การปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยระบบไฮโดรเทอร์มอล สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

PREPARATION OF TiO_2 NANORODS BY HYDROTHERMAL FOR PEROVSKITE SOLAR CELLS

วชิรยา ธรรมสุรักษ์

WACHIRAYA THAMSURAK

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF TiO_2 NANORODS BY HYDROTHERMAL
FOR PEROVSKITE SOLAR CELLS

WACHIRAYA THAMSURAK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยระบบไฮโดรเทอร์มอลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์
Special Project Title	Preparation of TiO_2 nanorods by hydrothermal for Perovskite solar cells
นักศึกษา	นางสาววชิรยา ธรรมสุรักษ์
รหัสประจำตัว	57110038
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นวพันธ์ ขยันกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	**ลายมือชื่อ**
ผศ.ดร. กรกช อ่อนละออ	
ดร. กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์	
ผศ.ดร.นวพันธ์ ขยันกิจ	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....15.......เดือน........มิ.ย.........พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยระบบไฮโดรเทอร์มอลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์
นักศึกษา	นางสาววชิรยา ธรรมสุรักษ์
รหัสประจำตัว	57110038
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นวพันธ์ ขยันกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยระบบการไฮโดรเทอร์มอล โดยฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นกระจกโปร่งใสนำไฟฟ้า โดยมีเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบาง ได้แก่ เงื่อนไขของการมีชั้นเริ่มต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลและความเข้มข้นของสารที่จะใช้เป็นชั้นเริ่มต้นและจากนั้นทำการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

คำสำคัญ :การปลูกฟิล์มบางโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล; แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์,เซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation of TiO_2 nanorods by hydrothermal for Perovskite solar cells
Student	Ms.Wachiraya Thamsurak
Student ID	57110038
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Special Project Advisor	Asst. Prof Dr. Navaphun Kayunkid
Special Project Co-Advisor	Dr. Pisit kamnorkaew

ABSTRACT

This research is a study of preparation of Titanium dioxide nanorods thin films were prepared by hydrothermal method for Perovskite solar calls application. Titanium dioxide nanorods thin films were deposited on FTO substrate. The thin films growth condition such as compare seed layer on substrate, temperature and Concentration of seed layer. The crystal structures of sample films and, their surface morphology, and optical properties have been investigated by X-Ray diffraction (XRD), Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)

Keywords : Hydrothermal Method; Titanium dioxide nanorods thin films; Perovskite solar cells

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงงานเรื่องการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยระบบไฮโดรเทอร์มอลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Preparation of TiO_2 Nanorods by Hydrothermal for Perovskite Solar Cells) นี้เสร็จสมบูรณ์ลงในส่วนหนึ่งได้นั้นกลุ่มของข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นวพันธ์ ขยันกิจ และ ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว จากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่คอยชี้แนะและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับข้องบกพร่องและแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน อีกทั้งคณะอาจารย์ทุกท่านที่เกี่ยวข้องในการให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำแล้วนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทำโครงงาน ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่ายต่างๆ อีกทั้งยังคอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้เสมอรวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่ให้ยืมอุปกรณ์ รวมถึงให้คำแนะนำ

วชิรยา ธรรมสุรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....ii
สารบัญ....iv
สารบัญรูป....vii
สารบัญตาราง....ix

บทที่ 1 บทนำ....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย....1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย....2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย....2
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ....4
2.1 โครงสร้างนาโนไททาเนียมไดออกไซด์....4
2.1.1 นาโนไททาเนียมไดออกไซด์....4
2.1.2 แท่งนาโน....4
2.1.3 แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์....5
2.1.3.1 โครงสร้างของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์....5
2.1.3.2 ผลของความร้อนต่อแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์....7
2.1.3.3 ผลของความเป็นกรดด่างต่อแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์....9
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์....11
2.2 ระบบเตรียมฟิล์มบางโดยการไฮโดรเทอร์มอล....11
2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง....11
2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยการไฮโดรเทอร์มอล....13
2.2.2.1 หลักการเกิดฟิล์มของไฮโดรเทอร์มอล....15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม 16
2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 16
2.3.2 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด 19
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ 21
2.4.1 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ 21
2.4.1.1 พลังงานแสงอาทิตย์ 21
2.4.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ 22
2.4.1.3 วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ 24
2.4.1.4 การวัดประสิทธิ์ภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 26
2.4.2 งานวิจัยการนำไททาเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ 27
บทที่ 3 ขั้นตอนการทำงานวิจัย 30
3.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยระบบไฮโดรเทอร์มอล 31
3.1.1 องค์ประกอบของการเตรียมฟิล์มบางโดยไฮโดรเทอร์มอล 31
3.1.1.1 เตาอบสาร 31
3.1.1.2 ภาชนะทนความร้อนและแรงดัน 32
3.1.1.3 กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า 32
3.1.1.4 เครื่องเคลือบปาด 33
3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ 33
3.3 การเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 34
3.3.1 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มบางโดยไม่มีชั้นเริ่มต้นและมีชั้นเริ่มต้น 34
3.3.2 เงื่อนไขการเปลี่ยนอุณหภูมิของการไฮโดรเทอร์มอล 35
3.3.3 เงื่อนไขการใช้ผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ 35
3.3.4 เงื่อนไขการหาความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย 35
3.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 36
3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด 37

บทที่ 4 ผลดำเนินงานวิจัย 38

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมออกไซด์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 38

4.1.1 ผลของการมีอยู่ของชั้นเริ่มต้นของฟิล์มบาง 38

4.1.2 ผลการปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล 40

4.1.3 ผลจากการใช้ผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ 41

4.1.4 เงื่อนไขการหาความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย 42

4.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมออกไซด์โดย กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 43

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ 47

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 47

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข 47

บรรณานุกรม 48

ประวัติผู้เขียน 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า

2.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) อนาเทส (b)รู ไทล์ และ (c) บรูคไคท์ 6
2.2 (a) มุมมองด้านบน (b) มุมมองตัดขวาง 6
2.3 ผล XRD ของการให้ความร้อนแก่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ 8
2.4 ผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อขนาดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ 9
2.5 ผลของเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อขนาดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ 9
2.6 ค่าของความเป็นกรดด่างที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก 10
2.7 กระบวนการในการเตรียมฟิล์มบาง 11
2.8 การเกิดแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 15
2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์ 16
2.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในกรณีคลื่นแทรกสอดและเสริมกัน 17
2.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 18
2.12 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด 20
2.13 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง 21
2.14 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ 24
2.15 วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ 26
2.16 วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 26
2.17 กราฟ J-V curve 27
2.18 ภาพจากเครื่อง SEM 28
2.19 กราฟการเปรียบเทียบขนาดของผลึกเทียบกับอุณหภูมิ 28
2.20 กราฟแสดงการประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า 28
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 30
3.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยไฮโดรเทอร์มอล 31
3.3 เตาอบสาร 31
3.4 ภาชนะทนความร้อนและแรงดัน 32
3.5 กระจกโปร่งใสนำไฟฟ้า 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แผนภาพเครื่องเคลือบปาด	33
3.7 แผนภาพขั้นตอนการล้างกระจก	34
3.8 แผนภาพการปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	35
3.9 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	36
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดชนิด	37
4.1 กราฟ XRD ของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเงื่อนไขแรก	39
4.2 การเกิดแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	40
4.3 กราฟ XRD ของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่างๆ	40
4.4 กราฟ XRD ของฟิล์มโดยปรับความเข้มข้นของผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ชั้นเริ่มต้น	41
4.5 กราฟ XRD ของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายแอมโนเนีย	42
4.6 ภาพ FE-SEM ของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่างๆ	43
4.7 ภาพ FE-SEM ของฟิล์มโดยปรับความเข้มข้นของผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ชั้นเริ่มต้น	44
4.8 ภาพ FE-SEM ของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายแอมโนเนีย	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 โครงสร้างผลึกและสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ 7
2.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อขนาดผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 8
2.3 เทคนิคการปลูกฟิล์มบางโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 มิติ 12
2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิค 12
3.1 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Nanorods) เพื่อศึกษาสมบัติทางด้านต่างๆ ของฟิล์มบางและเพื่อศึกษาแนวทางการนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้ทำอุปกรณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธี Sol-gel Template Method, Chemical Vapor Veposition Method, Electrodeposition Method และ Direct Oxidation Method เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการ Sol-gel template method, Chemical Vapor Veposition Method, Electrodeposition Method และ Direct Oxidation Method นี้จะมีกระบวนการที่ซับซ้อน ทำได้ยาก ราคาแพง ทำให้ในไม่กี่ปีมานี้ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการ Hydrothermal Method ได้มีการพัฒนาและสนใจเป็นอย่างมากในการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ [1]

การเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยการ Hydrothermal Method เป็นเทคนิคปลูกฟิล์มแบบ Bottom up ที่ใช้ในการพัฒนางานในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่หนึ่งที่สามารถเตรียมฟิล์มบางได้ และฟิล์มบางที่ได้มีการกระจายตัวได้ดีในระดับหนึ่ง นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังใช้ต้นทุนต่ำ (Low cost) ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน ปรับเปลี่ยนตัวแปรได้ง่าย สามารถทำได้ที่สภาวะบรรยากาศปกติ และการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม

แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ปัจจุบันนี้ได้รับได้ความสนใจในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากแท่งดังกล่าวมีคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดแก๊ส (Gas Sensor) โดยมีการตอบสนองที่เร็วกับสาร Isopropanol [2] และมีการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านในทางเซลล์แสงอาทิตย์แบบแห้ง (Dye-sensitized solar cells) [3] กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่นิยม ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นสมบัติพิเศษของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งเหมาะต่อการศึกษาและทำวิจัย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้นนี้ จึงได้มีการศึกษาถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการ Hydrothermal Method และศึกษาสมบัติต่างๆของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อหาแนวทางในการนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอุตสาหกรรม และด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์สำหรับการสร้างแหล่งพลังงานทางเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาระบบและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง โดยระบบ Hydrothermal Method

1.2.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ระบบ Hydrothermal

1.2.3 ศึกษาสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างผลึก และ สมบัติทางพื้นผิวโดย เครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Field emission scanning electron microscope : FE-SEM) ตามลำดับ

1.2.4 เพื่อศึกษาและหาโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

1.3 ขอบเขตการดำเนินวิจัย

ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม โดยแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะถูกเตรียมโดยผ่านกระบวนการ HydrothermalMethod โดยจะทำการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า (FTO) ซึ่งมีเงื่อนไขต่างๆ คือ เงื่อนไขของการมีชั้นเริ่มต้น (Seed layer) เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูก เงื่อนไขความเข้มข้นสารที่จะใช้เป็นชั้นเริ่มต้น (Seed layer) และความเป็นกรดด่างของสารละลายในการทำกระบวนการ Hydrothermal Method เพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ โดยจะนำฟิล์มที่ได้มาทำการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับระบบและวิธีการเตรียมโดยระบบ Hydrothermal

1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับสมบัติของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไทออกไซด์ โดยกระบวนการ Hydrothermal

1.4.3 มีความรู้และความเข้าใจ สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ของฟิล์มบางด้วยวิธีการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Fieldemission scanning electron microscope : FE-SEM) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการดำเนินวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบางโดยระบบ Hydrothermal และสุดท้าย คือ การกล่าวถึงทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นปลายทางของงานวิจัยนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดลองต่างๆ ของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยระบบ Hydrothermal รวมถึงการตรวจสอบฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยระบบ Hydrothermal ผลของการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ การเกิดแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ปัจจัยที่ทำให้แท่งนาโนเมตรมีสมบัติใหม่ที่ต่างไปจากอนุภาคนาโน สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติทางการนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

นอกจากนี้ในบทนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีการเตรียมฟิล์มบาง รวมทั้งระบบการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนโดยวิธีการ Hydrothermal Method ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบดังกล่าวในการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการเครื่องมือวิเคราะห์ฟิล์มบาง สุดท้ายจะกล่าวถึงหลักการของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 โครงสร้างนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Nanostructure)

2.1.1 นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Nano TiO_2) [4]

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไททาเนีย (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม (Ti) ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันที่มีขนาด 1-100 นาโนเมตร ในปัจจุบันการเติบโตของอุตสาหกรรมทั่วโลกได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ถือว่าเป็นใกล้กับเซมิคอนดักเตอร์ที่เหมาะสำหรับ Photocatalysis เนื่องจากความต้นทุนต่ำและมีความปลอดภัยต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

และจากงานวิจัยของ Heinrich Klaporth นักเคมีชาวเยอร์มันพบในแร่รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีไทเทเนียมไดออกไซด์มากถึง 96% นอกจากนี้แล้วไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถพบไดในแร่ลูโคซีน (Leucoxene) แร่อนาเทส (Anatase) แร่บรูคไคท์ (Brookite) แร่เพอร์รอฟสไคท์ (Perovskite) และแร่สฟีน (Sphene)

2.1.2 แท่งนาโน (Nanorods)

แท่งนาโนเป็นโครงสร้างนาโนที่มีสัณฐานวิทยาแบบ 1 มิติ มีลักษณะเป็นท่อตัน ขนาด 1-100 นาโนเมตร โดยอัตราส่วนความยาวหารด้วยความกว้างนั้นมีค่า 3-5 การประยุกต์ใช้งานแท่งนาโนมีการนำแท่งนาโนในเทคโนโลยีการแสดงผลเนื่องจากความสามารถปรับเปลี่ยนการสะท้อนแสงของแท่งโดยเปลี่ยนทิศทางของพวกเขาด้วยสนามไฟฟ้าที่ใช้โปรแกรมประยุกต์อื่นสำหรับระบบเครื่องกลไฟฟ้า (MEMS) แท่งนาโนมีคุณสมบัติดูดซับแสงในย่านความถี่ใกล้แสงอินฟราเรด และสร้างความร้อนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด สถานที่แห่งนี้นำไปสู่การใช้แท่งนาโนเป็นตัวบำบัดโรคมะเร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Nanorods) [5]

แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นแท่งนาโนที่จัดอยู่ในกลุ่มแท่งนาโนกึ่งตัวนำ แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปัจจุบันได้รับได้ความสนใจในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดแก๊ส (Gas Sensor) โดยมีการตอบสนองที่เร็วกับสาร Isopropanol มาก และได้ประสบความสำเร็จมากที่สุดในการถูกใช้เป็นชั้นกลางเพื่อขนส่งอิเล็กตรอน ดังนั้นพื้นที่ผิวเฉพาะและการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงมีบทบาทสำคัญในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวัสดุ 1 มิติมีความสามารถในการเพิ่มการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้แรงขับเคลื่อนของสนามไฟฟ้าพิเศษ

2.1.3.1 โครงสร้างของแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ [6-11]

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นกลุ่มของโลหะออกไซด์ โดยไททาเนียมไดออกไซด์ทั่วไปที่พบในธรรมชาติ นั้นมีโครงสร้างผลึกอยู่ 3 แบบหลักๆคือ Anatase (Tetragonal), Rutile (Tetragonal) และ Brookite (Orthorhombic) โดยได้รับการพิจารณาดังนี้

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบรูไทล์ (Rutile)มีโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอล (tetragonal) โดยที่มีการบิดเบี้ยวโดยใช้ส่วนขอบมาเรียงต่อกัน ผลึกรูไทล์นั้นมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิและแรงกดดันที่สูงเนื่องจากเป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ จึงกลายเป็นโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมกับอุณหพลศาสตร์ จากรายงานของ Zhang et al. พบว่าโครงสร้าง อนาเทส และ บรูกไคล์นั้นสามารถเปลี่ยนเป็นเป็นรูไทล์ได้ เมื่อโครงสร้างนั้นๆได้รับพลังงานมากพอ

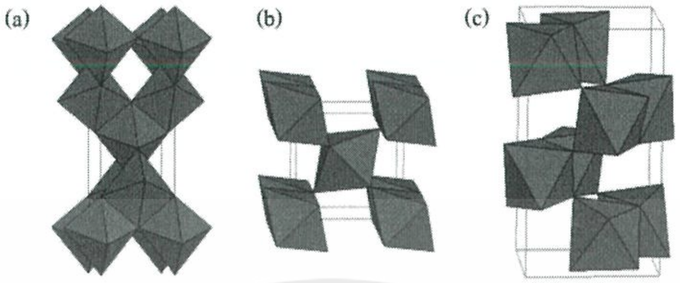
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบอนาเทส (Anatase) เป็นแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) โดยที่มีการบิดเบี้ยวโดยใช้ส่วนยอดมาเรียงต่อกัน โดยผลึกอนาเทสมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้างอนาเทสเป็นที่นิยมมาก สำหรับการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูงกว่า ค่าไดอิเล็กทริกต่ำ ค่าคงที่และความหนาแน่นต่ำ

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบบรูไคล์ (Brookite)เป็นแบบออโทรอมบิค (Orthorhombic) โดยที่มีการบิดเบี้ยวโดยใช้ส่วนยอดและส่วนขอบของออกตะฮีดรอลมาเรียงต่อกัน โดยโครงสร้างนี้มีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อมีปริมาตรของอะตอมที่ใหญ่ขึ้นและยังมีความหนาแน่นน้อยที่สุดใน 3 รูปแบบและพบเจอไม่บ่อยนัก ส่วนมากจะพบในการตรวจสอบเชิงทดลอง โดยการจัดเรียงตะตอมได้แสดงดังรูปที่ 2.1

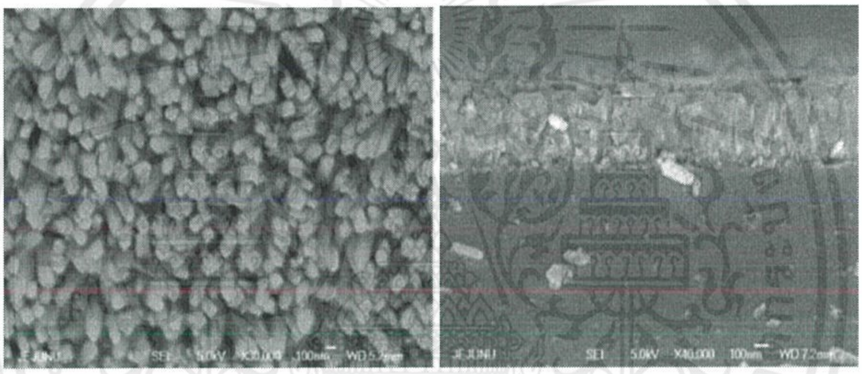
สัณฐานวิทยาทั่วไปของอาร์เรย์แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์แบบสังเคราะห์ตามที่สังเคราะห์ถูกตรวจสอบโดย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Field emission scanning electron microscope : FE-SEM) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้รับมีโครงสร้างแท่งนาโน แนวตั้งและปลูกบนกระจกนำไฟฟ้า FTO เคลือบผิวกระจกที่ความหนาแน่นสูง ถ่ายภาพ FE-SEM ที่สถานที่ต่างกัน และเปิดเผยว่าทั้งพื้นผิวของพื้นผิวฐานรองรับ ปกคลุมอย่างสม่ำเสมอและหนาแน่นกับแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ รูปที่ 2.2 เป็นมุมมองด้านบนของแนวเดียวกันจะเห็นได้ว่าแกนนาโนที่ได้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกด้านบน รูปที่ 2.2 คือ มุมมองตัดขวางของแท่งนาโนที่จัดตำแหน่งไททาเนียมไดออกไซด์ไว้ มันเผยให้เห็นที่ด้านข้างของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ค่อนข้างราบรื่นตามแนวตั้งขนาดเฉลี่ยของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) อนาเทส (b) รูไทล์และ (c) บรูคไคท์



รูปที่ 2.2 (a) มุมมองด้านบน (b) มุมมองตัดขวาง

แม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเทียมไดออกไซด์จะมีอยู่หลายแบบดังที่กล่าวมาแล้ว แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมากกว่าแบบรูไทล์และแบบบรูคไคท์ สาเหตุเนื่องมาจากการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับช่องว่างอิเล็กตรอนเกิดได้ยากกว่าแบบรูไทล์และแบบบรูคไคท์ [11] แต่ในบางปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างแบบอนาเทสและแบบรูไทล์ (เช่น อนาเทส 75% และ รูไทล์ 25%) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการ เร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสบริสุทธิ์แต่ทั้งนี้ก็มีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ การกระจายตัวของรูพรุน ปริมาณรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึกและที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [13,14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างผลึกและสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ [15–17]

สมบัติ	อนาเทส	รูไทล์	บรูคไคท์
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โธรอมบิก
น้ำหนักโมเลกุล	79.890	79.890	79.890
ความหนาแน่น (g/cm^3)	3.795	4.134	3.993
ความถ่วงจำเพาะ	3.90–4.10	3.90–4.10	3.90–4.10
จุดหลอมเหลว (°C)	1,835	1,800–1,900	1,800–1,900
ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (eV)	3.20	3.02	2.96
จุดเดือด (°C)	2,500–3,000	2,500–3,000	2,500–3,000

2.1.3.2 ผลของการให้ความร้อนต่อสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

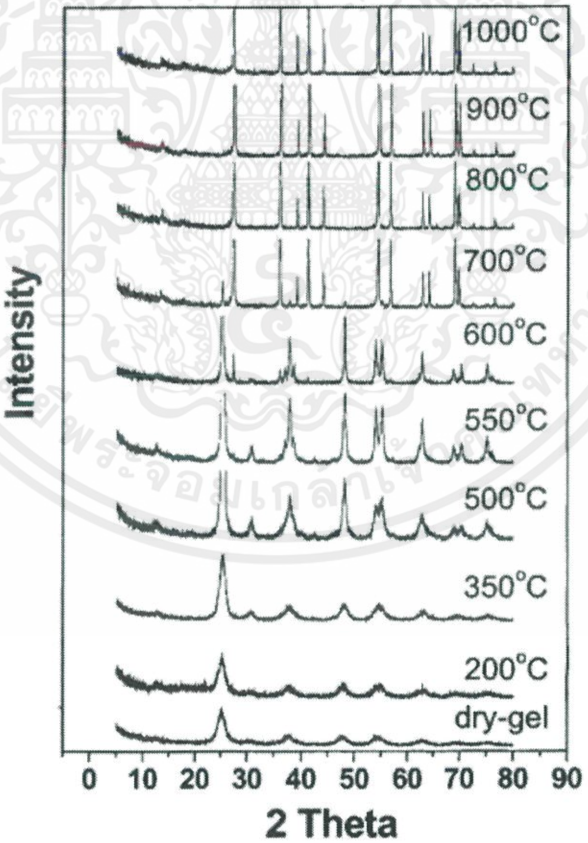
นอกจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะสามารถสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้แล้วมีรายงานของ Yu et al. [18] ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (100 °C, 500 °C, 700 °C และ 900 °C) พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงมากขึ้นมีผลทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคผลึกทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 900°C เกิดโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.2 และนอกจากนี้ยังมีรายงานของ Li et al. [19] ที่ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนและเวลาที่มีผลต่อโครงสร้างและขนาดผลึกของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์คือ เมื่อให้ความร้อนแก่ผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (200–1,000 °C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C โครงสร้างผลึกของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นแบบอนาเทสเท่านั้น แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C ขึ้นไปจะเห็นว่าโครงสร้างผลึกของผงไททาเนียมไดออกไซด์เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบรูไทล์และเป็นโครงสร้างแบบรูไทลอ์ย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 800°C ขึ้นไป ดังจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่แสดงในรูป ที่ 2.3 นอกจากการให้ความร้อนที่สูงขึ้นแก่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง แล้วยังส่งผลต่อขนาดผลึกอีกด้วย ซึ่งจากรายงานพบว่า ผลของการให้ความร้อนที่สูงขึ้นมีผลต่อขนาดผลึกอย่างมีนัยสำคัญ คือถ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C จะเห็นว่าขนาดของผลึกจะโตขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C ขนาดของผลึกจะโตขึ้นอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ นอกจากนี้ยังพบว่าการให้ความร้อนที่เวลาต่างๆนั้นส่งผลต่อขนาดผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์เช่นเดียวกัน โดยจากรายงานได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C, 500 °C และ 1,000 °C ที่เวลาต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 350 °C และ 500 °C เวลามีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก แต่ที่อุณหภูมิ 1,000 °C กลับพบว่าผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึกอย่างเห็นได้ชัด ดังจะเห็นได้ จากผลการทดลองในรูปที่ 2.5 จากรายงานของ Li et al. [19] ที่กล่าวมาข้างต้น นี้ทำให้เห็นว่าผลของการให้ความร้อนที่สูงเกินไปนั้นมีผลทำให้โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงและขนาดผลึกก็มีขนาดโตขึ้น ซึ่งอาจส่งผลที่ไม่ดีต่อประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำก็อาจเป็นข้อดีเช่นกัน คือโครงสร้างของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (โครงสร้างแบบอนาเทสเท่านั้น)และได้ผลึกที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรตามต้องการ

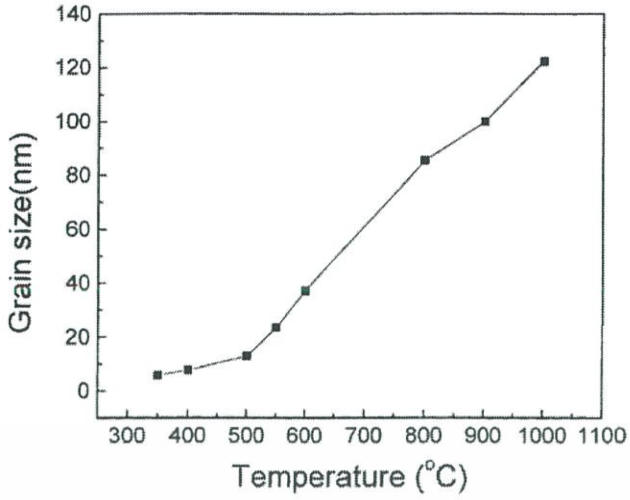
ตารางที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อขนาดผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	100°C	500°C	700°C	900°C
แบบอนาเทส	0	14.5	41.1	72.3
แบบรูไทล์	0	0	0	77.1

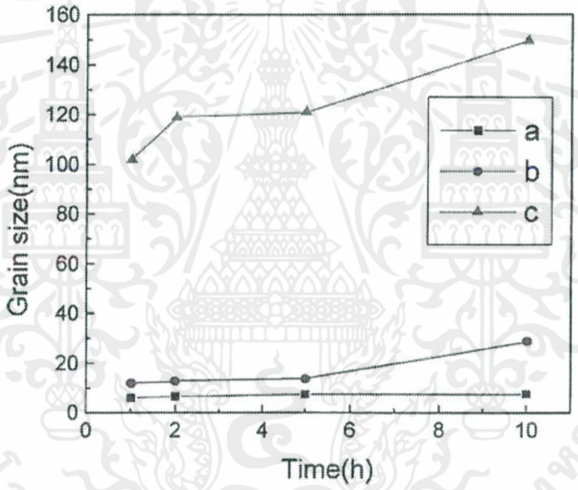


รูปที่ 2.3 ผล XRD ของการให้ความร้อนแก่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อขนาดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์



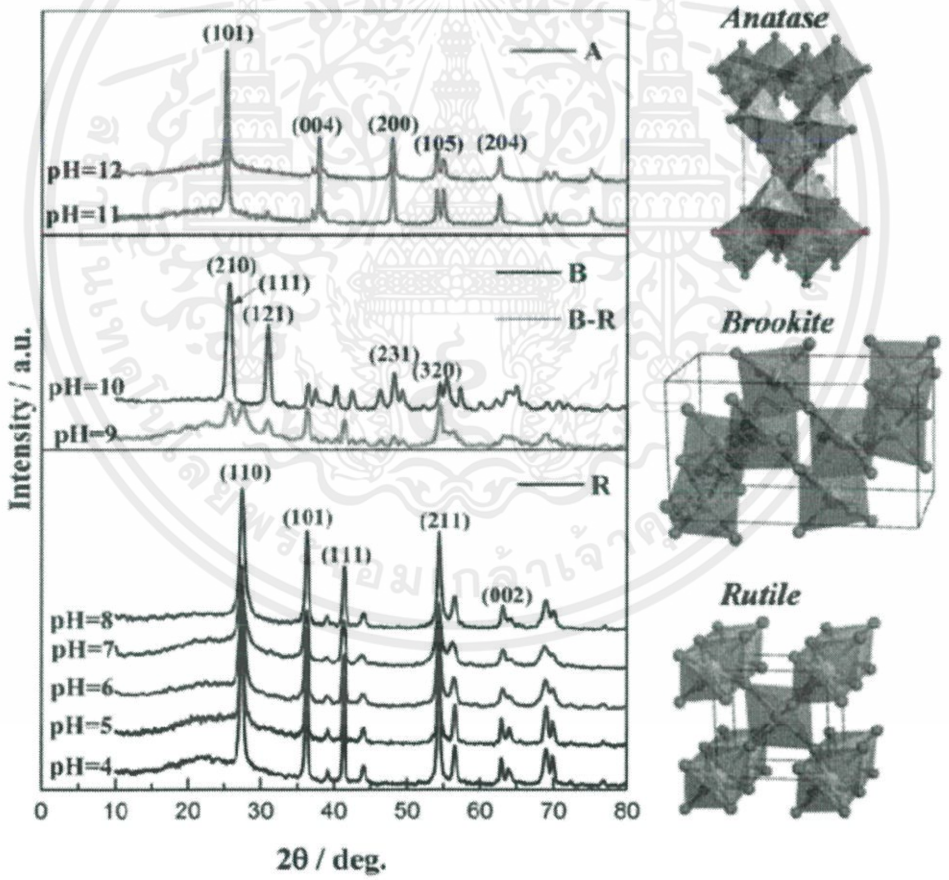
รูปที่ 2.5 ผลของเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อขนาดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ (a อุณหภูมิ 350 °C (b) อุณหภูมิ 500 °C (c) อุณหภูมิ 1,000 °C

2.1.3.3 ผลของค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่อสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ [20]

นอกจากความร้อนจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกแล้ว ค่าความเป็นกรดเป็นด่างก็มีผลต่อสมบัติโครงสร้างผลึกเช่นกัน ในรายงานของ Zewei Yang และคณะได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับค่าความเป็นกรดด่างที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ โดยขั้นแรกจะตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาบนโครงสร้างผลึกของแท่งไททาเนียมเออกไซด์และแนวทางซึ่งชี้ให้เห็นว่าการควบคุมผลึกของแท่งไททาเนียมไดออกไซด์นั้นสามารถทำได้โดยเพียงแค่ปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายเปอร์ออกไซด์ไททานิค (peroxide titanic acid : PTA) โดยโครงสร้างผลึกของแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของแท่งไททาเนียมได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย PTA ยอดการแผ่รังสีของแท่งไทนาเนียมไดออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 11 และ 12 มีผลต่อระยะอนาเทสที่ตกผลึกได้ดี ยอดการแผ่รังสีของแท่งไทนาเนียมไดออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 4-8 สอดคล้องกับระยะรูไทล์ และยอดการแผ่รังสีของแท่งไทนาเนียมไดออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 10 ระยะบรูคไคล์ กลไกการตกผลึกของแท่งไททาเนียมไดออกไซด์เหล่านี้ได้มีข้อมูลการสนับสนุนซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างของ PTA ในกระบวนการสังเคราะห์มีส่วนสำคัญในระยะโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงของ PTA มีส่วนทำให้เกิดผลึกอนาเทสด้วยพันธะร่วมกันระหว่างยอด สภาวะความเป็นกรดเป็นด่างต่ำช่วยในการสร้างแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการเชื่อมพันธะระหว่างขอบ ภายใต้สภาวะของความเป็นกรดเป็นด่างของ PTA 10 ซึ่งอยู่ระหว่างค่าความเป็นกรดเป็นด่างของการผลึกอนาเทส และการสร้างผลึกรูไทล์พบว่าผลึกบรูกไคล์ มีโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบขอบและแบบยอดรวมกัน ซึ่งโครงสร้างผลึกได้ส่งผลต่อขนาดของแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ด้วย ดังในหัวข้อ 2.1.3.2



รูปที่ 2.6 ภาพซ้าย) ผลของค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่มีต่อโครงสร้างผลึก ภาพขวา) โครงสร้างของผลึกอนาเทส,บรูกไคล์ และ รูไทล์ ; ลูกสีแดงหมายถึงอะตอมของออกซิเจน, ลูกสีเทาแทนอะตอมของไททาเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมีมีความเป็นพิษต่ำราคาไม่สูงมากและสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์อีกหลายอย่างทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง สามารถใช้งานในขนาดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผงละเอียดและนำมาประยุกต์ในรูปแบบของฟิล์มบาง โดยนำไปเคลือบบนผิววัสดุรองรับ เช่น กระจกเพื่อให้ได้กระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ (Self–cleaning)และใช้ทำเป็นตัวตรวจวัดก๊าซ (Gas sensor) เช่น ก๊าซประเภทแอลกอฮอล เป็นต้น [2] และประสบความสำเร็จมากที่สุดในการถูกใช้เป็นชั้นกลางเพื่อขนส่งอิเล็กตรอน จากการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีโครงสร้างนาโนมิติเดียว (1D) เนื่องจากสามารถเพิ่มการแยกประจุไฟฟ้าและเป็นเส้นทางสำหรับการขนส่งประจุไฟฟ้าได้ดีมากขึ้น ดังนั้นการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงมีบทบาทสำคัญในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนโดยการไฮโดรเทอร์มอล

2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง [21-24]

ขั้นตอนของการผลิตฟิล์มบางนั้นมีด้วยกันหลายวิธี และอาจแบ่งชนิดตามการเปลี่ยนสถานะของสารในการปลูกฟิล์ม โดยทั่วไปแล้วในการปลูกฟิล์มหรือเคลือบสารนั้นจะพิจารณาจากวัสดุ (source)ที่จะนำมาปลูกฟิล์มว่าอยู่ในสถานะใดซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว ไอระเหย หรือก๊าซ จากนั้นก็จะพิจารณาในเรื่องการนำส่งวัสดุไปยังฐานรอง(Transport) ซึ่งการนำส่งนั้นก็จะแบ่งได้เป็นการนำส่งในสภาวะสุญญากาศ (Vacuum), ของไหล (Fluid) หรือ พลาสมา (Plasma) โดยเทคนิคพื้นฐานในการผลิตฟิล์มบางมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังเช่น เทคนิคการเคลือบสารด้วยการระเหยของแข็ง (Physical Vapor Deposition), เทคนิคการเคลือบสารด้วยปฏิกิริยาเคมีของไอระเหยก๊าซ (Chemical vapor deposition) ซึ่งในกระบวนการปลูกฟิล์มดังกล่าวจะพิจารณาได้จากแผนภาพ ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 กระบวนการในการเตรียมฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของแข็งที่เป็นระดับนาโนที่มีโครงสร้าง 1 มิติ เพื่อที่จะใช้ในการปรับแต่งสมบัติด้านหน้าพื้นผิวของธาตุหรือเครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ และทางด้านอุปกรณ์ทางอิเลคทรอนิกส์ ซึ่งมีหลายวิธีที่ทำการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนฐานรองรับตามที่แสดงในตารางที่ 2.3 และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิคในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 เทคนิคการปลูกฟิล์มบางโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 มิติ [23]

TiO_2 nanostructure	Synthesismethods
TiO_2 nanorods	Sol-gel method
	Hydrothermal method
	Chemical vapor deposition

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิค [24]

Synthesis methods	Advantages	Disadvantages
Sol-gel template	- Less energy consumption - Better homogeneity - Better control of the structure	- Cost of precursors - Shrinkage of a wet gel which often leads to fracture - Preferential precipitation of a particular oxide - Difficult to avoid residual porosity and OH groups
Chemical vapor deposition	- May accommodate several substrates - Uniform substrate temperature - Different orientations of substrate	- Deposition occur not only at the substrate - Precursor is large and difficult to control - Gas-phase reactions may occur

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

Hydrothermal	- Simple route to obtain nanorods morphology for large scale production - A number of modifications can be used to enhance the attributes of titanium nanotubes - High cation-exchange capacity and length-to-diameter ratio	- Long reaction duration is needed Highly concentrated NaOH - Difficult in achieving uniform size Thermal unstable

สรุปจากตาราง 2.4 จึงทำให้วิธีไฮโดรเทอร์มอลได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากขั้นตอนง่ายๆและต้นทุนการผลิตต่ำและปีนเทคนิคที่สามารถเปลี่ยนแปลงเกือบ 100% ของสารตั้งต้นไปโครางสร้างไททาเนียมไดออกไซด์แบบ 1 มิติ ในกระบวนการเดียว ขณะที่วิธีการระเหยเป็นไอทางเคมี และการควบแน่นของไอระเหย ทำให้สารจำนวนมากที่เกิดการสูญเสียโดยไปติดเกาะอยู่กับห้องสุญญากาศ และทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นด้วย

2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล [25-32]

การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เป็นกระบวนการที่สารละลายหรือ สารแขวนลอยของสารตั้งต้นในน้ำ เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงในภาชนะภายใต้ความดัน เป็นการสังเคราะห์ทางเคมีของผลึก หรือ ผงเซรามิกออกไซด์ที่ปราศจากน้ำที่แตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ เช่น โซล-เจล หรือการตกตะกอนร่วมโดยอาศัยอุณหภูมิและความดันในการเกิดปฏิกิริยาดัง อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 100 °C จนถึงอุณหภูมิวิกฤตที่ 374 °C และความดันสูง ถึง 15 MPa สภาวะจำเพาะที่ใช้ในการรักษาเฟสของสารละลายให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวล เพื่อให้เกิด การเปลี่ยนเฟส ผลโดยรวมของความดันและอุณหภูมิสามารถลดพลังงานอิสระ สำหรับการเกิดเฟสที่เสถียรได้ที่ความดันปกติ กลไกของกระบวนการเกิดอนุภาคเซรามิกออกไซด์อธิบายได้เป็นกระบวนการละลายและการตกตะกอน หรือกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายใน กลไกของการละลายและการตกตะกอนเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของสารตั้งต้นซึ่งเป็นออกไซด์ไฮดรอกไซด์หรือองค์ประกอบของออกไซด์สามารถละลายเข้าสู่สารละลายเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัว เกิดเป็นปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะดังกล่าวข้างต้น และตกตะกอนเป็นอนุภาคของผลิตภัณฑ์ แรงกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามาจากความแตกต่างของการละลายได้ระหว่างเฟสออกไซด์และสารตั้งต้นที่ละลายได้ น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหลายกรณีสารตั้งต้นแขวนลอยไม่สามารถละลายได้เพียงพอในน้ำจึงต้องเติมมิเนอราไล-เซอร์ (Mineralizer) เช่น เบสหรือกรด อนุภาคเซรามิคเกิดโดยผ่านกลไกการเปลี่ยนแปลงภายใน ที่อนุภาคแขวนลอยเกิดพอลิมอร์ฟิค (Polymorphic) หรือการเปลี่ยนแปลงเฟสทางเคมีในบาง กรณีกลไกอาจเกิดทั้งสองกรณีขึ้นกับสภาวะการสังเคราะห์ กระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลของมีข้อได้เปรียบ 2 ประการ คือสามารถกำจัดหรือลดให้น้อยลงของขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิสูง และการใช้สารตั้งต้นราคาไม่แพง

ข้อได้เปรียบของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการนี้ใช้สารตั้งต้นที่มีราคาไม่แพง
2. สารตั้งต้นที่ระเหยที่อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาสามารถควบแน่นระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อรักษาปริมาณสัมพันธ์
3. กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C ในกรณีที่เทฟลอนเป็นภาชนะบรรจุสารภายในจะใช้อุณหภูมิไม่เกิน 250 °C ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวของเทฟลอน การใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนี้ภายใต้ความดันจะพอเพียงที่สลายตัวสารตั้งต้นที่เสถียรและป้องกันการรวมตัวกันของสารผลิตภัณฑ์ซึ่งมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงในปฏิกิริยาโซลิตสเตท (Solid-state)
4. กระบวนการนี้สามารถผลิตอนุภาคสารละลายของแข็ง (Solid solution) ที่ควบคุมการกระจายของขนาดสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อน
5. การสังเคราะห์กระทำภายในระบบปิดซึ่งสารเคมี สามารถนำกลับมาใช้ได้ จึงเป็นกระบวนการที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม
6. กระบวนการนี้สามารถขยายกำลังผลิตสู่ระบบอุตสาหกรรมในราคาที่ต้นทุนต่ำ

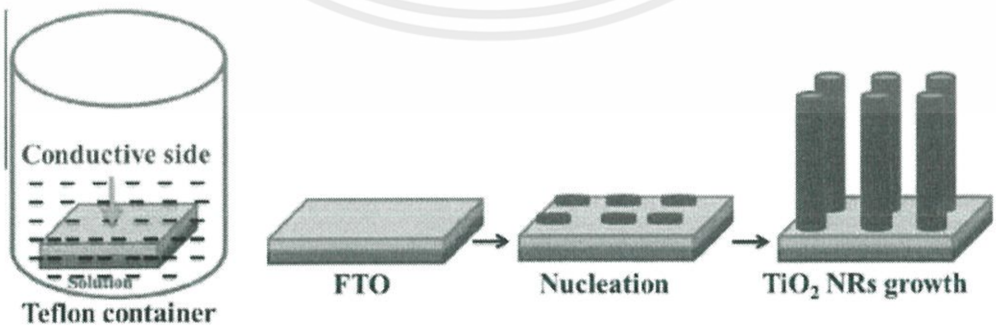
ข้อด้อยของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ได้แก่

1. เครื่องมือราคาค่อนข้างแพง
2. มีข้อควรระวังเกี่ยวกับกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความดันสูง
3. การสึกกร่อนของเครื่องมือที่เกิดจากกรดหรือเบสที่เป็นมิเนอราลไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 หลักการเกิดฟิล์มบางแท่งนาโนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [33-36]

การเติบโตของแท่งนาโน มีการดำเนินการสองขั้นตอน: (1) การก่อตัวของคริสตัลนิวเคลียสเป็นชั้นเริ่มต้นโดยกระบวนการเคลือบ และ (2) การก่อตัวและการเจริญเติบโตของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จากรายงานของ Akshay Kumar และคณะได้อธิบายธรรมชาติการเจริญเติบโตของผลึกเป็นส่วนใหญ่โดยกำหนดโดยการเติบโตสัมพัทธ์ของโครงสร้างผลึกต่างๆซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายใน ปัจจัยของผลึกที่กำหนดและสภาวะภายนอกเช่น อุณหภูมิ,ความเข้มข้นของสารตั้งต้นค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายและอื่น ๆ ในหลักการเราสามารถปรับการสังเคราะห์ได้เงื่อนไขเพื่อให้ระบบมีวิวัฒนาการกับพื้นผิวที่น้อยที่สุดพลังงานนั่นคือภายใต้เงื่อนไขที่ Thermodynamically ในกรณีของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกออกตะฮีดรอลทุกอะตอมไททาเนียมถูกผูกไว้เป็นหกอะตอมออกซิเจนเป็นรูปแปดเหลี่ยม TiO_2 $^{6-}$ ซึ่งแบ่งเป็นคู่ของขอบด้านตรงข้ามกับรูปแปดมุมถัดไปสร้างโซ่โครงสร้างขึ้นอยู่กับจำนวนมุมและขอบของรวมกันอัตราการเติบโตของระนาบโครงผลึกที่ต่างกันต่างกันและตามลำดับ (110) <(100) <(101) <(001) การเจริญเติบโตของไททาเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย การเกิดปฏิกิริยาในปัจจุบันการก่อตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ กลไกการเจริญเติบโตที่เป็นไปได้ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่จัดอยู่ในแนวตั้งแท่งนาโนบนพื้นผิวฐานรองรับ จากรายงายของ Ananthakumar และคณะได้นำสารตั้งต้น Titanium -n-butoxide ผสมกับสารละลายกรดหรือเบสเข้มข้น ที่อุณหภูมิห้อง Titanium -n-butoxide ทำปฏิกิริยากับกับกรดหรือเบสและน้ำจะเกิด Ti_4 $^{+}$ อิสระในสารละลาย โดยสารละลายเมื่อทำให้เกิดความร้อน Ti_4 $^{+}$ ที่มีจะมีพลังงานสูงสามารถไฮโดรไลซ์กับน้ำที่อินเตอร์เฟซของพื้นผิวฐานรองรับโดยที่น้ำทำให้เกิดการก่อตัวของไททาเนียมไดออกไซด์คริสตัลนิวเคลียสหรือเริ่มต้นในระนาบ(001) หรือแกน C จากนั้นนิวเคลียสก็เกิดการทับถมขึ้นในแนวตั้งกับพื้นผิวของพื้นผิวด้วยการต่อเนื่อง เนื่องจากรายงานของ Akshay Kumar ที่อธิบายเกี่ยวกับพลังงานในระนาบผลึก ซึ่งเห็นว่า ระนาบ(001) มีพลังงานมากที่สุด ซึ่งการเกิดนิวคลีเอชันนั้นพลังงานพื้นผิวจะต้องต่ำ จึงทำให้ Ti_4^+ อิสระที่อยู่ในสารละลายเกิดการทับถมมายังระนาบ (001) หรือ แกน C เกิดเป็นแท่งขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



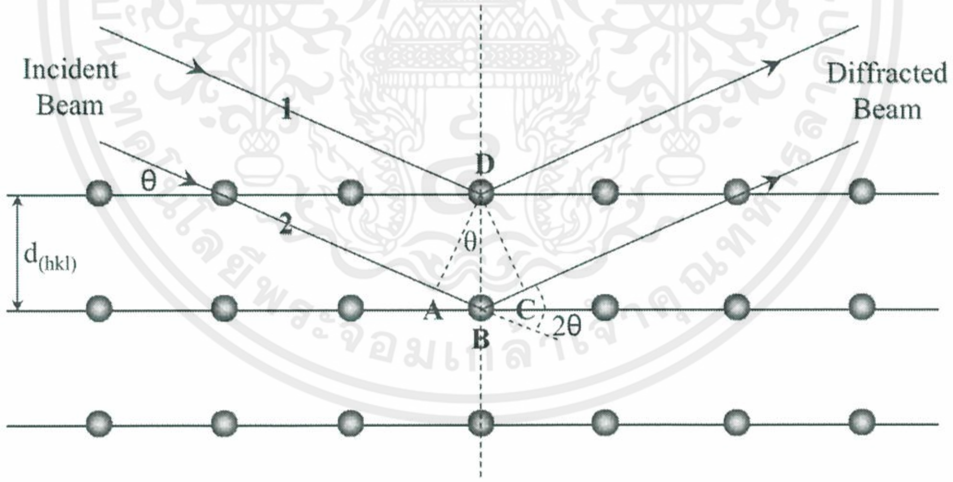
รูปที่ 2.8 การเกิดแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม [21]

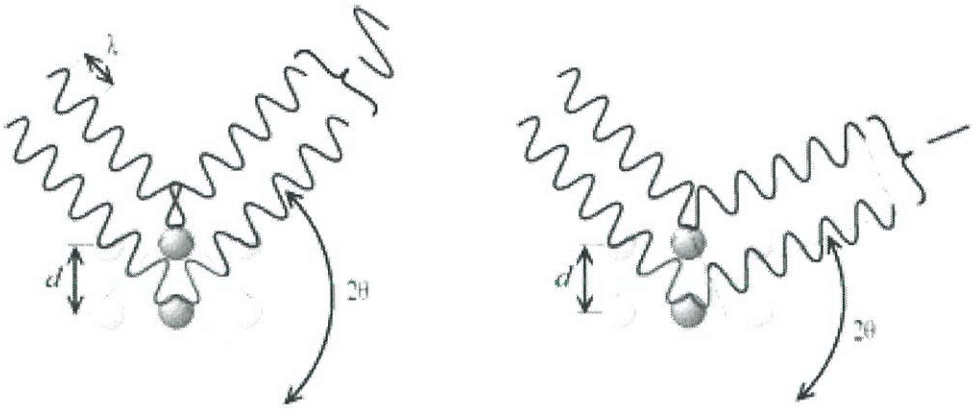
2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มทำให้เราทราบว่าฟิล์มนั้นมีค่าคงที่แลตติช (Lattice constant) เท่าใดและมีระนาบอะไรบ้างในฟิล์มรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.5-2.5 $\dot{A}$ รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงมากวิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนักเช่นทองแดง ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิด คือรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงคลื่นคือเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างกันถ้าหากพิจารณาเฉพาะบริเวณที่รังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอมรังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาคคือกระเจิงออกทุกทิศทางเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับอะตอมซึ่งเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงสร้างผลึกอะตอมนี้ จะทำหน้าที่กระเจิงรังสีเอกซ์ทำให้มีสภาพเหมือนกับว่ารังสีเอกซ์ที่ตกกระทบลงมามีการสะท้อน



รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในกรณีคลื่นแทรกสอดและเสริมกัน

พิจารณารูปที่ 2.10 เมื่อมีรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึกโดยระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d จากรูปรังสีเอกซ์ตกกระทบที่จุด D และ B ทำมุมθ กับระนาบแล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุมθ ผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากับ AB + BC ซึ่งเท่ากับ 2dsinθโดยการแทรกสอดแบบเสริมของรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อผลต่างทางเดินรังสีจะต้องมีค่าเท่ากับ nλโดย n เป็นจำนวนเต็ม และ λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \tag{2.1}$$

เมื่อ n = ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

สมการที่ (2.1) เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law)ในทางผลึกวิทยา (Crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆโดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (h k l) ซึ่งค่า*hkl*เรียกว่าดัชนีมิลเลอร์(Miller indices) เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0,1,2,... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และค่าคงที่ของโครงผลึก (a, b, c, α,β ,γ) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกจะมีต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่างๆ

ในกรณีอย่างง่ายเมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบ cubic ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกดังนี้ a = b = c, α = β = γ = 90°C จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \tag{2.2}$$

จากสมการ (2.2) เมื่อ n = 1 แทนใส่ในสมการ (2.3) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

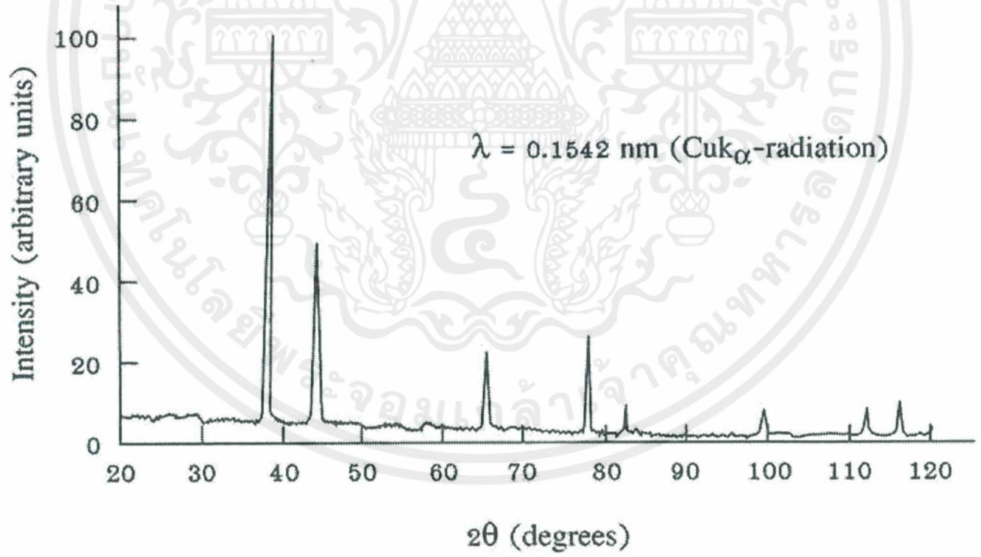
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4\sin^2\theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \qquad (2.3)$$

เมื่อ a หมายถึง ค่าคงที่แลตทิช

λ หมายถึง ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ หมายถึง มุมของการเลี้ยวเบน

ระนาบต่างๆในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไประนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อนเมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมาไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆจะถูกตรวจหาค่าทั้งสองจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่าแบบอย่างการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกันเมื่อได้ข้อมูลที่กล่าวมาแล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้ (Grain size)

$$D = \frac{K\lambda_X}{\beta_{2\theta}\cos\theta} \tag{2.4}$$

เมื่อ D หมายถึง ขนาดของเม็ดผลึก

K หมายถึง ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก

$(0.89 \le K \le 0.94)$

θ หมายถึง มุมของการเลี้ยวเบน

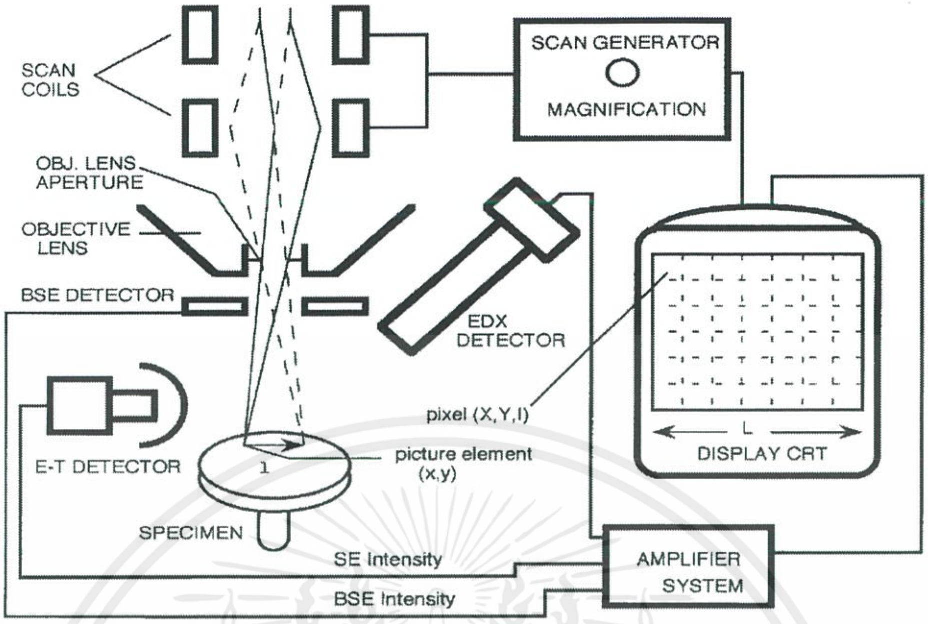
$\beta_{2\theta}$ หมายถึง ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-Maximum of the diffraction peak : FWHM)

λ_X หมายถึง ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.3.2 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Flied Emission ScanningElectron Microscope : FE-SEM)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดพิจารณาได้จากรูปที่ 2.12 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดได้ดังนี้แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นขั้วแคโทดมีอยู่ 3 ชนิดคือทังสเตน, Lanthanum Hexaboride (LaB6), และ Field emission ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจาก Filament และเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 - 40 kV และกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดย Condenser lens และปรับโฟกัสโดย Objective lens และถ้าต้องการให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปทั่วผิวของตัวอย่างก็สามารถควบคุมได้โดยใช้ Scanning coils ซึ่งจะกวาดบนระนาบ x-y ทำให้เกิดสัญญาณขึ้นมาแล้วหัววัด (Detector) จะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นและถูกแปลงเป็นข้อมูลที่ต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนโฟกัสลงบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมาและอะตอมของตัวอย่าง อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมากับอะตอมของตัวอย่างสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามลักษณะการชนคือแบบยืดหยุ่น (Elastic) และแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะให้สัญญาณที่จะนำมาใช้งานแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

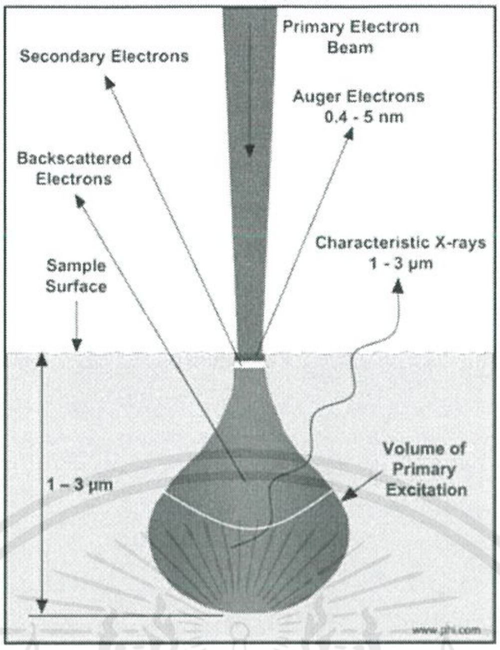
1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ตกกระทบลงบนตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมาและมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนซึ่งน้อยมากให้กับอะตอมของตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาเราเรียกว่า Backscatter electron ซึ่งสามารถนำสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณภาพบนจอ CRT ได้

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

กลุ่มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิเมื่อชนกับอะตอมของตัวอย่างแล้วจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์และเกิดอันตรกิริยากันกับอะตอมของตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณต่างๆซึ่งเป็นสัญญาณที่ Detector สามารถวัดได้ได้แก่อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons), Auger electrons, Characteristics X-ray, Continuous X-ray และ Fluorescence X-ray เป็นต้นดังรูปที่ 2.13 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นโคจร (Shell) ต่างๆของอะตอมตัวอย่างถ้าพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรกับนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรหลุดออกมาเราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาลักษณะผิวหน้าของตัวอย่างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) [37-53]

2.4.1 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.1.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy)

ปัจจุบันดวงอาทิตย์ส่งพลังงานมหาศาลออกมาในรูปของความร้อนและรังสีที่เรียกว่าพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ไร้ขีดจำกัด ซึ่งไม่มีค่าใช้จ่าย ประโยชน์หลักของแสงอาทิตย์ พลังงานมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ ทั่วไปคือแสงแดดสามารถเก็บเกี่ยวโดยตรงเป็นพลังงานแสงอาทิตย์โดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) ดวงอาทิตย์ถูกสมมุติว่าเป็นเมฆก๊าซทรงกลมใหญ่ประกอบไปด้วยไฮโดรเจนหลายชนิดรวมกันเพื่อสร้างพลังงานฮีเลียมด้วยการปล่อยพลังงานจากการรวมตัวของฮีเลียม นิวเคลียสไฮโดรเจนในแกนชั้นในของดวงอาทิตย์ผ่านนิวเคลียร์ฟิวชัน ในระหว่างกระบวนการฟิวชันอะตอมไฮโดรเจนทั้งสี่จะรวมกันเป็นอะตอมของฮีเลียมหนึ่งตัวที่มีมวลสูญเสียซึ่งถูกฉายเป็นพลังงานความร้อน หนึ่งในประโยชน์ที่ใหญ่ที่สุดของพลังงานแสงอาทิตย์คือว่ามันเป็นฟรีเข้าถึงได้กับคนทั่วไปและมีอยู่มากมายอุปทานเมื่อเทียบกับราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลต่างๆและน้ำมันในทศวรรษที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้นพลังงานแสงอาทิตย์ต้องใช้กำลังคนน้อยกว่าเทคโนโลยีการผลิตพลังงานแบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้ได้ทุกที่ แต่ก็ยังมีค่าใช้จ่ายเริ่มต้นสำหรับการสร้างและเก็บพลังงานนี้โดยการพัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์และโมดูลให้มีขนาดเล็ก ด้วยข้อด้อยหลายประการโดยพลังงานนี้มีข้อจำกัดด้วยประการแรกพลังงานแสงอาทิตย์ไม่แผ่กระจายที่กลางคืน ประการที่สองพลังงานแสงอาทิตย์เกือบจะไม่คงที่ตลอดเวลา ต้องมีแสงแดดเป็นจำนวนมากเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นอกเหนือจากความผันผวนรายวันในความเข้มของพลังงานที่แผ่กระจายออกมาทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ถูกกีดขวางเพื่อให้เข้าถึงโลกในช่วงสภาพภูมิอากาศที่ไม่ดี สำหรับตัวอย่างเช่นปริมาณของแสงแดดที่มายังพื้นผิวโลกขึ้นอยู่กับสถานที่เวลาและสภาพอากาศเช่นนี้ตกในช่วงฤดูหนาวเมื่อเทียบกับฤดูร้อนและรังสีดวงอาทิตย์รุนแรงน้อยปัญหาเหล่านี้ของเทคโนโลยีนี้พลังงานแสงอาทิตย์จะต้องเก็บไว้ที่อื่นในเวลากลางคืนและมีประสิทธิภาพสูงเซลล์แสงอาทิตย์และโมดูลต้องได้รับการพัฒนา

มีงานวิจัยจำนวนมากที่สามารถเก็บพลังงานของดวงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการพัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงสูง ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ถูกอ้างถึงประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์และถูกกำหนดให้เป็นส่วนของพลังงานของดวงอาทิตย์ที่สามารถแปลงเป็นไฟฟ้า แต่การจัดเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงไม่ประสบผลสำเร็จปัจจุบันประสิทธิภาพในการแผ่รังสีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นถึง 22% แต่จำเป็นจะต้องมีแบตเตอรี่จำนวนมากที่ใช้ซึ่งมักจะมีราคาแพงและใหญ่ เหมาะสำหรับบ้านพักอาศัยขนาดเล็กหรือบ้านพักอาศัยเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

2.4.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิคที่สร้างขึ้นเพื่อ เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า สามารถจำแนกกลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ออกได้ 4 กลุ่ม ได้แก่

เซลล์กลุ่มแรก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (silicon solar cells) เป็นกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถนำมาใช้ประกอบเป็น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าในอาคารบ้านเรือนได้ดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือราคาแพง เนื่องจากกระบวนการผลิตซิลิกอนที่บริสุทธิ์มากต้องใช้เทคโนโลยีชั้นสูงและต้นทุนสูง

เซลล์กลุ่มที่สอง เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ (III-V solar cells) เช่นเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกแกลเลียมอาเซไนที่นิยมใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับดาวเทียม

เซลล์กลุ่มที่สามและสี่ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye- sensitized solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (organic solar cells) เซลล์สองกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า แต่ว่าราคาต่ำกว่าจึงเป็นที่สนใจศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพและประสิทธิผลของเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ให้มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อความชัดเจนในการศึกษาดังกล่าว ผู้วิจัยจึง เลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะศึกษาเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อาทิ ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ใช้วัสดุปริมาณน้อยวัสดุที่ใช้ประกอบเซลล์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงแสงและเชิง ไฟฟ้าเคมีได้ตามต้องการ ทั้งยังสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นขนาดต่างๆ ได้ง่ายและมีน้ำหนักเบาเป็นต้น การประยุกต์ใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเคลื่อนที่รวมทั้งการประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เพื่อพัฒนาในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต เซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วย

1. ขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแคโทดทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนแล้วถ่ายโอนไปให้วงจรไฟฟ้าภายนอก นิยมใช้โลหะอลูมินัม (Al) หรือทอง (Au) และ ขั้วไฟฟ้าแอโนดทำหน้าที่รับประจุบวก (hole) นิยมใช้ กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง

2. สารกึ่งตัวนำเป็นส่วนประกอบหลัก จำแนกเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ซึ่งมีสมบัตินำโฮลไดดีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งมีสมบัตินำอิเล็กตรอนไดดี สารกึ่งตัวนำทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์แล้วส่งผ่าน อิเล็กตรอนและโฮลให้กับขั้วแคโทดและแอโนด และสมบัติสำคัญของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ก็คือ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงสเปคตรัมที่กว้าง เพื่อให้ดูดกลืนโฟตอนไดปริมาณมากที่ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (molar absorptivity coefficient) สูงพรอมทั้งมีค่าการนำประจุสูง (high charge mobility) เป็นต้น

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์มีกลไกการทำงาน 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนี้

1. เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์แสงจะเดินทางทะลุผ่านกระจกโปร่งแสงมายังสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แล้วเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากสภาวะพื้นไปยังสภาวะกระตุน ส่งผลให้เกิดโฮล (hole, h+) ที่สถานะพื้นและมีอิเล็กตรอนอยู่ที่สภาวะกระตุ้น คู่ของโฮลและอิเล็กตรอนนั้น เรียกว่า เอกซิตอน (exciton)

2. คู่เอกซิตอนจะเคลื่อนที่และแพรไปยังรอยต่อ (interface) ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) หรือ donor และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือ acceptor

3. อิเล็กตรอนเคลื่อนไปที่ชั้นพลังงาน LUMO ที่ต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่โฮลยังคงอยู่ ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเช่นเดิม ขั้นตอนนี้เรียกว่าเกิด exciton dissociation

4. อิเล็กตรอนและโฮลถูกถ่ายโอนผ่านสารกึ่ง ตัวนำไปที่แคโทดและแอโนดตามลำดับ แลวออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก ขั้นตอนนี้เรียกว่า charge carrier collection

นอกจากนั้น หลักการแปลงพลังงานแสงเป็น พลังงานกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงอุดมคติว่าการสูญเสียพลังงานระหว่างกระบวนการย่อมเกิดขึ้นได้อันส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นลดลง โดยที่การสูญเสียพลังงานนั้นอาจเกิดจาก สาเหตุ 4 ประการ ไดแก่

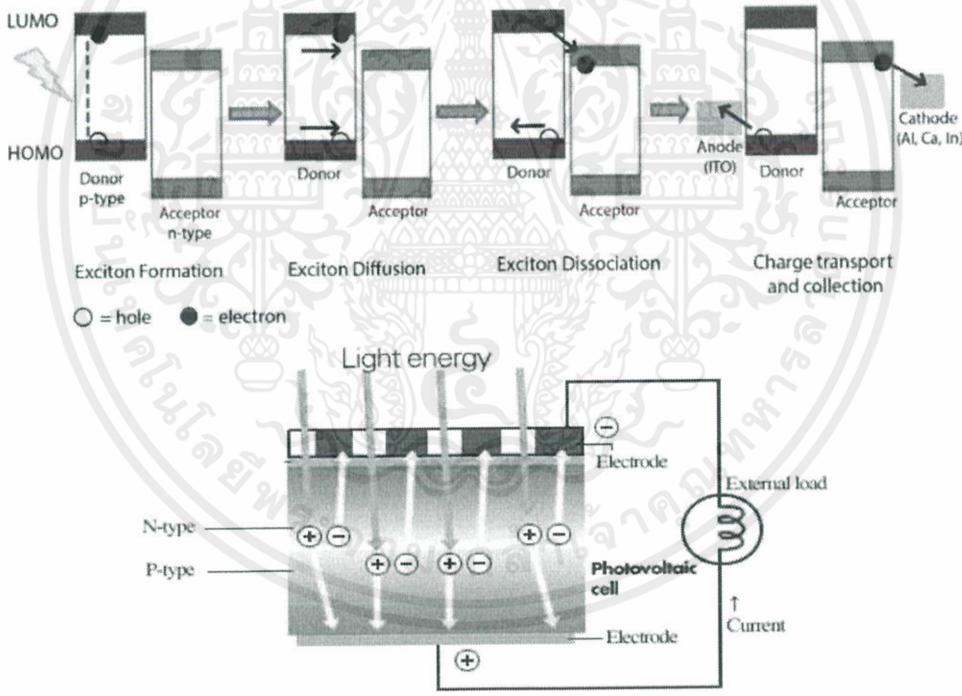
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ จำนวนโฟตอน ปริมาณน้อยอันเนื่องมาจากความสามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้น้อยสารกึ่งตัวนำเหล่านี้มักมีค่าช่องว่างระดับพลังงาน (Eg) ที่กว้างมาก

2. การการสูญเสียคู่เอกซิตอนเนื่องจากช่วงชีวิตของเอกซิตอนนั้นสั้นมากและมีระยะทางการแพร่ (diffusion length หรือ LD) เพียง 10 นาโนเมตร กรณีที่ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำมีค่ามากกว่าค่า LD แล้วจะทำให้เอกซิตอนเคลื่อนที่ไปไม่ถึงรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำพีและเอ็น

3. การเกิดประจุอิสระ (Free charge) ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮลลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัว (Recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

4. วัสดุกึ่งตัวนำพีและเอ็นมีค่าการเคลื่อนที่ของประจุน้อย (Low charge mobility) ทำให้เกิดการขนส่งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดได้น้อยส่งผลให้ปริมาณประจุที่เข้าไปในวงจรไฟฟ้าลดลงไปด้วย



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.1.3 วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกได้เป็น 3 รุ่น ดังแสดงรูปภาพ 2.15

1) เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 1

เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นแรกจะผลิตในแผ่นซิลิคอน มันเป็นที่เก่าแก่ที่สุด โดยประกอบด้วยมีสารกึ่งตัวนำ 1 ชั้น และถูกประกบด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 0.1% เพราะเกิดจากเอกซิตอนสามารถแยกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แค่ที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งระยะทางที่เอกซิตอนเดินทางได้มีระยะทางประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่น้อยมากก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกันและเปล่งแสง โดยจะแบ่งย่อยได้เป็น

1.1) เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยว

1.2) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน Poly/Multi-crystalline

2) เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบสารกึ่งตัวนำ p-type และ n-type และประกบด้วยขั้วไฟฟ้า เซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้จะเกิดรอยต่อขนาดใหญ่ตรงกลางเซลล์ทำให้เพิ่มการแยกคู่อิเล็กตรอนกับโฮล และเพิ่มประสิทธิภาพให้เซลล์แสงอาทิตย์เป็น 1-2% เท่านั้น

2.1) Amorphous-silicon

2.2) CdTe

2.3) Copper indium gallium di-selenide

3) เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้พัฒนามาจากรุ่นที่ 2 โดยทำให้สารกึ่งตัวนำชนิด p-type และ n-type ผสมกันเป็นสารลาย ทำให้เกิดรอยต่อมหาศาลเพิ่มการแยกคู่อิเล็กตรอนกับโฮล แต่ก็ยังมีข้อเสียคือสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมักชอบกลับมารวมตัวกัน โดยแบ่งเป็นกลุ่มย่อยดังนี้

3.1) Nano crystal based solar cells.

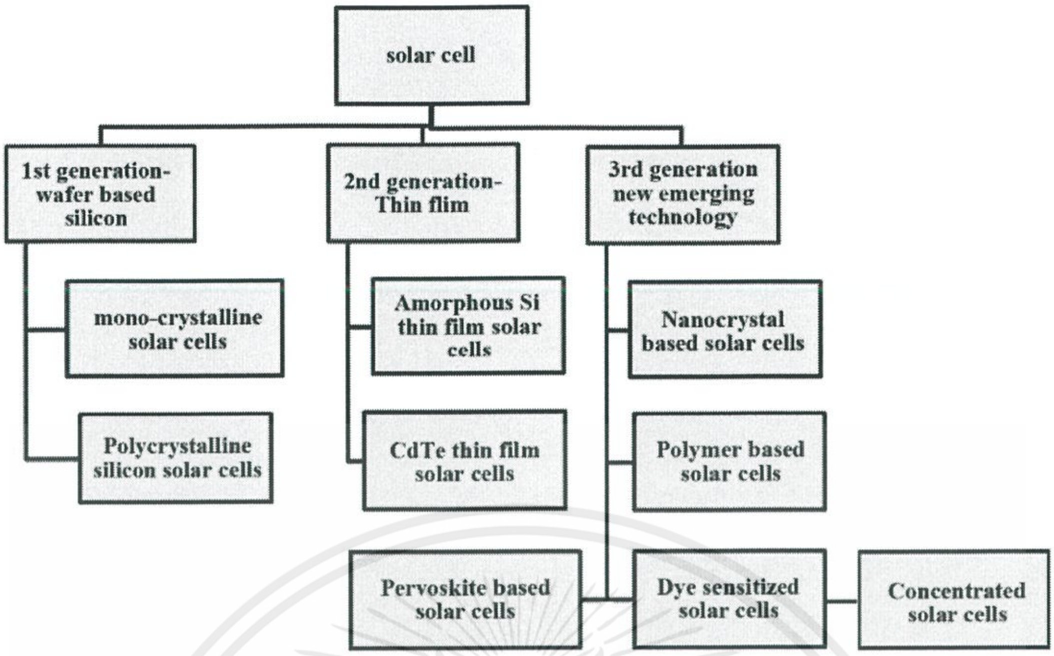
3.2) Polymer based solar cells.

3.3) Perovskite based solar cells

3.4) Dye sensitized solar cells.

3.5) Concentrated solar cells.

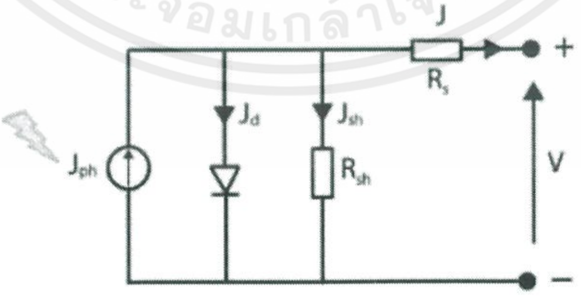
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์

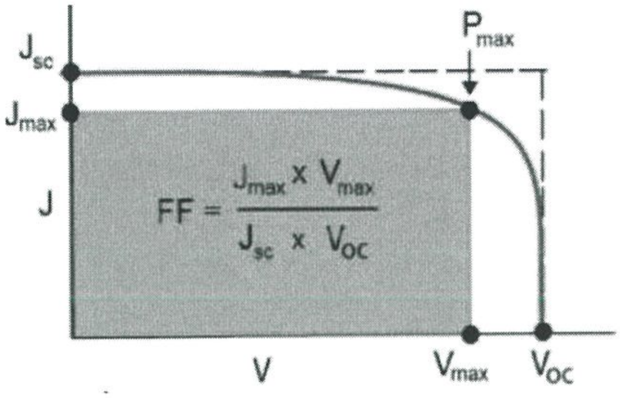
2.4.1.4 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์สามารถอธิบายได้จากจากวงจรสมมูลไฟฟ้า (Equivalent circuit) ของเซลล์ซึ่งเป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด และความต้านทานขนาน (Shunt resistance หรือ R_{sh}) แล้วต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม (Series resistance หรือ R_s) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดที่แตกต่างกันจึงนิยมแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ของเซลล์ (Current density, J) โดยผลลัพธ์ของกระแสต่อพื้นที่จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากค่ากระแสต่อพื้นที่ของแหล่งกำเนิดแสง (J_{ph}) หักลบด้วยค่ากระแสต่อพื้นที่ที่ไหลผ่านไดโอด (J_d) และ ผ่านความต้านทานขนาน (J_{sh})



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลไฟฟ้า (equivalent circuit) ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กราฟ J-V curve

จากกราฟมีกราฟ J-V curve ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ได้แสดงพารามิเตอรที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

เมื่อ J_{sc} หมายถึง กระแสลัดวงจรต่อขนาดพื้นที่เซลล์ หรือ short circuit current density

V_{oc} หมายถึง แรงดันวงจรเปิด หรือ open circuit voltage

FF หมายถึง Fill factor (สัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าสูงสุดกับผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันวงจรเปิด)

J_{max} หมายถึง ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่ หรือ current density

V_{max} หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด หรือ maximum potential

P_{in} หมายถึง ค่าพลังงานแสงที่ให้กับเซลล์ หรือ incident light power

P_{out} หมายถึง ค่าพลังงานที่ได้จากเซลล์

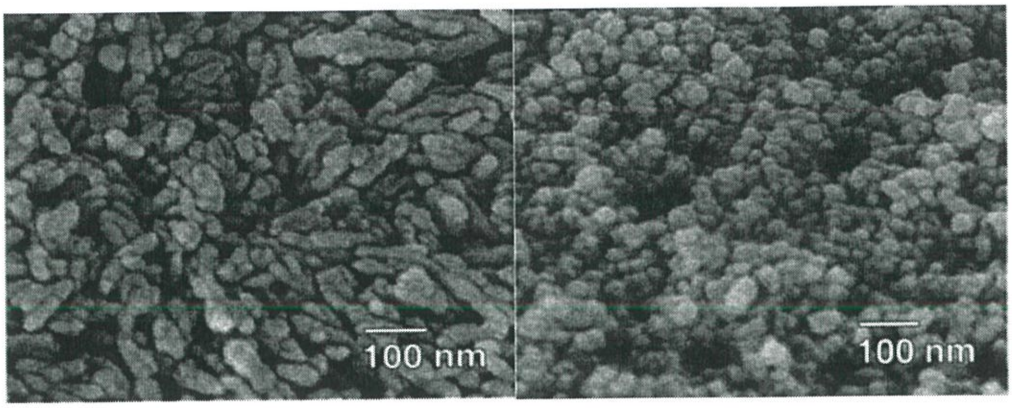
โดยประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.11

$$Eff = \frac{FF \times Isc \times Voc}{Pin} \tag{2.5}$$

2.4.2 งานวิจัยการนำไททาเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ [54]

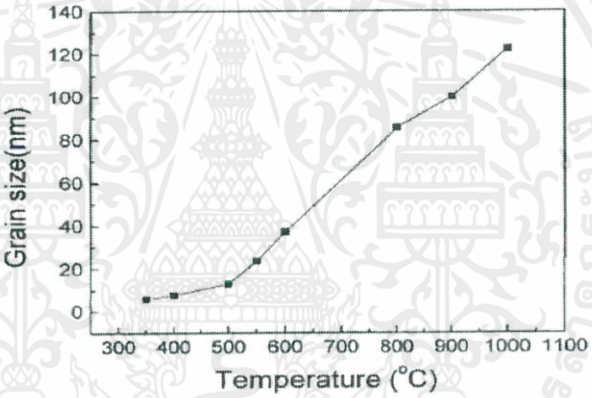
N.-G. Park และคณะ (2000) ได้ทำการปลูกฟิล์มนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ที่ความหนาไม่เกิน 12 μm โดยทำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบย้อมสี (dye-sensitized solar cells) และทำการเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการตรวจสอบพื้นผิวและเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

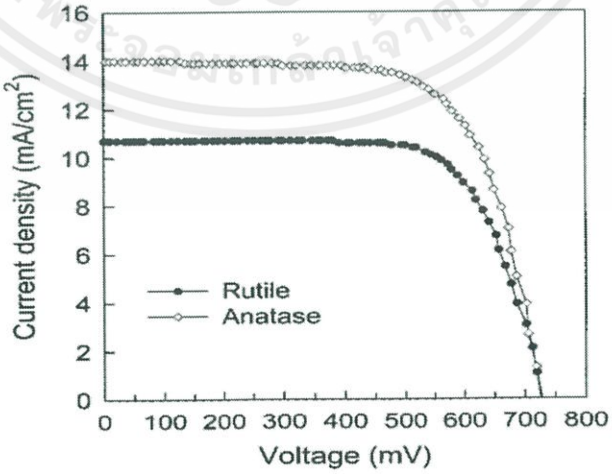


รูปที่ 2.18 ภาพจากเครื่อง SEM ภาพขวา) รูไทล์ ภาพซ้าย) อนาเทส

จากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบรูไทล์มีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่าผลึกแบบอนาเทส ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากกราฟแสดงขนาดของผลึกเทียบกับลักษณะผลึก ดังแสดงในรูป 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟการเปรียบเทียบขนาดของผลึกเทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของฟิล์มแบบรูไทล์และอนาเทส

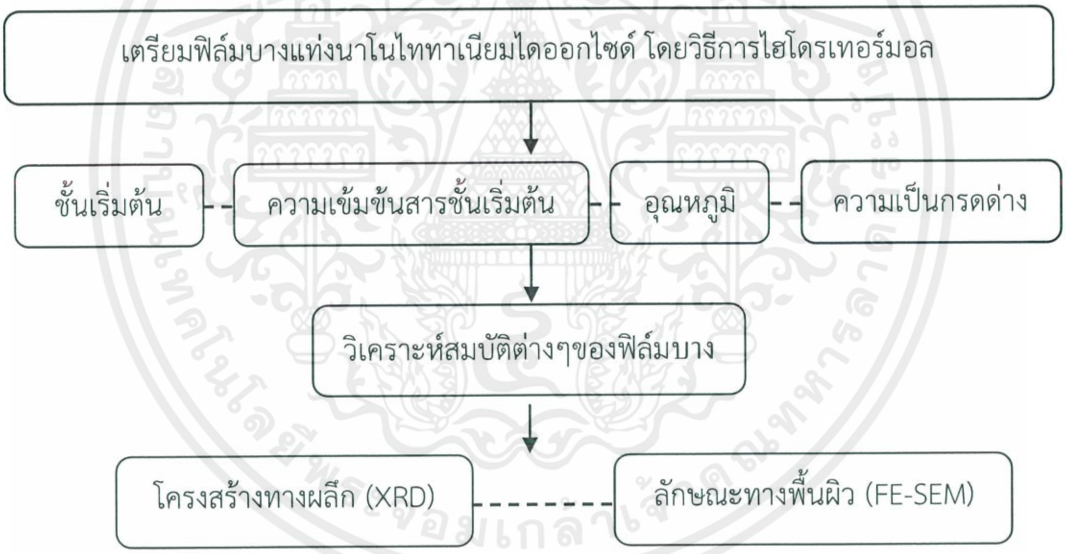
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทางผู้วิจัยได้นำฟิล์มทั้งสองมาประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มแบบรูไทล์มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า 5.6 % และฟิล์มแบบอนาเทสมีประสิทธิภาพ 7.1% ดังแสดงจากรูปที่ 2.20 ซึ่งทางผู้วิจัยได้อธิบายจากขนาดที่แตกต่างกันของผลึกทั้งสองแบบ โดยได้อธิบายว่าฟิล์มแบบอนาเทสมีเส้นทางการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากกว่าฟิล์มแบบรูไทล์ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าของฟิล์มแบบอนาเทสนั้นมีมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

หลังจากได้ทำการศึกษาถึงสมบัติของแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และหลักการของวิธีการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลแล้วในเบื้องต้น บทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และศึกษาผลของเงื่อนไขที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และสมบัติทางแสง ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางจะได้ทำการสร้างเงื่อนไขต่อไป และเมื่อตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง จะนำเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเตรียมฟิล์มบางสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางบนกระจำนำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์และจะทำการตรวจสอบคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยอธิบายได้ตามรูปที่ 3.1

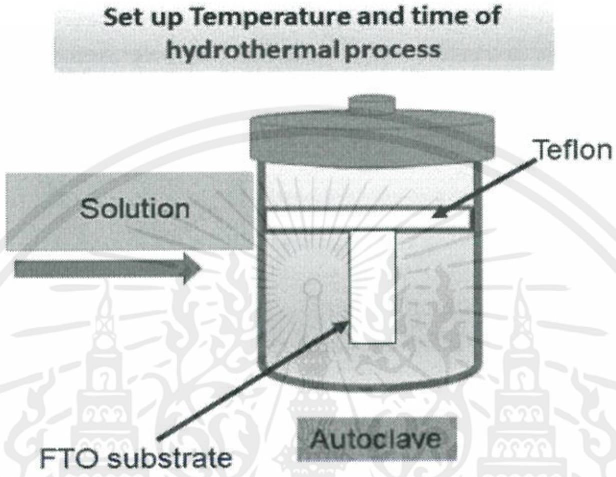


รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยการไฮโดรเทอร์มอล

โดยจากการศึกษาจากทฤษฎีเบื้องต้นพบว่า ระบบการเตรียมฟิล์มโดยใช้ไฮโดรเทอร์มอล มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ภาชนะที่ทนความร้อนและแรงดันที่สูง (Autocave),ฐานรองรับกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า,สารละลาย และ เตาอบสาร (Oven) โดยไดอะแกรมของระบบดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

3.1.1 องค์ประกอบของการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

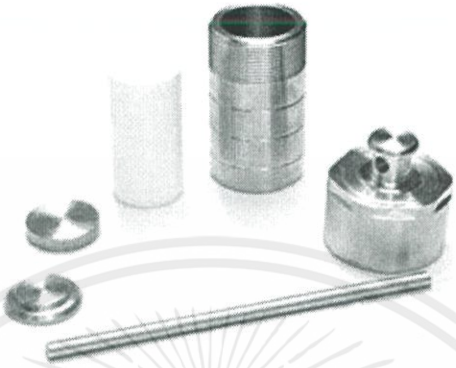
3.1.1.1 เตาอบสาร (Oven)

รูปที่ 3.3 เตาอบสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 ภาชนะทนความร้อนและแรงดัน (Autocave)

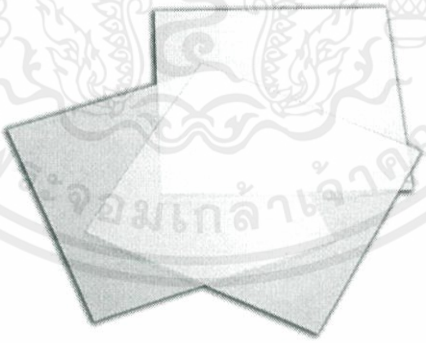
ภายในประกอบด้วย ถ้วยเทปลอน ภายใน พร้อมฝาเหล็กปิดเพื่อกันไม่ให้ของเหลวภายในไหลออก



รูปที่ 3.4 ภาชนะทนความร้อนและแรงดัน

3.1.1.3 กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า (Transparent Conductive Oxide)

กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า (Transparent Conductive Oxide หรือ TCO) คือวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่มีความโปร่งแสง ส่วนใหญ่มักทำมาจากออกไซด์ของโลหะที่เคลือบอยู่บนกระจก เช่น Tin-doped indium oxide (ITO) และ Fluorine-doped tin oxide (FTO)

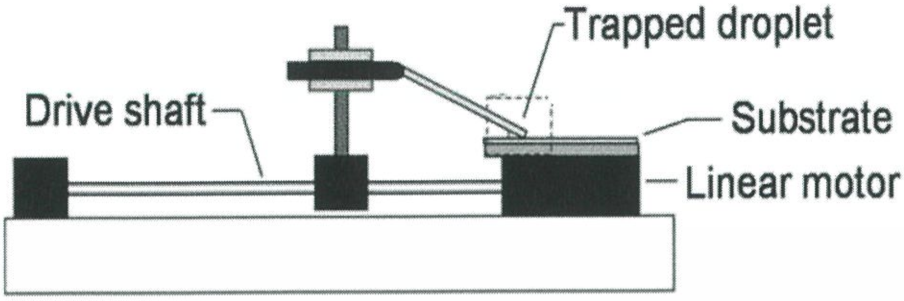


รูปที่ 3.5 กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า (Transparent Conductive Oxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.4 เครื่องเคลือบปาด (Convective Coating Machine)

ในการเตรียมชั้นเริ่มต้นกับฐานรองรับในงานวิจัยนี้ใช้วิธีเคลือบปาด โดยจะประกอบด้วย แท่งเคลือบปาด,ฟันเฟืองไว้เคลื่อนฐานรองรับ,ที่วางฐานรองรับ



รูปที่ 3.6 แผนภาพเครื่องเคลือบปาด

3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ (Substrate)

ในการเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องมีฐานรองรับ (substrate) เพื่อให้วัสดุของสารเกาะยึดบนฐานรองรับดังกล่าว ซึ่งก่อนที่เราจะนำฐานรองรับมาใช้งานนั้นจะต้องมีกระบวนการในการทำความสะอาดฐานรองรับเพื่อขจัดคราบสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่เสียก่อน สำหรับฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระจกโปร่งใสนำไฟฟ้า ขนาด 2x2 เซนติเมตร โดยใช้กระบวนการล้าง โดยแสดงดังรูปภาพ 3.7 ดังนี้

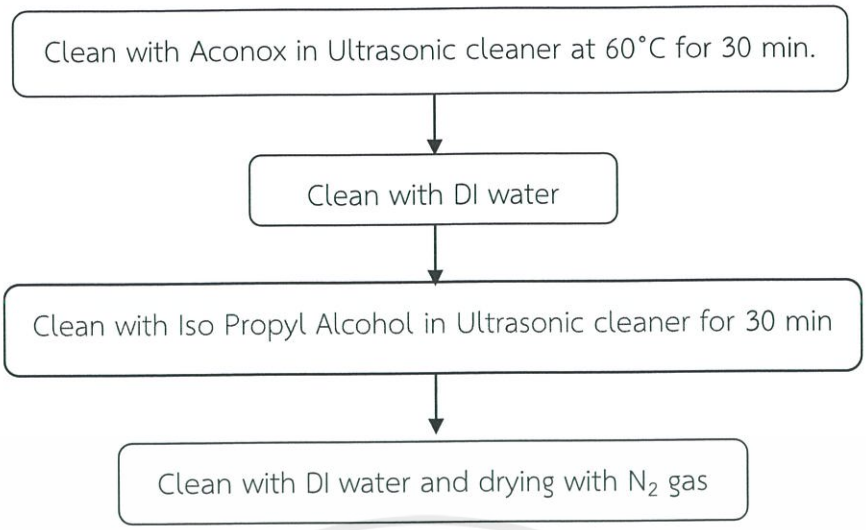
(1) นำกระจกไปล้างด้วย Aconox ในเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner) ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

(2) ล้างกระจกด้วยน้ำไร้ประจุ จนกว่า Aconox จะหมด

(3) ล้างกระจกด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Iso Propyl Alcohol (IPA) ในเครื่องอัลตร้าโซนิคเป็นเวลา 30 นาที

(4) ล้างด้วยน้ำไร้ประจุ และ เป่าให้แห้งด้วยแกสไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการล้างกระจก

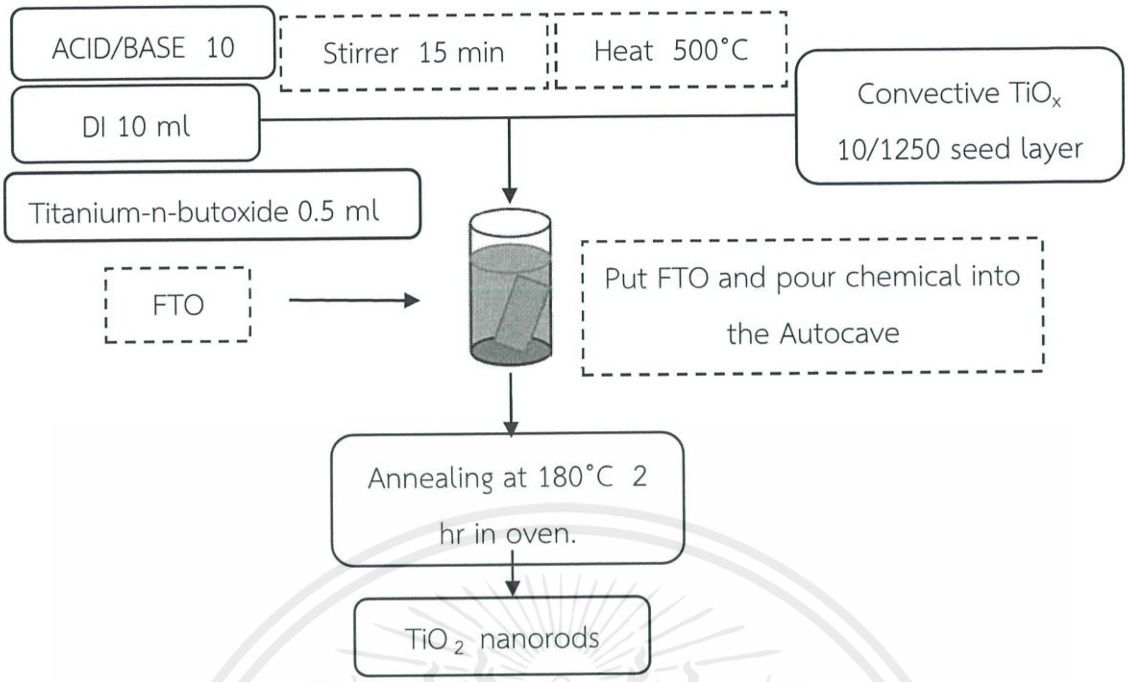
3.3 การเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

ในการทดลองจะทำการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยจะทำการสร้างเงื่อนไขในการทดลอง 3 เงื่อนไขเพื่อหาโครงสร้างผลึกที่ต้องการ โดยเงื่อนไขแรกจะทำการเปรียบเทียบการปลูกฟิล์มบางบนกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้าโดยไม่มีชั้นเริ่มต้นและมีชั้นเริ่มต้นที่เคลือบด้วย TiO_x ส่วนเงื่อนไขที่สองจะทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรเมอร์มอล ส่วนเงื่อนไขที่สามจะนำผงไททาเนียมไดออกไซด์มาเป็นชั้นเริ่มต้นและจะทำการหาความเข้มข้นผงแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม และนำไปเจือกับ TiO_x โดยในเงื่อนไขนี้จะใช่อัตราส่วนการเจือเป็น 50:50 ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มบางบนกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้าโดยไม่มีชั้นเริ่มต้นและมีชั้นเริ่มต้น

โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล โดยจะใช้ Titanium-n-butoxide 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก 37 %W (HCl) 10 มิลลิลิตร และน้ำ DI 10 มิลลิลิตร โดยจะคนให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเตรียมกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงโดยนำไปเคลือบปาดด้วย TiO_x แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบปาดและไม่ได้ผ่านการเคลือบปาด ใส่ในภาชนะทนความร้อนและแรงดัน (Autocave) แยกกัน แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนการปลูกฟิล์มอธิบายไว้ดังรูปภาพ 3.8 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แผนภาพการปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

3.3.2 เงื่อนไขการเปลี่ยนอุณหภูมิของการไฮโดรเทอร์มอล

ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลโดยจะทำการลดอุณหภูมิขั้นละ 10°C จาก 180, 170, 160 และ 150°C ตามลำดับ โดยจะใช้กระจกโปร่งใสนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบปาดมาใช้ในการทดลอง

3.3.3 เงื่อนไขการใช้ผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสในชั้นเริ่มต้น

เตรียมสารแขวนลอยจากผงแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเป็นอนาเทสโดยการนำไปผสมกับ 2-Butanol 99.5% โดยจะปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของผงแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 0.5,1,1.5 และ 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

3.3.4 เงื่อนไขการหาความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล

เตรียมสารละลายที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยการปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย โดย สารที่ให้ความเป็นกรด จะใช้กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) และสารที่ให้ความเป็นด่าง จะใช้สารละลายแอมโนเนีย (Ammonia solution)

เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

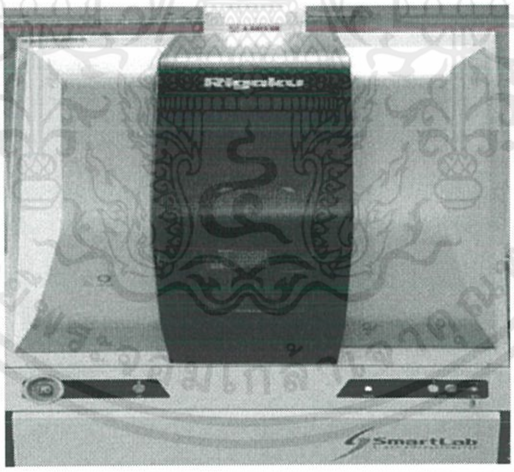
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

พารามิเตอร์การเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม
ฐานรองรับ	มี หรือ ไม่มีชั้นเริ่มต้น
อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอล	150, 160, 170 และ 180°C
ความเข้มข้นของสารในชั้นเริ่มต้น	0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิกรัม ต่อ มิลลิลิตร
ความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย	PH =1 , PH = 10

3.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดย ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) รุ่น Smart Lab ของบริษัท Rigaku แสดงดังรูปที่ 3.9

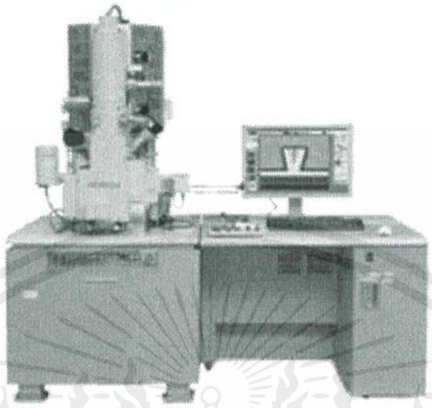


รูปที่ 3.9 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD), Rigaku รุ่น Smart Lab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ มีลักษณะภาพเป็นภาพขาวดำมีกำลังขยาย 10 - 800,000 เท่า โดยจะใช้เครื่องของ รุ่น SU8000 บริษัท Hitachi ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดชนิด Field Emission (FE-SEM) , Hitachi รุ่น SU8000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยของการเตรียมฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์และการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มบาง ซึ่งการทดลองสามารถเตรียมด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลและในส่วนของผลการนำฟิล์มบางไปตรวจวัดสมบัติความเป็นผลึกและสมบัติพื้นผิวนั้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษาฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์ด้วยการไฮโดรเทอร์มอลที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยา

1. ศึกษาการมีอยู่ของชั้นเริ่มต้นของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์
2. ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล
3. ศึกษาการใช้ผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสในชั้นเริ่มต้น
4. ศึกษาการปรับการหาความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล

การนำฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์ไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ

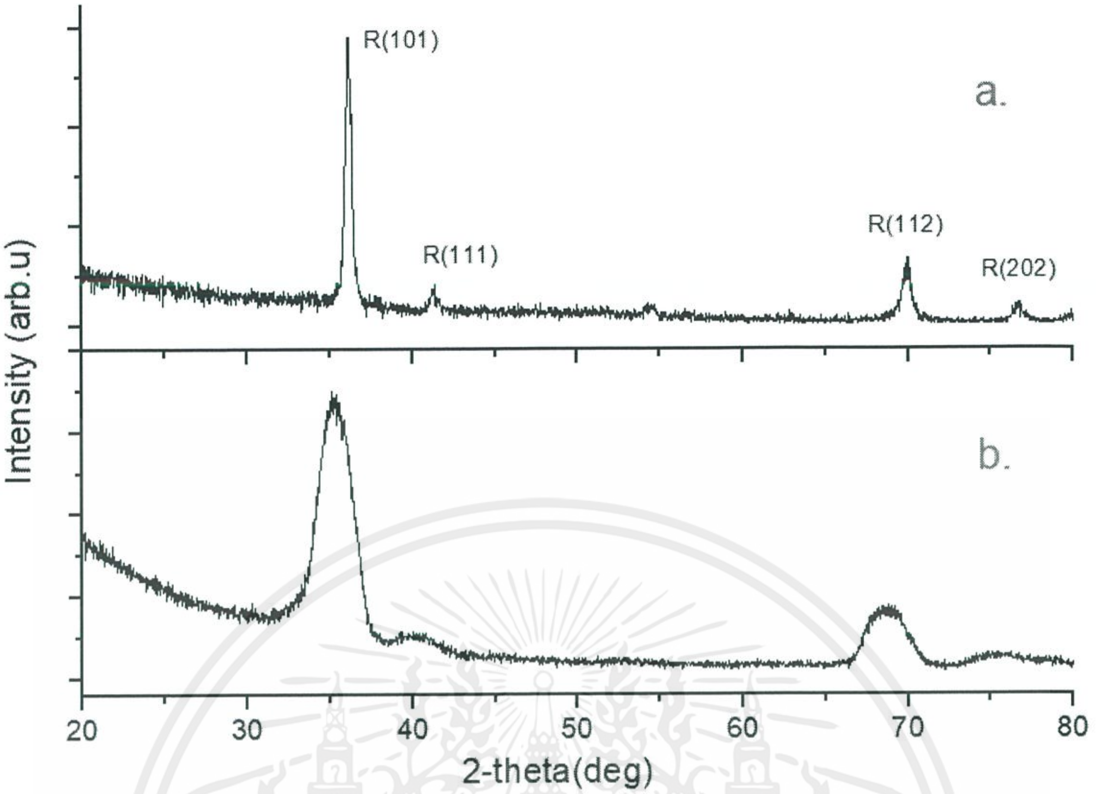
1. ผลการตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
2. ศึกษาการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

4.1.1 ผลของการมีอยู่ของชั้นเริ่มต้นของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ในการทดลองจะทำการจะทำการปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 180°c เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการมีอยู่ของชั้นเริ่มต้นและไม่มีชั้นเริ่มต้นบนฐานรองรับ ในการปลูกฟิล์มบาง ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



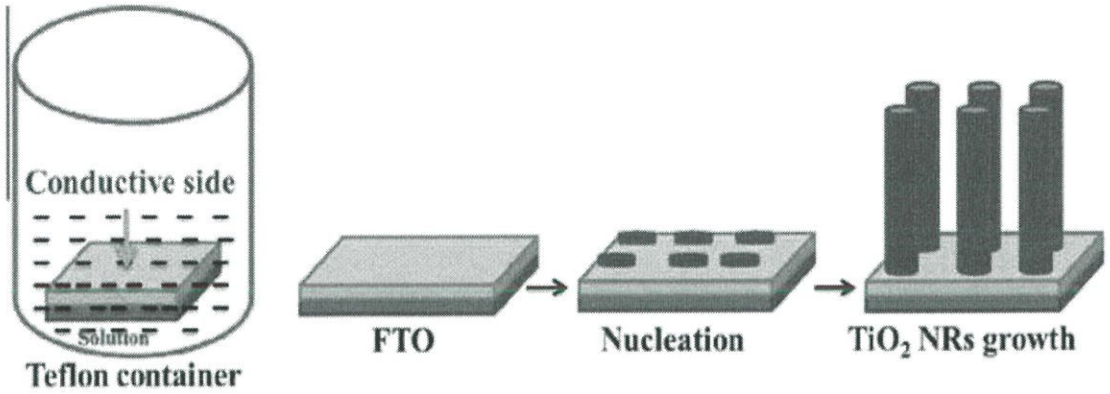
รูปที่ 4.1 กราฟ XRD ของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเงื่อนไข a.) มีชั้นเริ่มต้น b.) ไม่มีชั้นเริ่มต้นบนฐานรองรับ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบเงื่อนไขของการมีชั้นเริ่มต้น โดยการตรวจวัดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยกราฟทั้งสองกราฟแสดงพีคที่ตรงกับระนาบเลี้ยวเบนที่ (101), (111), (112) และ (202) ของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ตามลำดับ แต่ทั้งสองกราฟมีลักษณะความกว้างของพีคที่ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการ Sherrer’s equation

$$D = \frac{K\lambda_X}{\beta_{2\theta}\cos\theta}$$

จากสมการได้บอกว่า ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดพีค ($\beta_{2\theta}$) มีค่าแปรผกผันกับ ขนาดของผลึก (D) โดยจากภาพ a.) ซึ่งเป็นภาพของการปลูกฟิล์มบางทีมีชั้นเริ่มต้นจะเห็นว่าพีคมีลักษณะสูงเรียวและชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่เกิดนั้น ได้เกิดมาจากโดเมนของชั้นเริ่มต้น ต่างจากภาพ b.) โดยโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการก่อตัวเป็นนิวเคลียสแบบสุ่มแล้วจึงเกิดเป็นฟิล์ม ซึ่งการเกิดนิวเคลียสแบบสุ่มนั้นทำให้ฟิล์มเกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียส แสดงดังรูป 4.2 แบบไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้โครงสร้างที่เกิดนั้นมีทิศทางการโตที่จำกัด ทำให้มีขนาดผลึกที่เล็ก ส่งผลให้พีคที่ได้ในเงื่อนไขไม่มีชั้นเริ่มต้นบนฐานรองรับนั้นมีลักษณ์บานใหญ่และทำให้วิเคราะห์ผลได้ยาก

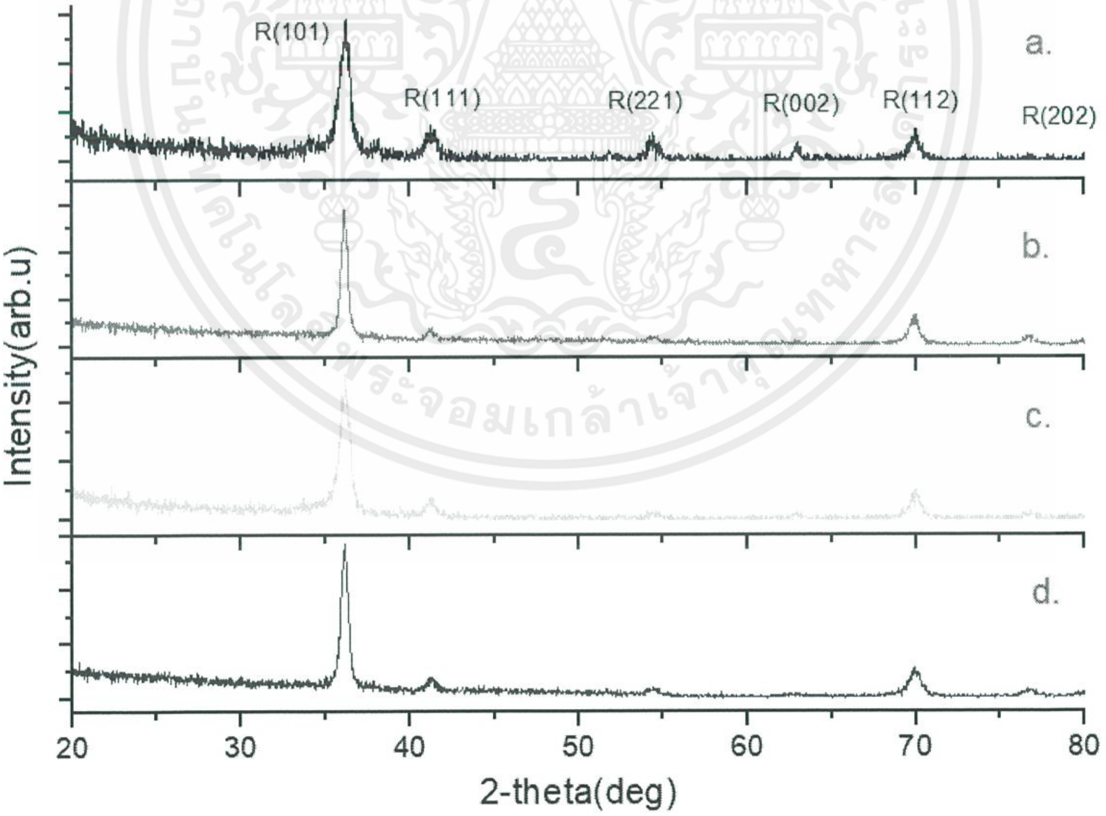
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเกิดแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

4.1.2 ผลการปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล

ในการทดลองจะทำการปรับอุณหภูมิในการทำไฮโดรเทอร์มอล โดยเราจะเลือกเงื่อนไขของการมีชั้นเริ่มต้นมาทำการปรับค่าอุณหภูมิต่อ โดยจากการศึกษาพบว่าพลังงานเป็นหนึ่งปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ จึงได้ทำการลดอุณหภูมิในการทำไฮโดรเทอร์มอลเป็น 180°C, 170°C, 160°C และ 150°C ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงผลรูปที่ 4.3



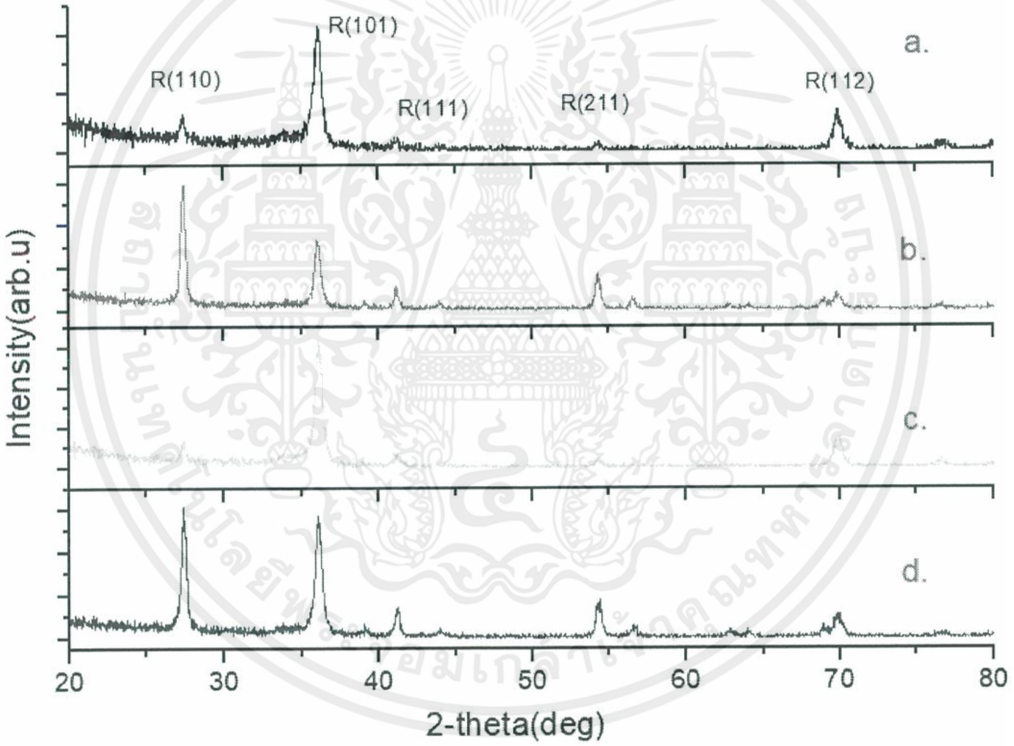
รูปที่ 4.3 กราฟ XRD ของฟิล์มแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ a.) 180°C b.) 170°C c.) 160°C d.) 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.3 จะเห็นว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นสามารถปลูกฟิล์มให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบแท่งนาโนได้และผลึกที่ได้เป็นแบบรูไทล์ทั้งหมด ซึ่งอธิบายได้ว่าพลังงานที่ให้ไปนั้นยังมากเกินไป

4.1.3 ผลจากการใช้ผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสในชั้นเริ่มต้น

ในการทดลองจะทำการใช้ผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสในการเป็นชั้นเริ่มต้น โดยจะทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยจะทำการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นเริ่มต้นต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก โดยทำการทำให้กระจายตัว (Dispersion) ใน 2-butanol โดยทำการปรับความเข้นข้นเป็น 0.5, 1, 1.5และ 2 mg/ml ตามลำดับ ดังแสดงผลรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟ XRD ของฟิล์มแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยปรับความเข้มข้นของผงแท่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ชั้นเริ่มต้น โดยปรับความเข้มข้น a.) 0.5 mg/ml b.) 1 mg/ml c.) 1.5 mg/ml d.) 2 mg/mg

จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่ฟิล์มแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกความเข้มข้นที่ทำการไฮโดรเทอร์มอลนั้น ปรากฏลักษณะพีคที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ซึ่งอธิบายได้ว่า ถึงแม้ว่าชั้นเริ่มต้นของ

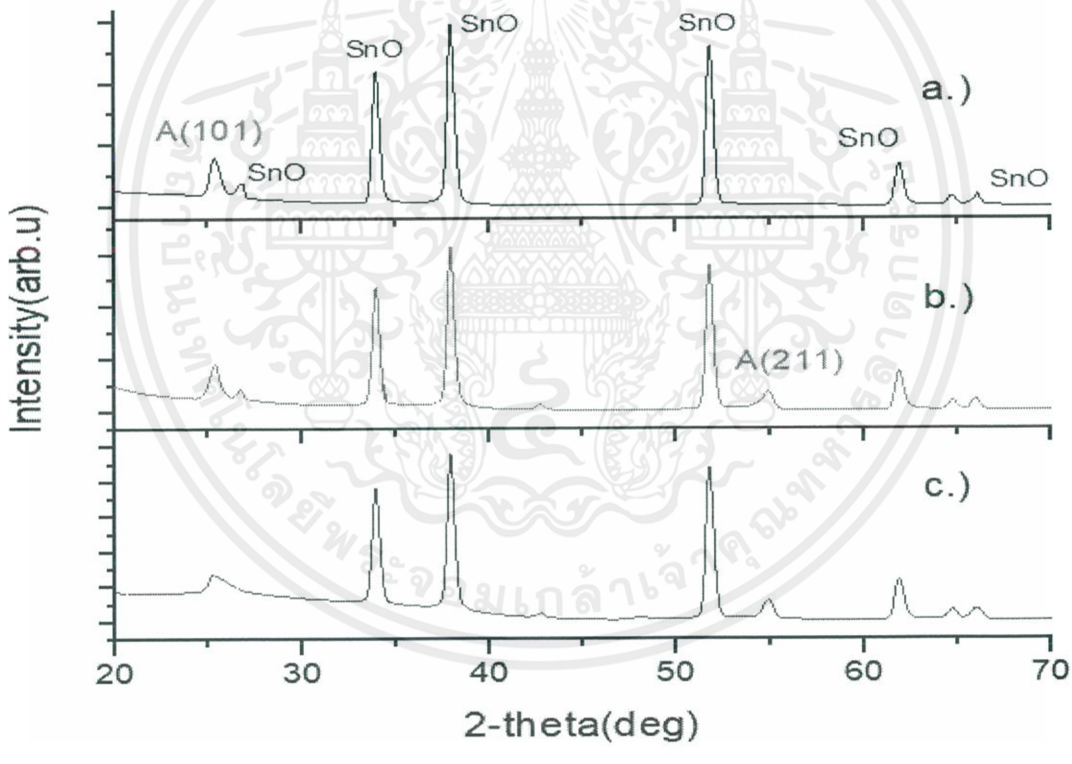
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มจะมีโครงสร้างผลึกที่เราต้องการนั้น แท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปลูกออกมาก็ยังมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างไป

4.1.4 เงื่อนไขการหาความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล

จากการศึกษาปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกอย่างมาก

ในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์ที่ปลูกโดยกระบวนการไฮโดรเมอร์มอล โดยทำการปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลโดยการทดลองแบบอ้างอิงจะใช้ Titanium butoxide 1.5 ml ผสมกับ สารละลายแอมโนเนีย 28% 30 ml โดยวัดค่า pH ได้เป็น10 จากนั้นทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 38 ชั่วโมง ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟ XRD ของฟิล์มแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายแอมโนเนียที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 38 ชั่วโมง a.) ก่อนการเผา b.) เผาที่ 250°C c.) เผาที่ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 25.3 และ 55.6 องศา ตามลำดับ หลังจากทำการเผา ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (101) และ (211) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกอนาเทส และจากกราฟจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลทำให้ฟิล์มที่ปลูกมีเฟสเป็นอนาเทส จากรูปที่ 4.5(a) และจากการนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 300°C ทำให้มีความเข้มข้นของพีคและมีความเป็นผลึกมากขึ้น

จากรายงานของ Moges Tsegaa และคณะ[55] ได้อธิบายถึงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยทางผู้วิจัยได้อธิบายไว้ว่า ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้กรดเข้มข้นนั้นโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบรูไทล์เป็นหลัก และการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้สภาวะด่างจะได้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส โดยอธิบายจากสมการการเกิดไททาเนียมไดออกไซด์ดังนี้

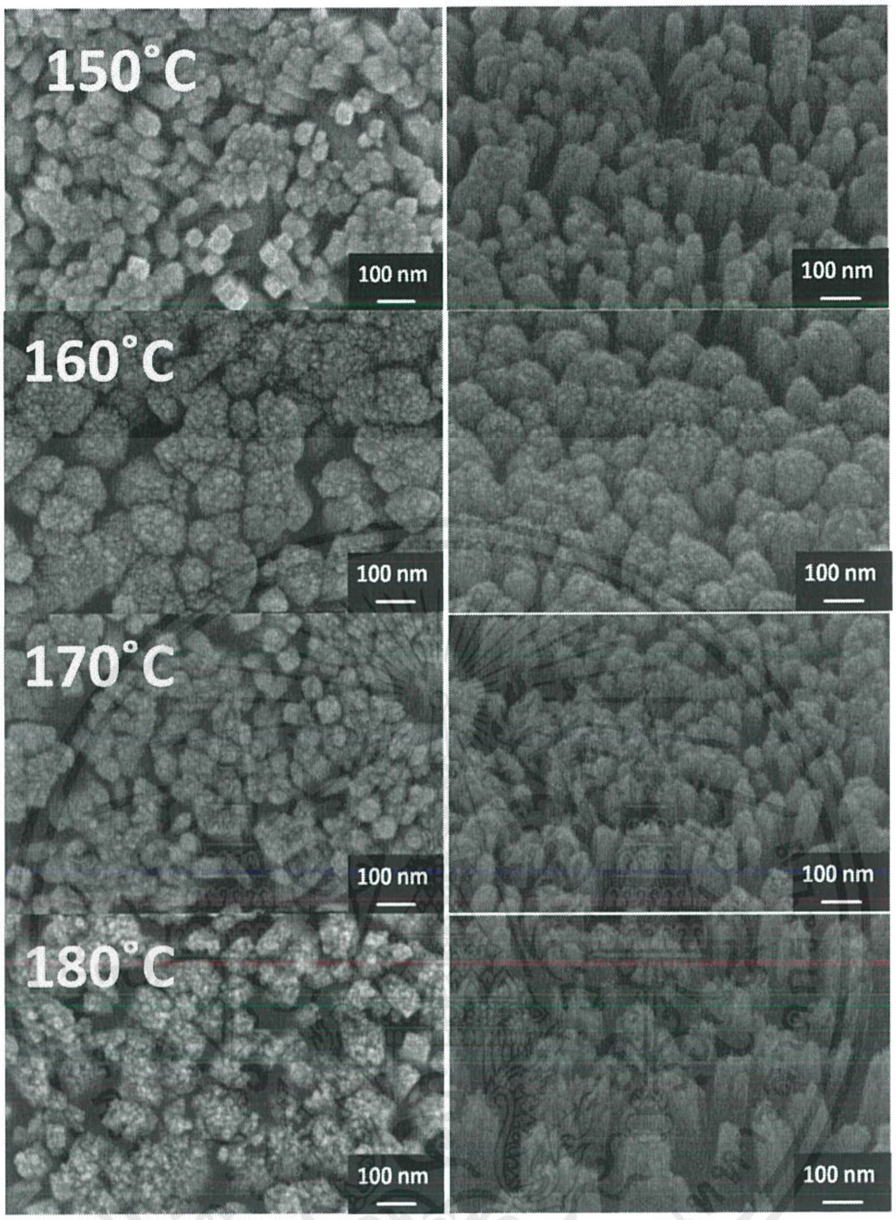
$$Ti(OC_4H_9)_4 + 4HCl \quad H_2O \longrightarrow TiO_2 + 4(HOC_4H_9) + 4HCl_{(g)} + 2H_2O$$

ซึ่งจะเห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกนั้น จะเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือปฏิกิริยาการใส่น้ำเข้าไปในโมเลกุลและกรดนั้นมีส่วนช่วยในการแตกตัวและให้ ไฮโดรเจน (H^+) ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ทำให้การก่อตัวเป็นผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์นั้น เกิดเป็นโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดของไททาเนียมไดออกไซด์

4.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยการปรับอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอลที่ 150°C, 160°C, 170°C และ 180°C ตามลำดับ เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด Flied Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพ FE-SEM ของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปลูกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่างๆ ภาพฝั่งซ้าย) มุมบน ภาพฝั่งขวา) เอียงฐานรองรับ 30 องศา

จากการนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดอ อกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด Flied Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM พบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็นแท่งที่มีความยาวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอธิบายได้จากธรรมชาติการเจริญเติบโตของผลึกเป็นส่วนใหญ่โดยกำหนดโดยการเติบโตสัมพัทธ์ของโครงสร้างผลึกต่างๆซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายใน ปัจจัยของผลึกที่กำหนดและสภาวะภายนอกเช่น อุณหภูมิ,ความเข้มข้นของสารตั้งต้นค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายและอื่น ๆ ในหลักการเราสามารถปรับการสังเคราะห์ได้เงื่อนไขเพื่อให้ระบบมีวิวัฒนาการกับพื้นผิวที่น้อยที่สุดพลังงานนั่นคือภายใต้เงื่อนไขที่ Thermodynamically ในกรณีของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกออกตะฮีดรอลทุกอะตอม

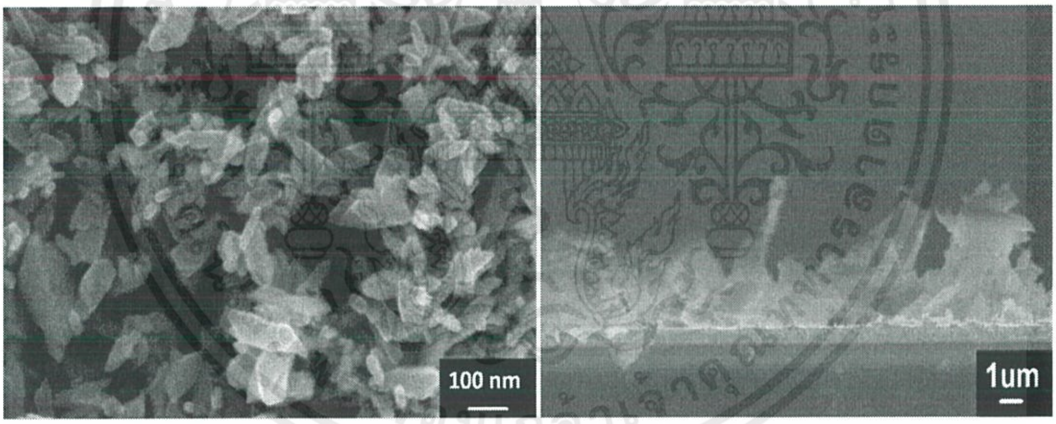
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไททาเนียมถูกผูกไว้เป็นหกอะตอมออกซิเจนเป็นรูปแปดเหลี่ยม TiO_2^{6-} ซึ่งแบ่งเป็นคู่ของขอบด้านตรงข้ามกับรูปแปดมุมถัดไปสร้างโซ่โครงสร้างขึ้นอยู่กับจำนวนมุมและขอบของรวมกันอัตราการเติบโตของระนาบโครงผลึกที่ต่างกันต่างกันและตามลำดับ (110) <(100) <(101) <(001) การเจริญเติบโตของไททาเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย การเกิดปฏิกิริยาในปัจจุบันการก่อตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ กลไกการเจริญเติบโตที่เป็นไปได้ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่จัดอยู่ในแนวตั้งแท่งนาโนบนพื้นผิวฐานรองรับ

ข้อเสนอแนะ

จากรูป 4.6 จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกับ รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 จะเห็นว่า ภาพ a กับ c และ b กับ d มีลักษณะที่คล้ายกัน เนื่องจากเป็นความผิดพลาดของผู้ทดลอง ในการใช้เตาอบคนละชนิดในการทำการทดลองชุดเดียวกัน

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยการปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการทำไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายแอมโนเนีย ซึ่งค่า pH ที่วัดได้เป็น 10 และได้นำไปศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด Flied Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพ FE-SEM ของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปลูกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายแอมโนเนียความเข้มข้น 28% ภาพซ้าย) มุมบน ภาพขวา) มุมตัดขวาง

จากผลการตรวจวัดลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์พบว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้มีลักษณะเป็นแท่งขนาด 100 นาโนเมตร จากรูปที่ 4.7 ภาพซ้าย และจากภาพขวา จะเห็นว่าฟิล์มที่ได้มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ไม่เป็นแท่งยาวต่อเนื่องเหมือนการทดลองที่ใช้กรด ซึ่งอธิบายจากปฏิกิริยาในการเกิดไททาเนียมไดออกไซด์ผ่านทางการใช้สารละลายด่างดังสมการเคมี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

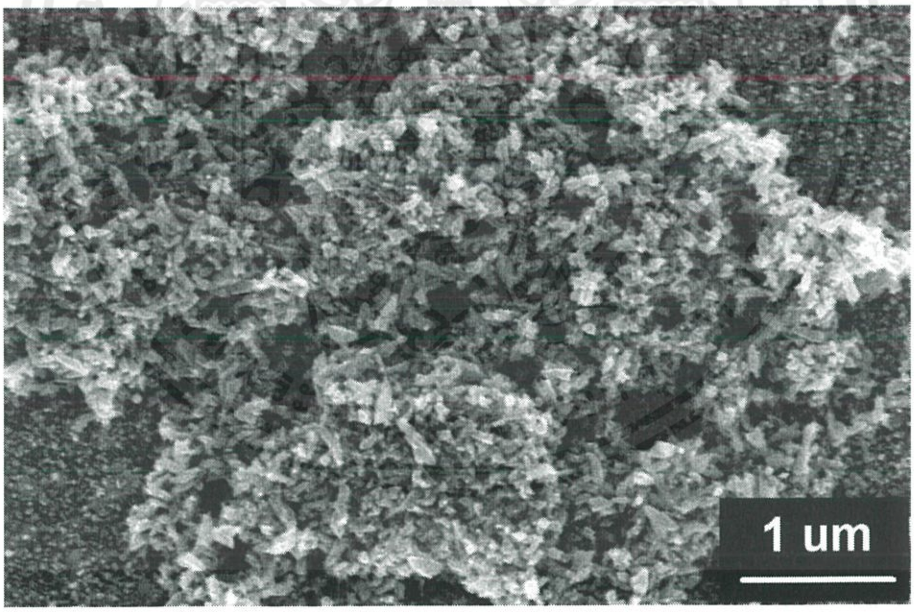
$$Ti(OC_4H_9)_4 + 4(NH_4OH) \longrightarrow Ti(OH)_4 + 4(NH_4OC_4H_9)$$

$$Ti(OH)_4 \longrightarrow TiO_2 + 2H_2O$$

จากสมการเคมีการเกิดไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้แอมโมเนียซึ่งมีความเป็นด่าง จะเห็นว่าจะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของสารละลาย ซึ่งจะแตกต่างกันกับการใช้กรดเข้มข้นที่เป็นการไฮโดรไลซิส ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรด ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นแบบอนาเทสที่เป็นโครงสร้างกึ่งเสถียรของไททาเนียมไดออกไซด์

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

จากการทดลองจะเห็นว่าฟิล์มที่ปลูกโดยใช้สารละลายด่างสามารถทำให้ปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสได้ แต่จากการตรวจวัดสมบัติสัณฐานวิทยานั้นพบว่าฟิล์มบางมีการจับตัวเป็นก้อน ไม่กระจายตัวสม่ำเสมอทั่วฟิล์ม ซึ่งแสดงในรูปภาพ 4.8 ซึ่งอาจจะเกิดจากการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างเข้มข้น จึงทำให้มีการตกผลึกที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้ไททาเนียมตกผลึกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเป็นแท่งนาโนที่มีลักษณะสั้นกว่าการปลูกผ่านสารละลายกรดเข้มข้น



รูปที่ 4.8 ภาพ FE-SEM ของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปลูกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายแอมโนเนียความเข้มข้น 28%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยผลของการควบคุมค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอล พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 25.3 และ 55.6 องศา ตามลำดับ หลังจากทำการเผา ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (101) และ (211) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของแท่งนาโนไททาเนียมเออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกอนาเทส และจากผลการตรวจวัดลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า ฟิล์มบางที่ปลูกได้มีลักษณะเป็นแท่งขนาด 100 นาโนเมตร ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้อธิบายไว้ว่า เมื่อไฮโดรเทอร์มอลภายใต้กรดเข้มข้นนั้น โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบรูไทล์เป็นหลัก และการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้สภาวะด่างจะได้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส โดยอธิบายจากสมการการเกิดไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้แอมโมเนียซึ่งมีความเป็นด่าง จะเห็นว่าการเกิดไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของสารละลาย ซึ่งจะแตกต่างกันกับการใช้กรดเข้มข้นที่เป็นการไฮโดรไลซิส ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรด ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นแบบอนาเทสที่เป็นโครงสร้างกึ่งเสถียรของไททาเนียมไดออกไซด์

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 ปัญหา ในการทดลองมีการใช้เตาอบคนละตัวในการลองชุดเดียวกัน เพื่อประหยัดเวลาในการทำการทดลอง ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองชุดเดียวกัน การแก้ไขปัญหา ควรจะควบคุมตัวแปรภายนอกให้ครอบคลุม

5.2.2 ปัญหา ในการปลูกฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้สารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 28% ในการไฮโดรเทอร์มอล เมื่อทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มบางที่ได้มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและไม่สามารถครอบคลุมบริเวณฐานรองรับได้ทั้งหมด

การแก้ไขปัญหา ทางผู้ทดลองมีแนวคิดที่จะทำการลดความเข้มข้นของสารละลายแอมโนเนียเพื่อทำการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อฟิล์มบางแท่งนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] M. Malekshahi Byranvanda, A. Nemati Kharata, L. Fatholahib, Z. Malekshahi Beiranvandc, A Review on Synthesis of Nano-TiO_2 via Different Methods , JNS 3 (2013) 1-9

[2] Onur Aleva, Erdem Şennikc, Necmettin Kılınçb, Zafer Ziya Öztürka, Gas sensor application of hydrothermally growth TiO_2 nanorods, Procedia Engineering 120 (2015) 1162 – 1165

[3] Zhu Jian-Jing, Zhao Yu-Long, Zhu Lei, Gu Xiu-Quann, and Qiang Ying-Huai, Chin. Phys. B Vol. 23, No. 4 (2014) 048104

[4] Carp O, Huisman CL, Reller A.Photoinducedreactivityof titanium dioxide. Progress inSolidState Chemistry 2004; 32(1–2): 33–177.

[5] Jingshu Wan, Rong Liu, Yuzhu Tong, Shuhuang Chen, Yunxia Hu, Baoyuan Wang, Yang Xu, and Hao Wang, Nanoscale Res Lett. 2016.11.12

[6] Mingzheng Ge, Chunyan Cao, Jianying Huang, Shuhui Li, Zhong Chen, KeQin Zhang, S.S. Al-Deyab, and Yuekun Lai, This journal is The Royal Society of Chemistry 2013

[7] Zewei Yang, Bing Wang, Hao Cui, Hao An, Yang Pan, and Jianping Zhai, 2015 American Chemical Society

[8] Yi Chen, Sang Yeol Yang, and Jaehwan Kim, Electronic Materials Letters, Vol. 8, No. 3 (2012), pp. 301-304 DOI: 10.1007/s13391-012-1106-2

[9] Thirunavukkarasu Santhoshkumar, Abdul Abdul Rahuman ,Chidambaram Jayaseelan , Govindasamy Rajakumar,SampathMarimuthu,Arivarasan Vishnu Kirthi, Kanayairam Velayutham, John Thomas, Jayachandran Venkatesan, Se-Kwon Kim, Asian Pacific Journal of Tropical Medicine (2014)968-976

[10] Ding XZ, Liu XH, He YZ. Grain size dependence of anatase–to–rutile structural transformation in gel–derived nanocrystalline titania powders. Journal of Materials Science Letters 1996; 15(20): 1789–179

[11] Ananthakumar Ramadoss , Sang Jae Kim, Journal of Alloys and Compounds 561 (2013) 262–267

[12] Linsebigler AL, Lu G, Yates JT. Photocatalysis on TiO_2 surfaces: principles, mechanisms and selected results. Chemical Reviews 1995; 95(3): 735–758.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] Muggli DS, Ding L. Photocatalytic performance of sulfated TiO_2 and Degussa P–25 TiO_2 during oxidation of organics. Applied Catalysis B: Environmental 2001; 32(3): 181–194.

[14] Ohno T, Sarukawa K, Tokieda K, Matsumura M. Morphology of a TiO_2 photocatalyst (Degussa P–25) consistingof anatase andrutile crystallinephases.Journalof Catalysis2001;203(1):82–86.

[15] Cromer DT, Herrington K. The structuresof anatase andrutile.Journalof the American Chemical Society 1995; 77(18): 4708–4709.

[16] Mo SD, Ching WY. Electronic and optical properties of three phases of titanium dioxide: rutile, anatase and brookite. Physical Review B 1995; 51(19): 13023–13032.

[17] WilfriedWunderlich TO. Electronicpropertiesofnano–porous TiO_2 and ZnO thinfilms comparison of simulations and experiments. Journal of Ceramic Processing Research2004; 5(4): 343–354.

[18] Wen L,Liu B,Zhao X,Nakata K,MurakamiT,FujishimaA.Synthesis, characterization and photocatalysis of Fe–doped TiO_2 : a combined experimental and theoretical study.International Journal of Photoenergy 2012; 2012(1): 1–10

[19] Li B, Wang X, Yan M, Li L. Preparation and characterization of nano–TiO_2 powder. Materials Chemistry and Physics 2003; 78(1): 184–188

[20] Zewei Yang, Bing Wang, Hao Cui, Hao An, Yang Pan, and Jianping Zhai,10.1021/acs.jpcc.5b02485 J. Phys. Chem. C 2015, 119, 16905–16912

[21] ทุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์. “การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำไฮบริดแบบหลายชั้นสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์และสารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำ อิเล็กตรอน” วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

[22] A. Jaworek, “Electrospray droplet sources for thin film deposition”, Journal of Materials Science, vol. 42, 2007, pp. 266-297.

[23] TingFeng, GenShengFeng, LeiYan, and JiaHongPan, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume 2014

[24] Nan Liua,b, Xiaoyin Chena, Jinli Zhang b, Johannes W. Schwank , Catalysis Today 225 (2014) 34–51

[25] Hiromichi Hayashi , and Yukiya Hakuta , Materials 2010, 3, 3794-3817

[26] Mayank Kumar, Adetoyese Olajire Oyedun, Amit Kumar , Kumar, M., Renewable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and Sustainable Energy Reviews (2017)

[27] Rehspringer, J.L., Poix P. and Bernier, J.C., Synthesis of glass ,precursorBaO,TiO_2.nH_2O by gel processing, J. Non, Cryst. Solids, 82 (1986) 286-292.

[28] Carp, O., Huisman, C.L. and Roller, A., Photoinduced reactivity of titanium dioxide, Prog. Solid State Chem., 32 (2004) 33-177.

[29] Chaput, F. and Builot, J.P., Alkoxide-hydroxide route to syntheltize $BaTiO_3$ – based powders, J. Am. Ceram. Soc., 73 (1990) 942-948

[30] Mosset, A., Gauteir-Lunean, I., Galy, J., Streholw, P. and Schmidt, H.,Sol-gel proceesed $BaTiO_3$: Structural evolution from the gel to the crystalline powder, J. Non. Cryst.Solids, 100 (1988) 339-344.

[31] Grammayico, J. P. and Porto Lopez, J.M., Reaction sequences in the systems Ti(Oi Pr)4 Ba(CH3COO)2 and TiO_2 + $Ba(CH_3COO)_2$, J. Mat. Sci, Material in Electronics, 3 (1992) 82- 86.

[32] Phanichpant, S., Tunkasin, T., Yhavornyutikarn, P., Rujijanakul, G. and Youme, P., Preparation of barium titanate powders by sol-gel method, Proceedings of the International 75 Conference on Materials Technology : Recent Developments and Future Potential, 1997, pp. 242-248.

[33] M.Y. Liao, L. Fang n , C.L. Xu n , F. Wu, Q.L. Huang, M. Saleem, Materials Science in Semiconductor Processing 24 (2014) 1–8

[34] Xiaoyan Cai, Bingqian Han, Shaojuan Deng, Yan Wang, Chengjun Dong , Yude Wang and Igor Djerdj

[35] Abbas Sadeghzadeh Attar, Zahra Hassani , ournal of Materials Science & Technology 31 (2015) 828e833

[36] Akshay Kumar, Anuj R. Madaria, and Chongwu Zhou, J. Phys. Chem. C 2010, 114, 7787–7792

[37] Shruti Sharma1, Kamlesh Kumar Jain1, Ashutosh Sharma, Materials Sciences and Applications, 2015, 6, 1145-1155

[38] Chu, Y. and Meisen, P. (2011) Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. Report of Global, Energy Network Institute (GENI), Diego.

[39] Choubey, P.C., Oudhia, A. and Dewangan, R. (2012) A Review: Solar Cell Current Scenario and Future Trends. Recent Research in Science and Technology, 4, 99-101.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[40] McEvoy, A., Castaner, L. and Markvart, T. (2012) Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation. 2nd Edition, Elsevier Ltd., Oxford, 3-25.

[41] Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H. (1983) Fundamentals of Solar Cells. Academic Press Inc., New York.

[42] (2015-2016) Energy from the Sun, Student Guide. National Energy Education Development Project (NEED).

[43] Bertolli, M. (2008) Solar Cell Materials. Course: Solid State II. Department of Physics, University of Tennessee, Knoxville.

[44] Whitburn, G. (2012) Exploring Green Technology, Fundamental Advantages and Disadvantages of Solar Energy

[45] Peplow, M. (2014) Organic Synthesis: The Robo-Chemist. Nature, 512, 20-22.

[46] Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N. and Gekas, V. (2005) Environmental Impacts from the Solar Energy Technologies. Energy Policy, 33, 289-296.

[47] Yadav, A. and Kumar, P. (2015) Enhancement in Efficiency of PV Cell through P&O Algorithm. International Journal for Technological Research in Engineering, 2, 2642-2644

[48] Castellano, R. (2010) Solar Panel Processing. Old City Publishing Inc., Philadelphia

[49] Cheng, Y., Yang, S. and Hsu, C. (2009). Synthesis of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Applications. Chemical Reviews 109: 5868- 5923.

[50] Uy, R. L., Price, S. C. and You, W. (2012). Structure- Property Optimizations in Donor Polymers via Electronics, Substituents, and Side Chains toward High Efficiency Solar Cells. Macromolecular Rapid Communications 33: 1162-1177.

[51] Scharber, M.C. and Sariciftci, N.S. (2013). Efficiency of Bulk-heterojunction Organic Solar Cells. Progress in Polymer Science 38: 1929– 1940.

[52] Qi, B. and Wang, J. (2013). Fill Factor in Organic Solar Cells. Physical Chemistry Chemical Physics 15: 8972-8982.

[53] Winder, C. and Sariciftci, N. Z. (2004). Low Bandgap Polymers for Photon Harvesting in Bulk Heterojunction Solar Cells. Journal of Materials Chemistry 14: 1077-1086.

[54] N.-G. Park,J. van deLagemaat, and A. J. Frank (2000). Comparison of Dye-Sensitized Rutile- and Anatase-Based TiO_2 Solar Cells, J. Phys. Chem. B 2000, 104, 8989-8994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[55] Moges Tsegaa, F.B. Dejeneb (2017). Influence of acidic pH on the formulation of TiO_2 nanocrystalline powders with enhanced photoluminescence property.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววชิรยา ธรรมสุรักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	28 พฤศจิกายน 2538
ที่อยู่	287 หมู่ 8 ต.ครก อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ 33000
E-mail	wachiraya2@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จังหวัดบุรีรัมย์
ประวัติการฝึกงาน	ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมนาโนเพื่อผลิตภัณฑ์อาหารและเกษตร (NAF) หน่วยวิจัยเกษตรนาโนและสิ่งแวดล้อม (NAE) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้