาบ (ความยาวคลื่นเฉลี่ย 410 นาโนเมตร) จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถนำไปคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานต่อไป



ภาพประกอบ 36 สเปกตรัมการส่องแสง (optical Transmittance) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy

2.2 จากสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสง (optical Reflectance) ที่ทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ เผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับของแสงมีค่าประมาณ 3% ถึง 9% ซึ่งหมายความว่าฟิล์มที่เตรียมได้สามารถส่องผ่านและดูดกลืนได้ดี

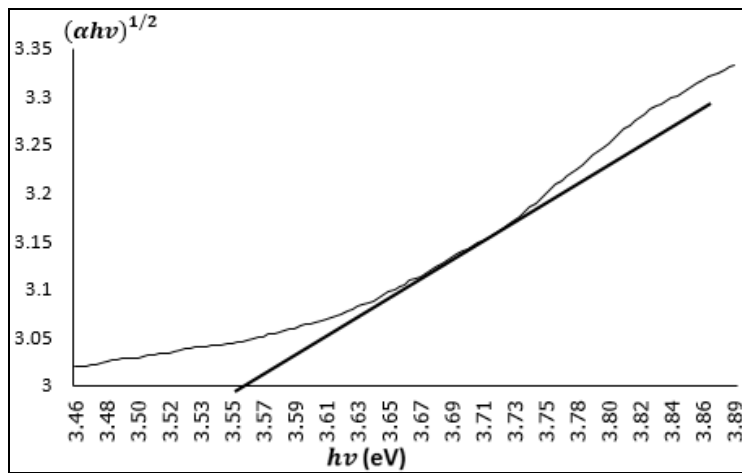


ภาพประกอบ 37 สเปกตรัมสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสง (optical Reflectance) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy

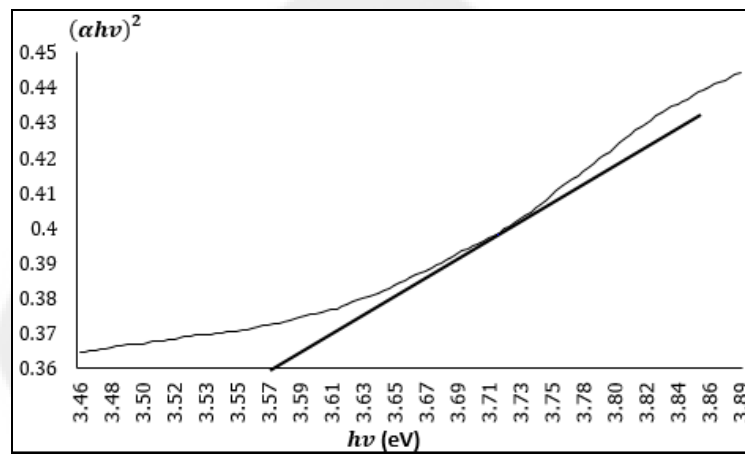
4. ศึกษาผลการเจือทองที่มีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานด้วยเครื่องยูวี-วิสสเปกโทรสโกปี การคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ดังสมการที่ 18 โดยการเปลี่ยนสถานะของแถบพลังงานแบบตรง (Direct transition) และแบบไม่ตรง (Indirect transition) จะใช้ค่า  $p=1/2$  และ  $p=2$  ตามลำดับ โดยวาดกราฟที่มีความสัมพันธ์ดังกล่าว และลากเส้นตรงตัดกับแกนโฟตอน ( $h\nu$ ) จะได้ค่าประมาณของแถบช่องว่างพลังงาน

#### 4.1 แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

พิจารณาแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ในกรณีการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรงมีค่าประมาณ 3.55 eV ส่วนกรณีแบบตรงมีค่าประมาณ 3.57 eV ดังรูปที่ 38 ถึงรูปที่ 39 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ช่องว่างพลังงานมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับแถบช่องว่างพลังงานที่เผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยค่าแถบพลังงานมีค่าอยู่ระหว่าง 3.05-3.09 eV

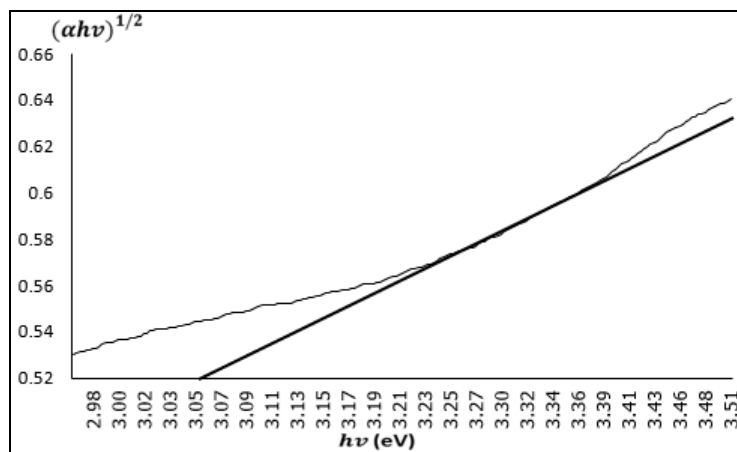


Photon Energy (eV)

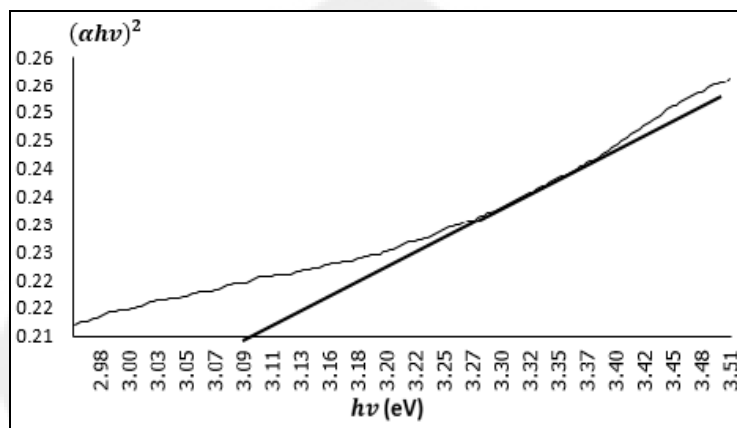


Photon Energy (eV)

ภาพประกอบ 38 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง และ (ข) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบตรงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



Photon Energy (eV)

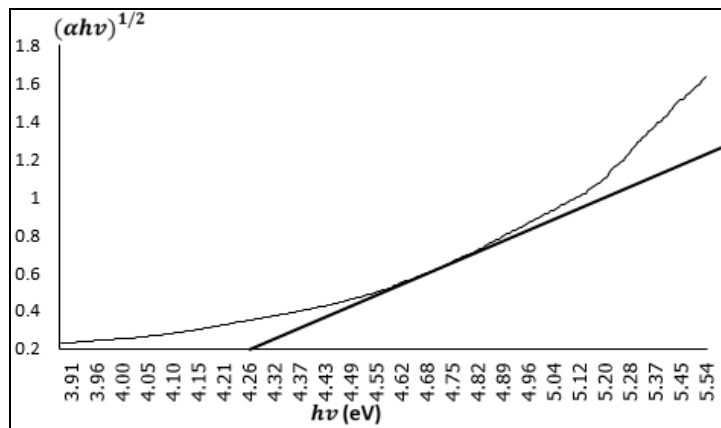


Photon Energy (eV)

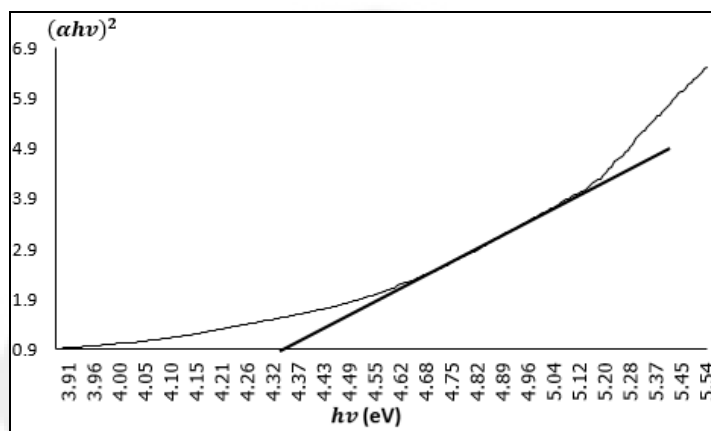
ภาพประกอบ 39 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง และ (ข) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบตรงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

#### 4.2 แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนทองคำ

พิจารณาค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคนาโนทองคำที่อุณหภูมิ 80 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับในกรณีการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรงและกรณีการเปลี่ยนสถานะแบบตรง พบว่าเมื่อเพิ่มเจืออนุภาคทองคำของค่าแถบช่องว่างเพิ่มขึ้นทั้ง 2 กรณี เมื่อเทียบกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 3.55-3.57 eV ในกรณีการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรงและกรณีการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบตรงมีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 4.01-4.32 eV ดังรูปที่ 40 ถึงรูปที่ 41

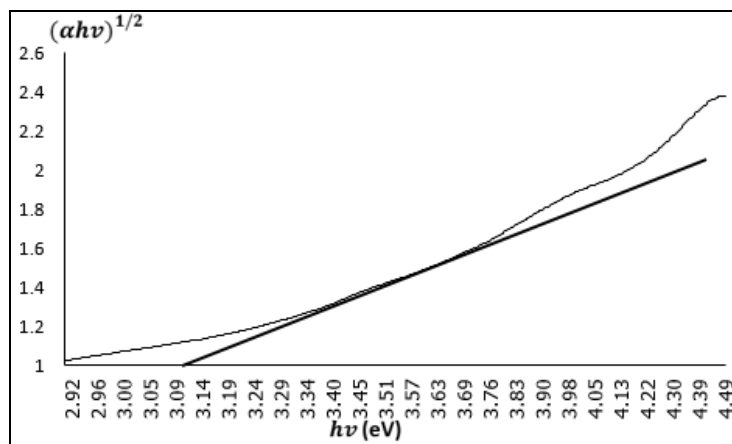


Photon Energy (eV)

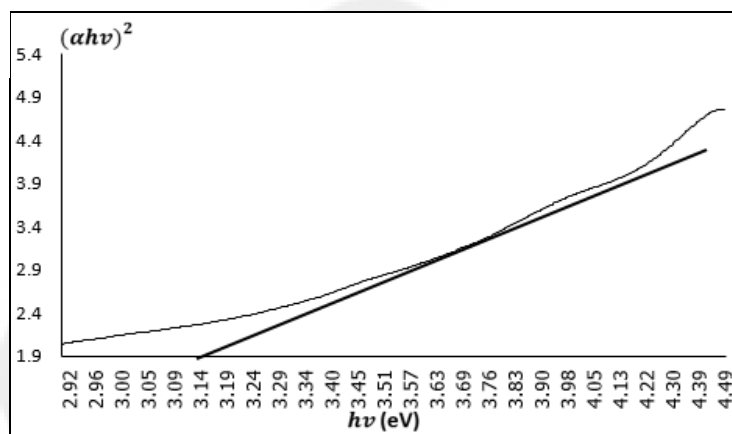


Photon Energy (eV)

ภาพประกอบ 40 ค่าแถบช่องว่างพลังงานฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำ (ก) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง และ (ข) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบตรงเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



Photon Energy (eV)



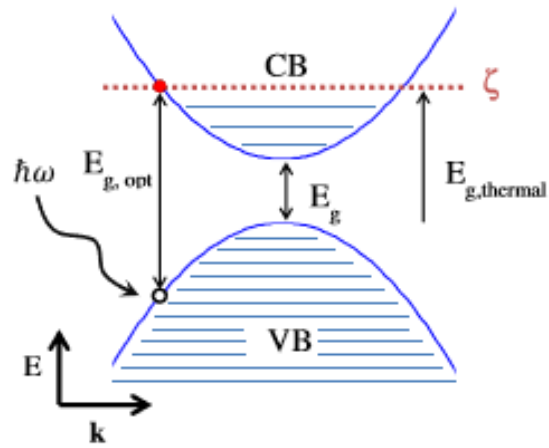
Photon Energy (eV)

ภาพประกอบ 41 ค่าแถบช่องว่างพลังงานฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำ (ก) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง และ (ข) การเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบตรงเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตาราง 8 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำ

ตัวอย่าง	แผ่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส		แผ่นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	
	แถบช่องว่างพลังงาน Eg (eV)		แถบช่องว่างพลังงาน Eg (eV)	
	Indirect - transition	direct - transition	Indirect - transition	direct -transition
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	3.55	3.57	3.05	3.09
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำ	4.26	4.32	3.09	3.14

ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง[44] ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า โดยมีฟังก์ชันของเลขคลื่น  $k$  เปลี่ยนแปลง การดูดกลืนแสงลักษณะนี้เป็นไปได้โดยให้อิเล็กตรอนรับหรือคายพลังงานโฟนอน เพื่อช่วยให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังนั้นแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบไม่ตรง มีค่า 3.05 eV เมื่อทำการเจืออนุภาคนาโนทองคำบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ พบว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนทองคำมีค่าการนำไฟฟ้าสูง เมื่อพิจารณากรณีของอนุภาคนาโนทองคำที่ฝังอยู่ในฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อแสงตกกระทบชิ้นงาน แสงจะกระทบที่อนุภาคนาโนทองคำเป็นผลให้อนุภาคนาโนทองคำดูดกลืนพลังงานโฟตอน ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เกิดการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทำให้เกิดการดันขยายแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มมากขึ้นค่าช่องว่างพลังงานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคนาโนทองคำสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Burstien-Moss (BM) [45]



ภาพประกอบ 42 ปรัชญาการ Burstein–Moss shift ของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์ และแบ่งชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส พบว่า

1. เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์ ด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยใช้เทคนิคจุ่มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า แบ่งชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ ไม่มีรอยแตกร้าว

2. วิเคราะห์จาก SEM ศึกษากรณีความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงมากขึ้นฟิล์มมีความหนาลดลงซึ่งเกิดจากสารละลายจำพวกของเหลวระเหยหมดไป ซึ่งสอดคล้องกับ [46-51]

3. วิเคราะห์จาก EDX ศึกษากรณีองค์ประกอบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์ ระหว่างชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ไม่พบอนุภาคทองบนฟิล์ม จากการศึกษาจากการทดลองพบว่าเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียสจะไม่พบอนุภาคทองเนื่องจากอนุภาคของนาโนมีขนาดเล็กมาก จึงถูกหลอมที่อุณหภูมิสูง [43]

4. วิเคราะห์จาก FT-IR ศึกษากรณีองค์ประกอบจากหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์ระหว่างชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดพบหมู่ฟังก์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ และจากการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์พบพีคการสั่นโดยมีสัญญาณเลขคลื่นที่  $3361.61\text{cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นของ OH-NH-OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันประกอบของอนุภาคทองคำนาโนที่เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสแต่ไม่พบในกรณีที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

5. ค่าแถบช่องว่างพลังงานระหว่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคทองคำนาโนคอลลอยด์ เมื่อแยกเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ค่าแถบช่องว่างพลังงานลดลง

เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนโครงสร้างจากอสัณฐาน (amorphous) ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส [52-56] และเมื่อพิจารณาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคของคานาโนคอลลอยด์ ที่เผาขึ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคของคานา มีค่าแถบช่องว่างพลังงานสูงกว่าเพราะเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Burstein–Moss shift ของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคของคานาโนคอลลอยด์ ได้ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานของฟิล์มเฉพาะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเท่านั้น ดังนั้นจึงควรศึกษาเกรนและการเรียงตัวของอนุภาคของคานาต่อไทเทเนียมไดออกไซด์

2. ศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออนุภาคของคานาโนคอลลอยด์ ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลติก



บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

1. Y. Jianguo , Z. Xiujian . and Z. Qingnan. **Effect of surface structure on photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel method.** Thin Solid Films. 2000;(379):7-14.
2. Q Zhang, L Gao, J Guo. **Effects of calcination on the photocatalytic properties of nanosized TiO<sub>2</sub> powders prepared by TiCl<sub>4</sub> hydrolysis.** Applied Catalysis B: Environmental 2000;(26):207–215. Retrieved July 4, 2016, form URL:<http://www.sciencedirect.com/article/pii/S0926337300001223>
3. Bao S. J.; & et al. **Novel porous anatase TiO<sub>2</sub> nanorods and their high lithium electro activity.** Retrieved June 15, 2016, formURL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388248107000318>.
4. E. Kowalska, O.O.P. Mahaney, R. Abe, B. Ohtani. **Visible-light-induced photocatalysis through surface plasmon excitation of gold on titania surfaces.** Phys. Chem. Chem.Phys.2010;(12):12. Retrieved June 15, 2016, form URL: <http://pcat.cat.eiccs/image/abstract/P23kowalska.pdf>.
5. N. Dimitratos, A. Villa, C.L. Bianchi, L. Prati, M. Makkee. **Gold on titania: effect of preparation method in the liquid phase oxidation.** Applied Catalysis. A, 311 (2006), 185–192 Retrieved April 1, 2016, form URL:<http://www.Sciencedirect.com/article/pii/S0926860X06004868>.
6. Loganathan Kumaresan, Bommusamy Palanisamy, Muthaiahpillai Palanichamy, Velayuthum Murugesan. **The Syntheses Characterizations, and Photocatalytic Activities of silver, Platinum, and Gold Doped TiO<sub>2</sub> Nanoparticles.** EnvironEng Res[serial online] 2011;16(2):81-90. Retrieved April 24, 2013, form URL:[file:///C:/Use/acer/Downloads/E1HGBK\\_2011\\_v16n2\\_81.pdf](file:///C:/Use/acer/Downloads/E1HGBK_2011_v16n2_81.pdf).
7. Khataee Alireza, Mansoori G Ali. **Nanostructured Titanium Dioxide Materials.** Singapore: Word Scientific; 2012.
8. Joe Smyth. **Mineral Structure and Property Data TiO<sub>2</sub> Group.** University of Colorado. Retrieved April 24, 2013, form URL:<http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>.

9. Rosendo Lo´pez , Ricardo Go´mez. Band-gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol–gel and commercial TiO<sub>2</sub>: a comparative study. J Sol-Gel Sci Technol (2012)61:1–7. Retrieved julu 15, 2016, form URL <http://link.Springer.com/article/10.1007/s10971-011-2582-9>.
10. สุदारัตน์ จิรภัทรสกุล. การจัดทำฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้ไดเอทาโนลาไมน์ในวิธีโซล-เจลสำหรับการกำจัดโครเมียม (VI) ออกจากน้ำเสีย. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2547.
11. The A to Z of Materials. Gold-Physical, Thermal and electrical Properties of Gold. Retrieved Mar 9, 2016, form <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5147>.
12. ดุสิต เครื่องาม. โซลิดสเตทฟิสิกส์. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดบุ๊คเซ็น; 2535.
13. สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2544
14. Doris Jeanne Wagner and Rensselaer Polytechnic Institute. Conduction in Solids–30. Retrieved july 14, 2016, form URL: [http://www.rpi.edu/dept/phys/SciT/Information Processing/semicond/sc\\_content/semi\\_30.html](http://www.rpi.edu/dept/phys/SciT/Information Processing/semicond/sc_content/semi_30.html).
15. นรินทร์ เนาวประทีป. สารกึ่งตัวนำ. สืบค้นเมื่อ 19 มกราคม 2559, จาก URL: <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/eng3.html>.
16. H.Rashid, Muhammad. POWER DIODE TYPES. India: PEARSON PUBLICATION; 2013.
17. Charles, Kittel. Introduction to solid State Physics. 5th ed. New York: Wiley; 1976.
18. วรมน แผล่งห้ำ้า. การศึกษาผลของอนุภาคของทองคำต่อแถบช่องว่างพลังงานของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ [ปริญญาานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2557.
19. Kubelka Paul, Munk Franz . An Article on Optics of Paint Layers. Retrieved july 2, 2016, form URL: <http://www.graphics.cornell.edu/~westin/pubs/kubelka.pdf>; 1931
20. Russell, Joshua A. Measurement of optical band gap energies of semiconductors. [Thesis Master of Physics]. Corvallis: Graduation school Oregon State University; 2011. Retrieved july 2, 2016, form URL: <https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/20605/ThesisFormatted.pdf?sequence=1>.
21. Brinker C, Scherer G. Sol Gel Science : The Physics And Chemistry Of Sol Gel Processing. Academic Press: Copyright; 1990.

22. เพ็ญวิสาข์ พิสิฐศักดิ์. **การใช้กระบวนการโพล-เจลเพื่อเพิ่มสมบัติของสิ่งทอ: ผ้าสะท้อนน้ำและน้ำมัน.** [บทความวิชาการ] ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต; 2558.
23. Asumi Giken. **Processes of dip coating.** Tokyo Japan. Retrieved April 2, 2016, from URL: [http://www.dip-coater.com/english/about\\_dip\\_coating.html](http://www.dip-coater.com/english/about_dip_coating.html).
24. อัครินทร์ บุญประเสริฐ. **ผลของสารละลายโพลีเมทิลฟอร์มมาไมด์ที่มีผลต่อท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน** [ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวัสดุศาสตร์]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2557.
25. ภาณุวัฒน์ ชัยวร. **การเตรียมวิสเกอร์สังเคราะห์ด้วยวิธีการปลูกจากไอเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์เอทานอล** [วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2550.
26. Kuwabata Susum, Torimoto Tsukasa, Imanish I Akihito, Tsuda Tsuya. **Use of Ionic Liquid Under Vacuum Conditions.** Ionic Liquids-New Aspects for the future, Dr. Jun-ichi Kadokawa (ED); 2013. Retrieved June 5, 2016, from URL: <http://www.intechopen.Com/books/ionic-liquids-new-aspects-for-the-future/use-of-ionic-liquid-under-vacuum-conditions>.
27. สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (Nuclear Society of Thailand (NST)). **การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy).** สืบค้นเมื่อ 23 กรกฎาคม 2559, จาก URL: <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>.
28. ศุภชัย จันทรงาม. **ผลของตัวกระตุ้นเชิงกึ่งอัลฟาโลไซยานินต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง** [ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2552.
29. อติพล สว่างอารมณ์. **การศึกษาประสิทธิภาพท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำ ต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก** [ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวัสดุศาสตร์]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2557.
30. Soderberg Tim. **Ultraviolet and visible spectroscopy** [Internet]. Retrieved June 30, 2016, from URL: [file:///C:/Users/acer/Downloads/Section %204.3\\_%20Ultraviolet %20and%20visible %20spectroscopy%20.pdf](file:///C:/Users/acer/Downloads/Section%204.3_%20Ultraviolet%20and%20visible%20spectroscopy%20.pdf).

31. อสุมา นาคนิคม. **การใช้งาน Integrating sphere ร่วมกับ UV-VIS spectrophotometer.** สืบค้นเมื่อ 13 พฤษภาคม 2560, จาก URL: <http://glass.dss.go.th/publication/country/ArtC2.pdf;2553>.
32. Wikipedia. the free encyclopedia [Internet]. **Integrating sphere.** Retrieved June 8, 2016, form URL: [http://www.wikiwand.com/en/Integrating\\_sphere](http://www.wikiwand.com/en/Integrating_sphere).
33. **Applications and Use of Integrating Spheres with the LAMBDA 650 and 850 UV/Vis and LAMBDA 950 UV/Vis/NIR spectrophotometers.** Retrieved June 5, 2016, form URL: [https://www.perkinelmer.com/labsolutions/resources/docs/APP\\_LAMBDA\\_650\\_IntegratingSpheres.pdf](https://www.perkinelmer.com/labsolutions/resources/docs/APP_LAMBDA_650_IntegratingSpheres.pdf).
34. Liliana R. Paze, Josef Matousek. **Properties of sol-gel TiO<sub>2</sub> Layers On Glass Substrate.** Retrieved January 6, 2016, form URL: [https://www.irsm.cas.cz/materialy/cs\\_content/2004/Rodriguez\\_Paez\\_CS\\_2004\\_0000.pdf](https://www.irsm.cas.cz/materialy/cs_content/2004/Rodriguez_Paez_CS_2004_0000.pdf).
35. TANG Yu-xin, TAO Jie. **Preparation of TiO<sub>2</sub> nanotube on glass by anodization of Ti films at room temperature.** Retrieved January 2, 2016, form URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632608602514>.
36. TANG Yu-xin, TAO Jie. **Preparation and Characterization of TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays via Anodization of Titanium Films Deposited on FTO Conducting Glass at Room Temperature.** Retrieved January 5, 2016, form URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872150808600820>.
37. Abu Z. Sadek, Haidong Zheng. **Anodization of Ti Thin Film Deposited on ITO.** Langmuir 2009;(25):509-514. Retrieved January 2, 2016, form URL: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/la802456r> science/article/pii/S1872150808600820.
38. Debeila Mahlaba A, Raphula Mpfuzeni C, Mokoena Emma, Avolos Miguel, Petranovskii Vitalii, Coville Neil j, et al. **The Influence of Gold on the Optical Properties of Sol-Gel Derived Titania.** Journal of Scientific & Engineering Research. IJSER [Serial online] 2014;5(3):85-91. Retrieved April 30, 2016, form URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305000225>.

39. Melinte G, Baia M, Georgescu D, Baia L, Lancu V, Diamandescu L, et al. **The Influence of the Au Nanoparticles Dimension on the Photocatalytic Performances of TiO<sub>2</sub>-Au Porous Composites**. Acta Phys Pol A [Serial online] 2012;121(1):208-210. Retrieved January 6, 2016, form URL:[http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/26883/9/09\\_chapter%204.pdf](http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/26883/9/09_chapter%204.pdf).
40. Ansari Sajid Ali, Khan Mohammad Mansoob, Lee Jintae, Cho Moo Hwan. **Enhanced optical visible light catalytic and electrochemical properties of Au@TiO<sub>2</sub> nanocomposites**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2013;(19):1845-1850. Retrieved April 11, 2016, form URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X13000932>.
41. Debeila Mahlaba A, Raphula Mpfuzeni C, Mokoena Emma, Avolos Miguel, Petranovskii Vitalii, Coville Neil j, et al. **The Influence of Gold on the Optical Properties of Sol-Gel Derived Titania**. Journal of Scientific & Engineering Research. IJSER [Serial online] 2014;5(3):85-91. Retrieved April 30, 2016, form URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305000225>.
42. Aytaç GÜLTEKİN, **Effect of Au Nanoparticles Doping on The Properties of TiO<sub>2</sub> Thin Films**. Materials Science (MEDŽIAGOTYRA). 2014;(21), Retrieved January 6, 2016, form URL:<http://www.matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/3709>.
43. Dario Buso, Jessica Pasifico, Alessandro Martucci, and Paul Mulvaney. **Gold-Nanoparticle-Doped TiO<sub>2</sub> Semiconductor Thin Films: Optical Characterization**. Advance Functionnal Material. 2007;(17):347-354. Retrieved November 2, 2017, form URL:<http://users.encs.concordia.ca/~mojtaba/elec6271/Gold%20nanoparticles%20doped.pdf>.
44. Sergio Valencia, Juan Miguel Marín and Gloria Restrepo. **Study of the Bandgap of Synthesized Titanium Dioxide Nanoparticles Using the Sol-Gel Method and a Hydrothermal Treatment**. The Open Materials Science Journal. 2010;(4):9-14. Retrieved November 1, 2017, form URL:<https://pdfs.semanticscholar.org/adfc/20f0e0d5b8b27108f5422954e66e5e2bf49e.pdf>.

45. Zachary M Gibbs, Arron Lalonde and G Jeffrey Snyder. **Optical band gap and the Burstein–Moss effect in iodine doped PbTe using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy**. *New journal of physics*.2013;(15). Retrieved November 1, 2017, formURL:<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/15/7/075020/meta>.
46. Jing Huang, and Ming Wong. **Structures and properties of titania thin films annealed under different atmosphere**. *Thin Solid Films*.2011;(520):1379-1384. Retrieved November 2, 2017, form URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609011015987>.
47. P.E. AGBO, M.N. NNABUCHI, and K.O. ONOGU. **EFFECT OF ANNEALING ON THE THICKNESS AND BAND GAP OF NOVEL CORE-SHELL CRYSTALLINE THIN FILM**. *Journal of Ovonic Research*. 2012;(8):127-134. Retrieved November 2, 2017, form URL:[http://www.chalcogen.ro/127\\_Agbo.pdf](http://www.chalcogen.ro/127_Agbo.pdf).
48. C.-P. Lin, H. Chen, A. Nakurak, Et al. **Effect of Annealing Temperature on the Photocatalytic Activity of TiO<sub>2</sub> Thin Films**. *Energy Procedia*.2013;(34):627-636. Retrieved November 1, 2017, formURL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213010370>.
49. A. K. M. Muaz, U. Hashim, Fatimah Ibrahim. Et al. **Effect of annealing temperatures on the morphology, optical and electrical properties of TiO<sub>2</sub> thin films synthesized by the sol–gel method and deposited on Al/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/p-Si**. *Microsyst echnol*. 2015. Retrieved November 1, 2017, formURL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.719.6412&rep=rep1&type=pdf>.
50. Adisorn Buranawong, Nirun Witit-anun, and Surasing Chaiyakun. **Total Pressure and Annealing Temperature Effects on Structure and Photo-induce Hydrophilicity of Reactive DC Sputtered TiO<sub>2</sub> Thin Films**. *ENGINEERING JOURNAL*. 2012;16(3):79- 89. Retrieved November 2, 2017, form URL:[engj.org/index.php/ej/article/download/208/181/](http://engj.org/index.php/ej/article/download/208/181/).

51. Stotaw Talbachew Hayle, and Girma Goro Gonfa. **Synthesis and characterization of titanium oxide nanomaterials using sol-gel method.** American Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2014; 2(1): 1-7. Retrieved November 1, 2017, form URL :<http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.nano.20140201.11.pdf>.
52. P.B. Rathod, K.R. Nemade, S.A.Wagule. **Study of Structure and Optical for Chemically Synthesized Titanium Dioxide Nanoparticles.** International Journal of Chemical and Physical Sciences. 2015;(4):491-495. Retrieved November 2, 2017, formURL:[http://ijcps.org/admin/php/uploads/353\\_pdf.pdf](http://ijcps.org/admin/php/uploads/353_pdf.pdf).
53. F. Hanini, A. Bouabellou, Y. Bouachiba, F. Kermiche, A. Taabouche, M. Hemissi, and D. Lakhdari. **Structural, optical and electrical properties of TiO<sub>2</sub> thin films synthesized by sol-gel technique.** Journal of Engineering (IOSRJEN).2013;3(1):21-28. Retrieved November 2, 2017, formURL :<https://pdfs.semanticscholar.org/1930/c6ceaadc48e2c5baaac8dbeba2120a3928cf.pdf>
54. Jin-Ming Wu, Min Wang, Yong-Wu Li, Feng-Dong Zhao, Xian-Jun Ding, Akiyoshi Osaka. **Crystallization of amorphous titania gel by hot water aging and induction of in vitro apatite formation by crystallized titania.** Surface & Coatings Technology.2006; (201): 755–761. Retrieved November 2, 2017, formURL: [http://web.hku.hk/~memwang/files/cm01/SCT\\_201\(2006\)\\_755-761.pdf](http://web.hku.hk/~memwang/files/cm01/SCT_201(2006)_755-761.pdf).
55. M.K. Ahmad, N.A.Rasheid, A.Zain Ahmed, S. Abdullah, M. Rusop. **Effect of Annealing Temperature on Titanium Dioxide Thin Films Prepared by Sol Gel Method.** Solar Cell Laboratory, Faculty of Electrical Engineering.2014. Retrieved November 2, 2017,form URL:[https://www.researchgate.net/publication/239760280\\_Effect\\_of\\_Annealing\\_Temperature\\_on\\_Titanium\\_Dioxide\\_Thin\\_Films\\_Prepared\\_by\\_Sol\\_Gel\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/239760280_Effect_of_Annealing_Temperature_on_Titanium_Dioxide_Thin_Films_Prepared_by_Sol_Gel_Method).
56. L. Bedikyan, S. Zakhariyev, M. Zakharieva. **TITANIUM DIOXIDE THIN FILMS : PREPARATION AND OPTICAL PROPERTIES.** Journal of Chemical Technology and Metallurgy.2013;48(6):555-558 Retrieved November 2, 2017, form URL:[http://dl.uctm.edu/journal/node/j2013-6/2-Bedikyan\\_p-555-558.pdf](http://dl.uctm.edu/journal/node/j2013-6/2-Bedikyan_p-555-558.pdf).



ภาคผนวก

ตาราง 9 แสดงความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm <sup>-1</sup> (sh,w)แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm <sup>-1</sup> (b)แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm <sup>-1</sup> (vs,vb)กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm <sup>-1</sup> (m) 1°เอมีนและเอมีตมี 2 แถบ 3200-3400 cm <sup>-1</sup> (m) 2°เอมีนและเอมีตมี 1 แถบ
3300(vs)	=C-H stretching	3300 cm <sup>-1</sup> อัลคาไลน์ที่มี=C-H ที่โซ่ปลาย
3100-3300(w,sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน(หลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH, CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C≡H stretching	ไนทริล(m)
2260-2100	C=C stretching	อัลคีน(w)โมเลกุลที่สมมาตรไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760	C=O stretching	แอนดีไฮด์(s)มี 2 แถบ
1800(s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770(s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735(s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725(s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715(s)	C=O stretching	คีโตน
1710(s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650(s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600(w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590(s-m)	N-H bending	1°เอมีน
1550-1510(s)	N-H bending	2°เอมีน
1600,1580,1500,1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ มีความเข้มข้นไม่ แน่นอนอาจจะมี 2, 3 หรือทั้ง 4 แถบ
1520(s) และ 1350(s)	NO <sub>2</sub> bending	สารประกอบไนโตรเจน
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH <sub>2</sub>

## ตาราง 9 (ต่อ)

cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH <sub>3</sub>
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH <sub>2</sub> -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเทอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990-910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH <sub>2</sub> )
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> )
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R <sub>2</sub> C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750-690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)



ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	ชญาพันธ์ กาลปลูก
วัน เดือน ปีเกิด	14 ธันวาคม 2534
สถานที่เกิด	อำนาจเจริญ
สถานที่อยู่ตามภูมิลำเนา	56 หมู่ 6 ตำบลนาหว้า อำเภอปทุมราชวงศา จังหวัดอำนาจเจริญ 37110
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ 2553	ระดับมัธยมตอนปลาย จาก โรงเรียนปทุมราชวงศา
พ.ศ 2557	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ 2560	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ