



การเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันเพื่อประยุกต์ใช้
สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันเพื่อ
ประยุกต์ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

FABRICATION OF NANOTUBES TiO_2 THIN FILM VIA ANODIZATION PROCESS
FOR DYE SENSITIZED SOLAR CELL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (CHEMICAL STUDIES)
Department of CHEMISTRY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2019
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการ
แอนโนไดเซชันเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไว
แสง

โดย วนิตา ลำพล

สาขาวิชา เคมีศึกษา แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีวิตา สุวรรณชวลิต

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนวิศว์ สว่างลาภ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีวิตา สุวรรณชวลิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี เอี่ยมพนาภิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. จริญญา ศรีธาราธิคุณ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรุจฉิ ช่างโชติ)

60301201 : เคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, กระบวนการแอนโนไดเซชัน, फिल्मบางไทเทเนียมไดออกไซด์, เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

นางสาว วนิดา ลำพล: การเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีวิตา สุวรรณขวลิต

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันซึ่งสามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อได้ด้วย ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ร้อยละ 0.4 - 1.4 โดยมวล และความต่างศักย์ 20 - 50 โวลต์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าการเผาฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เกิดผลึกอะนาเทส ผลจากเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มประกอบด้วยธาตุไทเทเนียม ออกซิเจน ฟลูออรีน และคาร์บอน เมื่อนำมาตรวจสอบหุ้ฟงักชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมทรี แสดงแถบการยืดของพันธะระหว่างไทเทเนียมกับออกซิเจน ผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นท่อนาโนที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 นาโนเมตร และความยาว 758 นาโนเมตร ดังนั้นกระบวนการแอนโนไดเซชันสามารถเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ จากการศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงแต่ละสภาวะพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ร้อยละ 1.2 โดยมวล และความต่างศักย์ 30 โวลต์ เป็นสภาวะที่มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อม N719 มากที่สุด เท่ากับร้อยละ 0.40 จึงนำสภาวะนี้มาศึกษาผลของ ความเข้มข้นสีย้อมกรดคาร์มินิกและสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยศึกษาสีย้อมกรดคาร์มินิกศึกษาที่ความเข้มข้น 0.50 0.25 และ 0.10 มิลลิโมลาร์ พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมกรดคาร์มินิก 0.50 มิลลิโมลาร์ มีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากที่สุดคือร้อยละ 0.40 ในการศึกษาความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้น 0.10 0.005 และ 0.002 โมลาร์พบว่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid 0.002 โมลาร์ มีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากที่สุดคือร้อยละ 0.32

60301201 : Major (CHEMICAL STUDIES)

Keyword : Titaniumdioxide nanotubes, Anodization, Titaniumdioxide thin films, Dye sensitized solar cell

MISS VANIDA LUMPOL : FABRICATION OF NANOTUBES TiO_2 THIN FILM VIA ANODIZATION PROCESS FOR DYE SENSITIZED SOLAR CELL THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHEEWITA SUWANCHAWALIT

This research, TiO_2 nanotubes were fabricated by anodization method. Controlled diameter and length of TiO_2 nanotube by parameters including ammonium fluoride (NH_4F) at 0.4-1.4 wt% and power voltage at 20-40 V. The results showed that XRD pattern exhibited anatase phase when annealed at 400°C for 3 h. The XPS results revealed TiO_2 nanotube of Ti, O, F and C composed elements. The FT-IR spectrum exhibited the characteristic bands of the TiO_2 which indicate Ti-O stretching mode. The SEM results depend on ammonium fluoride and power voltage. Optimal condition of TiO_2 nanotubes are 1.2 wt% NH_4F and power voltage at 30V which conversion efficiency of these optimal condition are 0.40%. In addition, the conversion efficiency for dye sensitized solar cell with varied optimal concentration of carminic acid dye at 0.10 - 0.50 mM and Fe-tannic acid complex at 0.002-0.010 M were investigated. Highest conversion efficiency of carminic acid dye at 0.50 mM are 0.40%. Highest conversion efficiency of Fe-tannic acid complex at 0.50 mM are 0.32%.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจาก ผศ.ดร.ชีวิตา สุวรรณชวลิต ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย รวมทั้ง ผศ.ดร.มนตรี เอี่ยมพนากิจ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ดร.จรัญ ศรีธาราธิคุณ นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ซึ่งเป็นที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. พัฒนาศาสตร์ สว่างลาภ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.สุรวุฒิ ช่างโชติ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ถูกต้อง และ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute Science and Technology, TGIST) ตามสัญญาเลขที่ SCA-CO-2561-6918-TH และเจ้าหน้าที่ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่สนับสนุนและช่วยเหลืองานวิจัยนี้เสมอมา

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าของหนังสือ วารสาร เอกสารและวิทยานิพนธ์ทุกเล่ม ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ มีความสมบูรณ์ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้ กำลังใจตลอดมา

คุณค่า หรือประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาแต่พระคุณบิดา มารดา ครูและอาจารย์ที่อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ รวมทั้งให้การสนับสนุน และให้กำลังใจอย่างดียิ่งเสมอมา

วนิดา ลำพล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	8
2.3 สีย้อม	10
2.3.1 กรดคาร์มินิก (carminic acid).....	10
2.3.2 สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid	11
2.4 เครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	12
2.4.1 เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์.....	12
2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน.....	14
2.4.3 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	15

2.4.4 เครื่องสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.4.1 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียม	32
3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี แอโนไดเซชัน.....	32
3.4.3 ทดสอบความสามารถทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	33
3.4.3.1 เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	33
3.4.3.2 เตรียมสารละลายสีย้อม Di-tetrabutylammonium cis- bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium(II) (N719).....	33
3.4.3.3 เตรียมสารละลายสีย้อมกรดคาร์มินิก	33
3.4.3.4 เตรียมสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid.....	34
3.4.3.5 เตรียมขั้วไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	34
3.4.3.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	34
3.4.4 ตรวจสอบโครงสร้างและคุณลักษณะต่าง ๆ ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	37
4.2 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี แอโนไดเซชัน	44
4.2.1 ผลของความต่างศักย์.....	44

4.2.2 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์	46
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	48
4.3.1 ผลการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิก.....	48
4.3.2 ผลการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อม Fe-tannic acid	55
4.3.3 ผลการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ซับสเตรดต่างกัน	62
บทที่ 5	65
ภาคผนวก.....	67
รายการอ้างอิง	73
ประวัติผู้เขียน	80



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงของลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	19
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....	20
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เฝ้าที่อุณหภูมิต่างกัน	21
ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่รูปร่างไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกัน	24
ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ให้แสงต่างกัน	25
ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีและไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์	25
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ดูดซับสีย้อมต่างกัน	27
ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมต่างกัน	28
ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ pH ต่างกัน	29
ตารางที่ 10 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน	32
ตารางที่ 11 สัญลักษณ์ตัวแปรต่าง ๆ.....	35
ตารางที่ 12 องค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่เผา	42
ตารางที่ 13 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR.....	43
ตารางที่ 14 ผลความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากความต่างศักย์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน	45
ตารางที่ 15 ผลความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน	46
ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ต่างกัน	47
ตารางที่ 17 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกด้วยเทคนิค FTIR.....	51

ตารางที่ 18 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 53

ตารางที่ 19 ผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 54

ตารางที่ 20 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-Tannic acid ด้วยเทคนิค FTIR 58

ตารางที่ 21 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 60

ตารางที่ 22 ผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 62

ตารางที่ 23 ผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ซับสเตรดต่างกัน 63



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
ภาพที่ 2 กระบวนการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	7
ภาพที่ 3 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	9
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้า	10
ภาพที่ 5 โครงสร้างกรดคาร์มินิก	11
ภาพที่ 6 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ pH 7.....	12
ภาพที่ 7 Interferometer และส่วนประกอบต่าง ๆ.....	13
ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
ภาพที่ 9 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	15
ภาพที่ 10 การทำงานเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	16
ภาพที่ 11 เครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	18
ภาพที่ 12 ลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่ระยะเวลาต่างกัน	19
ภาพที่ 13 กราฟแสดงขนาดและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่าง ๆ	22
ภาพที่ 14 ลักษณะของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จาก FESEM	23
ภาพที่ 15 ภาพถ่าย SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปร่างต่างกัน	24
ภาพที่ 16 ลักษณะท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีและไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์.....	26
ภาพที่ 17 ภาพถ่าย FESEM ของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยความต่างศักย์ต่างกัน .	26
ภาพที่ 18 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคไทเทเนียมที่ดูดซับสีย้อมต่างกัน.....	27
ภาพที่ 19 โครงสร้างสีย้อม gardenia และ cochineal.....	28
ภาพที่ 20 ความเป็นไปได้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe^{3+} กับกรดแทนนิกที่ช่วง pH ต่างกัน.....	29

ภาพที่ 21 กระบวนการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน	33
ภาพที่ 22 แผนภาพแสดงการเตรียมชั้นฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	34
ภาพที่ 23 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง.....	34
ภาพที่ 24 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมและไทเทเนียมไดออกไซด์.....	37
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้ากับเวลาในกระบวนการแอโนไดเซชัน	38
ภาพที่ 26 กระบวนการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	39
ภาพที่ 27 XRD pattern ของ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา	39
ภาพที่ 28 XPS ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา.....	41
ภาพที่ 29 FT-IR spectrum ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา ..	43
ภาพที่ 30 ภาพถ่าย SEM ของ TiO ₂ nanotube ทั้งด้านบนและด้านข้างที่มีความต่างศักย์ต่างกัน..	45
ภาพที่ 31 ภาพถ่าย SEM ของ TiO ₂ nanotube ของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่เข้มข้นต่างกัน.....	47
ภาพที่ 32 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงบน TNT ที่ใช้ความเข้มข้นของ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ต่างกัน.....	48
ภาพที่ 33 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	48
ภาพที่ 34 กราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมกรดคาร์มินิก	49
ภาพที่ 35 XPS ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิก	50
ภาพที่ 36 IR spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับกรดคาร์มินิกที่ความ เข้มข้นต่าง ๆ	52
ภาพที่ 37 DRS spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ ความเข้มข้นต่าง ๆ	53
ภาพที่ 38 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมกรดคาร์มินิก	54
ภาพที่ 39 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ ความเข้มข้นต่าง ๆ	55
ภาพที่ 40 การดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-TA ที่ pH 7.5	55

ภาพที่ 41 XPS ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid .	57
ภาพที่ 42 IR spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	59
ภาพที่ 43 DRS spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	60
ภาพที่ 44 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-TA.....	61
ภาพที่ 45 ภาพถ่าย SEM ไทเทเนียมไดออกไซด์บนชั้นสเตรดต่างกัน	63
ภาพที่ 46 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงบนกระจกนำไฟฟ้าต่างกัน	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

พลังงานไฟฟ้าถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการดำรงชีวิตในปัจจุบันของมนุษย์ จากรายงานสถิติพลังงานของประเทศไทยของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน คนไทยมีการใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าตลอดปี พ.ศ. 2560 อยู่ที่ 185,124 กิกะวัตต์ชั่วโมง ซึ่งการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 201,166 กิกะวัตต์ชั่วโมง การผลิตไฟฟ้าแบ่งตามเชื้อเพลิงได้เป็น ผลิตมาจากแก๊สธรรมชาติ (60%) ถ่านหิน/ลิกไนต์ (18%) นำเข้ากระแสไฟฟ้า (12%) พลังงานน้ำ (2%) พลังงานหมุนเวียน (7%) และ น้ำมัน (0.2%) จากสถิติการผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่มาจากการ การผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนโดยใช้แก๊สธรรมชาติและถ่านหิน/ลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงซึ่งเป็นพลังงานสิ้นเปลืองใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคต นอกจากนั้นส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่นำไปสู่การเกิดภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันจึงให้ความสนใจกับพลังงานชนิดอื่นในการผลิตกระแสไฟฟ้าและไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell หรือ Solar cell) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงที่ตกกระทบบนวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Silicon) (Masuko *et al.*, 2014) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) (Venkatasubramanian *et al.*, 1996) อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) (Day *et al.*, 2019) เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนถูกใช้อย่างแพร่หลายในท้องตลาดซึ่งมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า 25% (Masuko *et al.*, 2014) แต่มีต้นทุนในการผลิตที่ยังคงสูงเนื่องจากตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากซิลิกอนบริสุทธิ์และอยู่ในรูปของสารที่พร้อมทำเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีราคาสูง ในปี ค.ศ. 1991 คณะนักวิจัยนำโดย ไมเคิล เกรสเซลและไบรอัน โอเรแกน ได้คิดค้นเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ขึ้น เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cells) โดยใช้สีย้อมซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถเตรียมได้ง่ายและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ นอกจากนั้น

ไม่เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิต ซึ่งในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 13% (Mathew *et al.*, 2014)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอนของสีย้อมเมื่อได้รับแสงจะถูกกระตุ้นทำให้เปลี่ยนระดับพลังงานจากชั้นระดับพลังงานสูงสุด (Highest Occupied Molecular Orbital : HOMO) ไปยังชั้นระดับพลังงานต่ำสุด (Lowest Unoccupied Molecular Orbital : LUMO) ถ่ายทอดอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทด ภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์โดยไอโอด์ (I) ให้อิเล็กตรอนไปกับสีย้อมเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นไตรไอโอด์ (I₃) ที่ขั้วแคโทดไตรไอโอด์รับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เกิดเป็นไอโอด์อีกครั้ง ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายปัจจัย เช่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วแคโทด (counter electrode) สารกึ่งตัวนำที่ขั้วแอโนด (photoanode)

สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงคือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงกว่าสารกึ่งตัวนำตัวอื่น มีอัตราการการส่งผ่านอิเล็กตรอนเร็ว และไทเทเนียมไดออกไซด์มีช่วงแถบพลังงานที่กว้าง (energy band gap) ประมาณ 3.2 eV จึงทำให้เกิดอัตราการรวมตัวของประจุซ้ำ (recombination) โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนมีหลายรูปแบบอย่างเช่น อนุภาคนาโน (nanoparticles) (J. T. Kim *et al.*, 2015) ลวดนาโน (nanowires) (Yu *et al.*, 2013) แท่งนาโน (nanorods) (J. Wang *et al.*, 2014) และท่อนาโน (nanotube) (Mohammadpour Moradi, 2015) ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ลักษณะเป็นท่อนาโนนิยมนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดเนื่องจากรูปร่างของท่อมีความเป็นระเบียบสูง มีคุณสมบัติส่งผ่านอิเล็กตรอนได้เร็วกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนุภาคนาโน (Zhu *et al.*, 2007) ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงดีขึ้น สำหรับการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้จากแผ่นบางไทเทเนียม (Ti foil) ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน (Macak *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2010; Shankar *et al.*, 2007) เนื่องจากเป็นวิธีที่เตรียมได้ง่ายไม่ต้องเตรียมที่อุณหภูมิสูงและที่สำคัญสามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อได้ด้วยตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความต่างศักย์ (T. H. Kim *et al.*, 2014) ปริมาณน้ำ (Wei *et al.*, 2010) และความเข้มข้นของไอออนฟลูออไรต์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Haring *et al.*, 2012)

ในการนำท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากแผ่นบางไทเทเนียมมาใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจะต้องให้แสงทางด้านหลังของเซลล์ (back-side illumination) ซึ่งให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงน้อยกว่าการให้แสงทางด้านหน้า (front-side illumination) เนื่องจากแสงผ่านทางขั้วแคโทดจึงเกิดการสะท้อนของแสงที่ขั้วและนอกจากนั้นแสงถูกดูดซับโดยอิเล็กโทรไลต์จึงทำให้แสงเกิดการสูญเสียไป (Mohammadpour Moradi, 2015) ในการให้แสงทางด้านหน้าของเซลล์ที่ใช้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากแผ่นบางไทเทเนียมจะต้องทำการแยกชั้นท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากแผ่นบางไทเทเนียมก่อนจากนั้นนำไปวางบนกระจกนำไฟฟ้าแล้วให้แสงด้านหน้าเซลล์เพื่อวัดประสิทธิภาพของเซลล์ อย่างไรก็ตามการแยกชั้นของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากแผ่นบางไทเทเนียมเป็นการเพิ่มขึ้นตอนที่ยุ่งยาก นอกจากนั้นอาจทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ (Lin *et al.*, 2010) ดังนั้นการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากฟิล์มไทเทเนียมบนกระจกนำไฟฟ้าสามารถให้แสงด้านหน้าเซลล์โดยไม่ต้องแยกชั้นของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวแสงได้ดีขึ้น ลดขั้นตอนการเตรียมขั้วแอโนดและอาจลดการบิดเบี้ยวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

ในงานวิจัยนี้สนใจเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าด้วยการแอโนดเซชันโดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความยาวและขนาดของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์และความต่างศักย์ เพื่อได้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากที่สุด และนอกจากนั้นศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมกรดคาร์มินิก (carminic acid, $C_{22}H_{20}O_{13}$) และสารประกอบเชิงซ้อนไอรอน (III) แทนนิก แอซิด (Fe-tannic acid, $[Fe(C_7H_5O_4)_3]$) ที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากที่สุด ตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อไปนี้ เทคนิคตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) เทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) เทคนิคฟลูออริเยอร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรเมตรี (Fourier-transformed infrared spectrometry, FT-IR) เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field emission scanning electron microscopy, FESEM) และเทคนิควัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometry)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมกรดคาร์มินิก บนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid บนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดและความยาวของท่อสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นฟิล์มสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน
2. ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมกรดคาร์มินิกความเข้มข้นสูงมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าสีย้อมกรดคาร์มินิกความเข้มข้นต่ำ
3. ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ความเข้มข้นสูงมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ความเข้มข้นต่ำ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

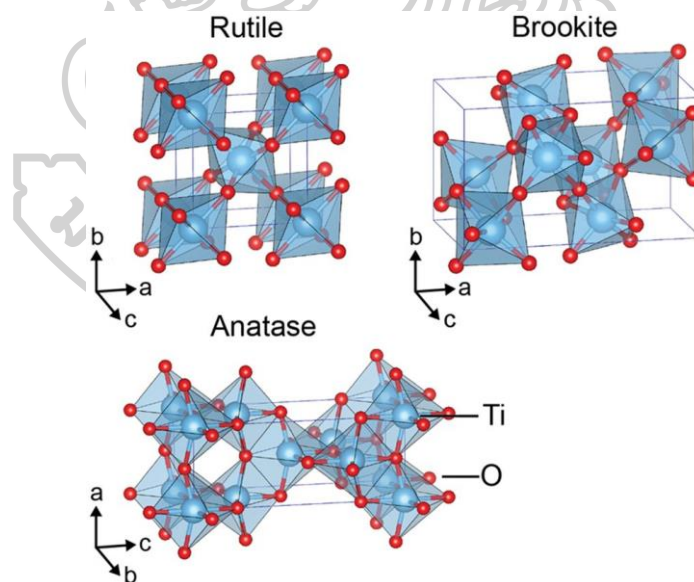
1. ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลในการสังเคราะห์ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการแอโนไดเซชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์และค่าศักย์ไฟฟ้า
2. ศึกษาการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมกรดคาร์มินิกและสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid และที่ความเข้มข้นต่าง ๆ บนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้
3. ตรวจสอบโครงสร้างและคุณลักษณะต่าง ๆ ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้สีย้อมกรดคาร์มินิกและสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid บนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสี เทคนิคสเปคโทสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรดสเปคโตรเมตรี เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิสชันและเทคนิควัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometry)
4. ทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เตรียมขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมเนื่องจากมีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่มีความ เป็นพิษ จึงสามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (J. T. Kim *et al.*, 2015) สร้างไฮโดรเจนแก๊สเซนเซอร์ (X. Chen Mao, 2007) โฟโตแคตาไลสต์ (H. Chen *et al.*, 2010) และใช้ในทางชีวการแพทย์ ใช้เป็นวัสดุในการนำส่งด้วยโฟโตแคตาไลสต์ (photo-catalysis) (Peng *et al.*, 2009) เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึก 3 โครงสร้าง คือ รูไทล์ (Rutile) อะนาเทส (Anatase) และบรูไคท์ (Brookite) ลักษณะโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกที่นิยมใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงคือผลึกรูไทล์และอะนาเทส โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกอะนาเทสมีแถบพลังงานที่กว้างกว่าจึงทำให้เกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ อิเล็กตรอนกับโฮล (recombination) ได้ยากกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ (X. Liu *et al.*, 2014)



ภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

(Haggerty *et al.*, 2017)

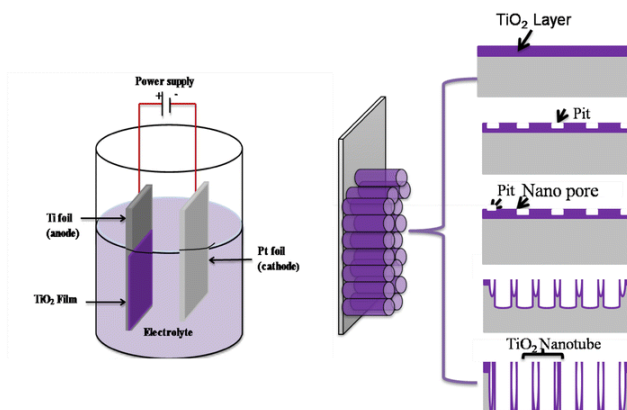
การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (TiO₂ nanotubes)

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น โซลเทอร์มอล (Solvothermal) (Jiang *et al.*, 2008) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) (Bavykin *et al.*, 2004) การเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrochemical deposition) (Shao *et al.*, 2012) และการแอนโนไดเซชัน (Anodization) (Kuo Chien, 2013) ซึ่งวิธีแอนโนไดเซชันเป็นวิธีที่ประหยัดเตรียมได้ง่ายไม่ต้องเตรียมที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นสามารถควบคุมโครงสร้างของท่อได้ด้วยตัวแปรต่างๆ เช่น ความต่างศักย์ (T. H. Kim *et al.*, 2014) ปริมาณน้ำ (Wei *et al.*, 2010) และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Haring *et al.*, 2012)

กระบวนการแอนโนไดเซชัน (Anodization process)

กระบวนการนี้ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte cell) ซึ่งประกอบด้วย ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในสารละลายแสดงดังภาพที่ 2 โดยหลักการของการทำแอนโนไดเซชันจะเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่เสถียรและมีรูพรุนขนาดเล็กมากเคลือบอยู่บนผิวของโลหะ โดยไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ส่วนที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยไอออนลบจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด เกิดเป็นออกไซด์เคลือบอยู่บนผิวของโลหะไทเทเนียม โดยมีกลไกการเกิดดังนี้ (ศรชล โยริยะ, 2554)

1. Field assisted oxidation การเกิดออกซิเดชันของโลหะไทเทเนียมเป็นออกไซด์ของไทเทเนียมอันเนื่องมาจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ
2. Field assisted dissolution การเกิดการละลายของโลหะไทเทเนียมสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์อันเนื่องมาจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ
3. Chemical dissolution การเกิดการละลายทางเคมีของโลหะไทเทเนียมและออกไซด์ของไทเทเนียม เนื่องจากการกัดเซาะ (etching) ของฟลูออไรด์ไอออนจากอิเล็กโทรไลต์ในการทำแอนโนไดเซชัน



ภาพที่ 2 กระบวนการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

(Patil *et al.*, 2017)

ขั้นตอนในการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การเกิดชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เคลือบอยู่ที่ผิวของโลหะหลังจากที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ ดังสมการ



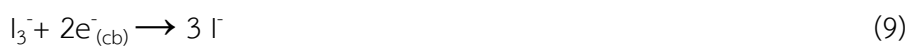
2. การเกิดชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบอยู่ที่ผิวของโลหะหลังจากที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ

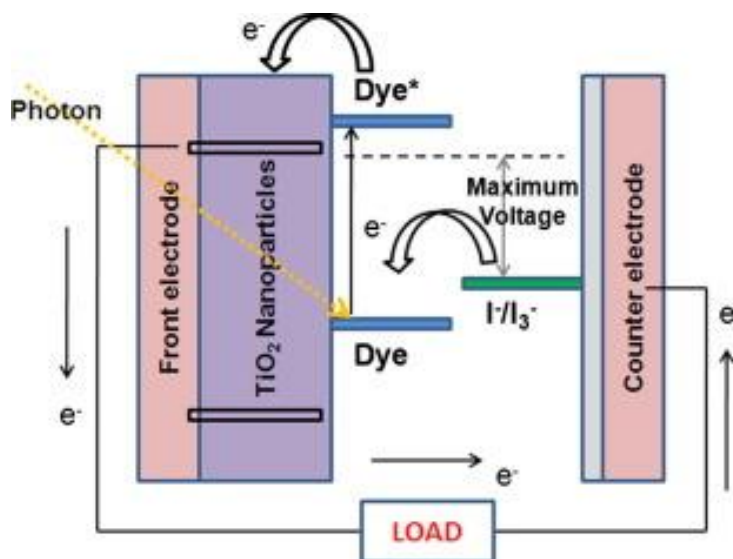


3. เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้ขณะทำแอโนไดเซชันจะทำให้เกิดการสร้างและสลายตัวของชั้นออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้รูพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิวของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์กลายเป็นรูที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
4. ในการทำแอโนไดเซชันแบบให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ระบบจะพยายามปรับตัวเข้าสู่สมดุลโดยชั้นออกไซด์กั้นขวาง (barrier oxide layer) จะมีค่าคงที่หรือหนาเท่ากันทั่วพื้นผิวที่ถูกแอโนไดซ์ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและการละลายก็จะเป็นอย่างสมดุลด้วย เกิดพัฒนาเป็นท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเท่ากันกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิว

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงแสดงการทำงานดังภาพที่ 3 สามารถอธิบายหลักการการทำงานคือเมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ (TiO_2) จะดูดกลืนแสง ($h\nu$) แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state, S_0) จะถูกเร้าให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state, S^*) ดังสมการดูดกลืนแสง (4) จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปที่แถบการนำไฟฟ้า (conduction band, CB) ของอนุภาคโลหะออกไซด์ดังสมการส่งผ่านอิเล็กตรอน (5) แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรรภายนอกเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วแคโทด ที่ขั้วนี้สารอิเล็กโทรไลต์ (ไอโอดีน/ไตรไอโอดีน) จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) ดังสมการ (6) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (โลหะแพลทินัม Pt) ดังสมการ (7) แต่ในกระบวนการก็อาจมีปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบ ประกอบด้วยการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สถานะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์ จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการ (8) และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กโทรไลต์ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังสมการ (9)





ภาพที่ 3 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

(Tripathi *et al.*, 2014)

การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะของกระแส-แรงดันเมื่อไม่ถูกแสงอาทิตย์จะมีลักษณะเหมือนกับไดโอดและเมื่อแสงตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์จะมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันดังภาพที่ 4(a) โดยเส้นโค้งตัดแกนกระแส (I) เรียกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) และจุดที่เส้นโค้งตัดแกนแรงดันไฟฟ้า (V) เรียกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถวายเปิด (V_{oc}) โดยทั่วไปนิยมเขียนกราฟในจุดภาคที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4(b) จุด P_{max} เป็นจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งตัวแปรที่สำคัญอีกตัวคือ ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF, fill factor) โดยหาได้จากอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณของแรงดันไฟฟ้าวงจรถวายเปิดกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ดังสมการที่ 10

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (10)$$

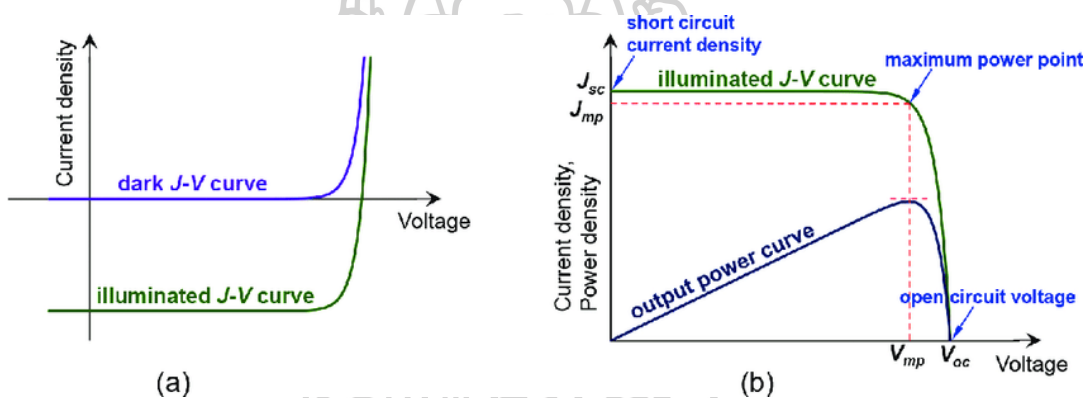
ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency, η) คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ 11

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (11)$$

แทนค่า P_{max} ในสมการที่ 2 จะได้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} \times 100 \\ \eta &= \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \times FF \times 100 \end{aligned} \quad (12)$$

โดย η	คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
P_{in}	คือ พลังงานของแสงอาทิตย์ที่ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
P_{max}	คือ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ให้ออกมา
FF	คือ ฟิลล์แฟกเตอร์
V_{oc}	คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage)
I_{sc}	คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current)
V_{max}	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด
I_{max}	คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้า

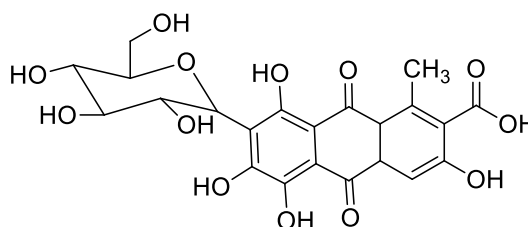
(a) ในจตุภาคที่ 2 (b) ในจตุภาคที่ 1 (Tao, 2016)

2.3 สีย้อม

2.3.1 กรดคาร์มินิก (carminic acid)

กรดคาร์มินิกเป็นสารที่อยู่ในสีย้อมโคชินิล (Cochineal) ซึ่งเป็นสีย้อมธรรมชาติที่ได้จากแมลงโคชินิล มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Dactylopius coccuscosta* ซึ่งเป็นแมลงที่มีขนปุยสีขาว พบบริเวณเม็กซิโก อเมริกากลาง และประเทศแถบเทือกเขาแอนดีสตะวันตกของอเมริกาใต้ โดยกรดนี้ละลายน้ำได้ดีสีจะเปลี่ยนแปลงตามความเป็นกรด-เบส ถ้าอยู่สภาวะเป็นกรดจะมีสีเหลืองเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นสีจะค่อยเปลี่ยนเป็นสีม่วง กรดคาร์มินิกมีความคงทนต่อความร้อน แสงและออกซิเจน (วันโพทอง, 2548) เมื่อพิจารณาโครงสร้างของกรดคาร์มินิกดังภาพที่ 5 พบว่ากรดคาร์มินิกมีหมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิลที่สามารถเกาะบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ (Munir *et al.*,

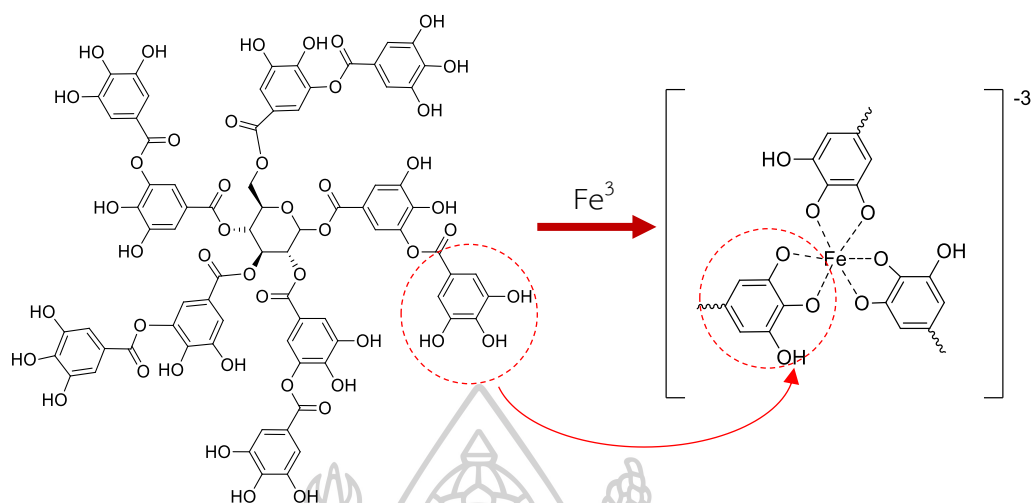
2015; Shahzad *et al.*, 2015) เมื่อนำกรดคาร์มินิกไปดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงช่วงวิซิเบิลได้เพิ่มขึ้น (Munir *et al.*, 2015)



ภาพที่ 5 โครงสร้างกรดคาร์มินิก

2.3.2 สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid เกิดจากการสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ระหว่างกรดแทนนิก (tannic acid) กับ ไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) โดยกรดแทนนิกเป็นสารที่มีรสฝาดและขมสามารถพบได้ในใบ ผลไม้ดิบ เมล็ดผลไม้และเปลือกไม้ เช่น องุ่น ใบชา ลูกพลับ ฝรั่ง เป็นต้น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในการตกตะกอนโปรตีน ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียและเชื้อรา ใช้เป็นยาแก้ท้องร่วง แก้บิด สมานแผล เป็นต้น กรดแทนนิกเป็นสารประกอบประเภทพอลิฟีนอล ที่สามารถละลายน้ำได้มีมวลโมเลกุลสูงประกอบด้วยกรดแกแลลิกที่สร้างพันธะกับกลูโคสโดยหมู่ฟีนอลของกรดแทนนิกสามารถเกิดพันธะโคออร์ดิเนตกับโลหะ (Ringwald Ball, 2015) ได้ ดังภาพที่ 6 แสดงการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตระหว่างกรดแทนนิกกับไอออนของเหล็ก โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกรดแทนนิกกับโลหะสามารถประยุกต์หลายงาน เช่น การขนส่งยา (drug delivery) (Atacan Ozacar, 2015) กำจัดโลหะหนัก (heavy metal ion removal) (Ozacar *et al.*, 2006) สารต้านมะเร็ง (anticancer therapy) (Çakar Özacar, 2019) และเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid เป็นสีย้อมสารประกอบเชิงซ้อนที่สลายตัวยาก (Çakar Ozacar, 2016) หมู่ฟีนอลในโครงสร้างสามารถเกิดพันธะกับไทเทเนียมไดออกไซด์ได้และสามารถดูดกลืนแสงช่วงวิซิเบิลได้กว้างจึงเหมาะแก่การนำ Fe-tannic acid ใช้เป็นสีย้อมในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง



ภาพที่ 6 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ pH 7

(ÇAkar Ozacar, 2016)

2.4 เครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.4.1 เครื่องฟลูออริสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในช่วงอินฟราเรด โดยโมเลกุลจะถูกกระตุ้นเป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้นทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น (vibration) หรือการหมุน (rotation) เท่านั้น ลักษณะเฉพาะของโมเลกุลที่สามารถถูกกลืนแสงในช่วงนี้ได้ คือ

1. รังสีหรือแสงจะต้องมีพลังงานพอเหมาะที่ทำให้เกิดแทรนซิชัน
2. ต้องเกิดการควบคู่ (coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป

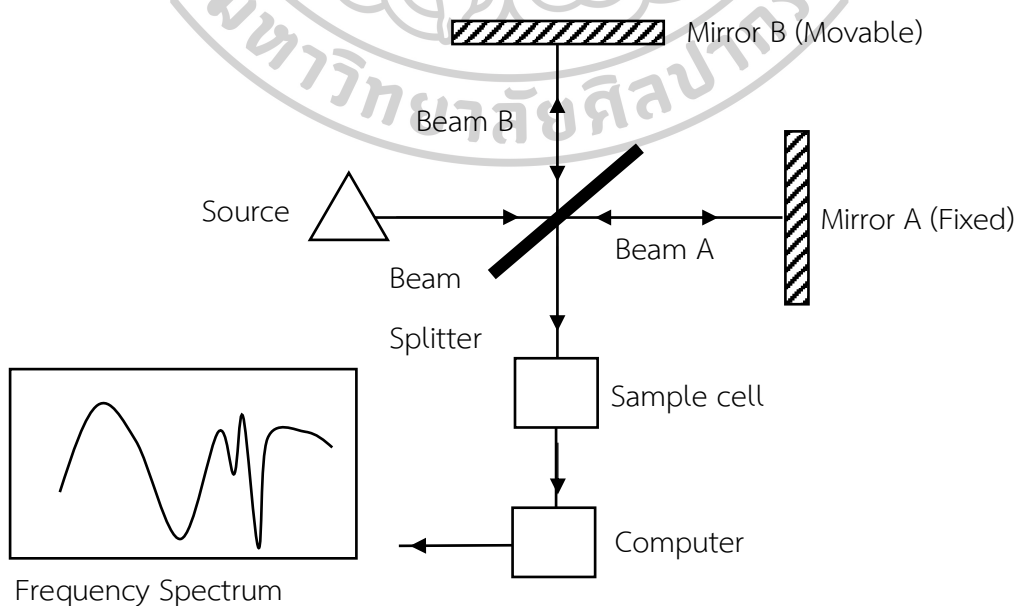
ดังนั้นพันธะแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนแสงในช่วงความถี่ต่าง ๆ ที่เป็นลักษณะเฉพาะจึงใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างได้

หลักการทำงานของเครื่องฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์

เครื่องฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์เป็นการวัดการดูดกลืนแสงที่มีความถี่ต่าง ๆ พร้อมกันทั้งหมด ดังนั้นจึงปรับความถี่ของแสงให้พอเหมาะก่อนเข้าดีเทคเตอร์ด้วย Michelson Interferometer แสดงดังภาพ 7 โดยลำแสงอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดมีความยาวคลื่น λ_1 จะถูกแยกออกเป็นสองลำแสงด้วย beam splitter ลำแสง A จะเดินทางในระยะทางที่คงที่ส่วนลำแสง B จะเดินทางในระยะที่เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของกระจก B เมื่อลำแสง A และ B มารวมกัน จะเกิดการแทรกสอดขึ้น ถ้าระยะทางที่ลำแสง A และ B เดินทางเท่ากันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันทำให้สัญญาณที่วัดได้สูง แต่ถ้ากระจก B เปลี่ยนตำแหน่งไป $\lambda_{1/4}$ ระยะทางลำแสง B คิดเป็น $\lambda_{1/2}$ ของระยะทางลำแสง A เดินทาง ดังนั้นลำแสง A และ B เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันได้ สัญญาณที่ลดลง ในทางปฏิบัติจะเคลื่อนที่กระจก B ด้วยอัตราเร็วคงที่เพื่อให้สัญญาณสม่ำเสมอ สัญญาณนั้นจะถูกเปลี่ยนด้วยคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง

ข้อดีของเครื่องฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์

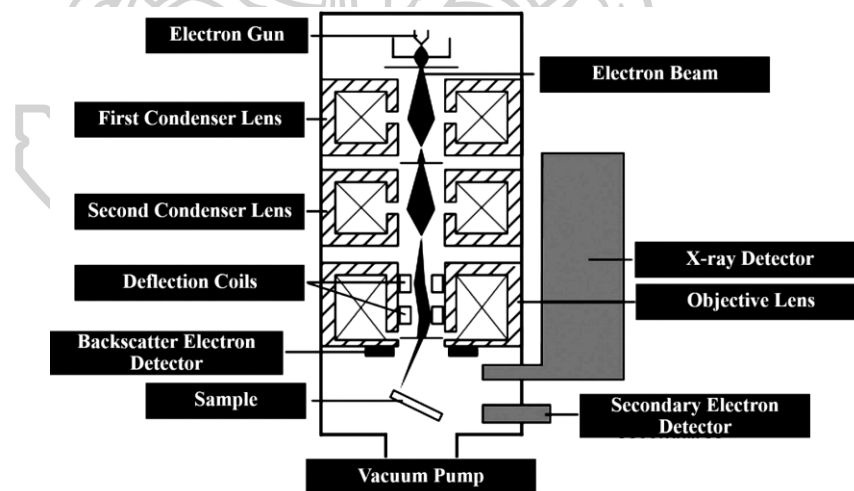
1. สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้เร็ว
2. มีอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนสูงกว่าเครื่องอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์แบบกระจาย
3. ได้สเปกตรัมที่มีการแยกชัดขึ้นและถูกต้อง
4. วิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณน้อยหรือสีที่มีความเข้มข้นสูงได้
5. วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส



ภาพที่ 7 Interferometer และส่วนประกอบต่าง ๆ

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวหรือโครงสร้างภายนอกของตัวอย่าง โดยใช้อิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุนั้น พื้นผิวของตัวอย่างทำให้ได้ภาพเป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง นอกจากนั้นยังสามารถระบุลักษณะของพื้นผิวงานชัดเจนและสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 นาโนเมตร หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเกิดจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปลดปล่อยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) ออกมาซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงและชุดเลนส์คอนเดนเซอร์ ช่วยปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังเลนส์วัตถุโดยเลนส์วัตถุจะทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีจุดโฟกัสบนผิววัตถุพอดีและมีชุดขดลวดควบคุมการกวาดทำหน้าที่ควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวดังกล่าว เมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุนั้นและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ออกมาจากนั้นสัญญาณจะถูกแปลงเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุนั้น ๆ องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังภาพที่ 8 (ศรีอ่อน, 2559)

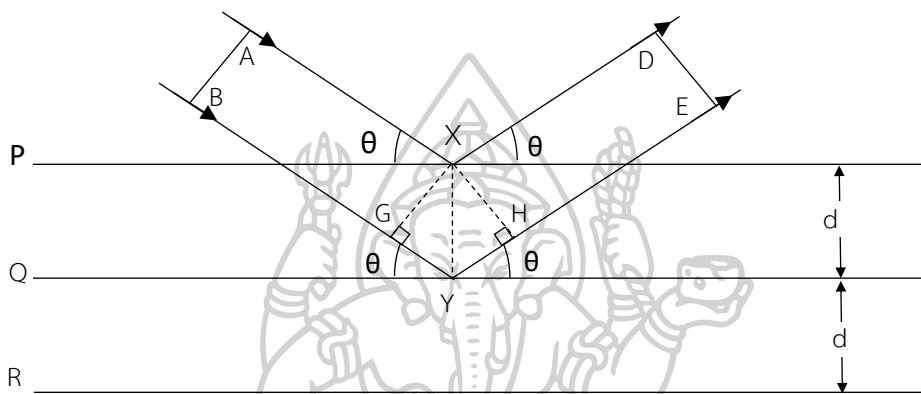


ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ศรีอ่อน, 2559)

2.4.3 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ (รักไทยเจริญชีพ, 2558) แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากภาพที่ 9 แสดง monochromatic beam ของรังสีเอกซ์ที่ตกลงบนผิวหน้าของผลึกเป็นมุม θ P Q และ R แทนมุมของ family planes ที่มีระยะห่างกัน d ระนาบ P ทำให้รังสี AX เลี้ยวเบนไปเป็น XD เช่นเดียวกัน ระนาบ Q ทำให้รังสี BY เลี้ยวเบนไปเป็น YE ทำมุม θ เช่นกัน แม้ว่ารังสีเอกซ์ จะผ่านระนาบของผลึกหลายระนาบด้วยกันแต่จะนำมาพิจารณาเพียง 2 ระนาบด้านบนเท่านั้น

ระนาบ Q ต่ำกว่าระนาบ P ระยะทางของรังสี BYE จะยาวกว่า AXD ด้วยความยาว $GY + YH$ ซึ่งเรียกว่าระยะทางที่ต่างกัน

$$\text{มุม } GXA = 90^\circ \text{ และมุม } AXP = \theta$$

$$\text{ดังนั้นมุม } PXG = 90^\circ - \theta$$

$$\text{มุม } PXY = 90^\circ \text{ ดังนั้นมุม } GXY = \theta$$

$$\text{ในทำนองเดียวกันจะเห็นว่ามุม } YXH = \theta$$

$$\text{จาก } \triangle GXY \sin \theta = \frac{GY}{d}$$

$$\therefore GY = d \sin \theta$$

$$\text{จาก } \triangle YXH \quad \sin \theta = \frac{YH}{d}$$

$$\therefore YH = d \sin \theta$$

ระยะทางที่ต่าง $GY+YH = 2d \sin \theta$ และ XD และ YE จะเกิด constructively interfere เมื่อ path difference มีค่าเท่ากับความยาวคลื่น ดังนั้นสภาวะของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ คือ

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

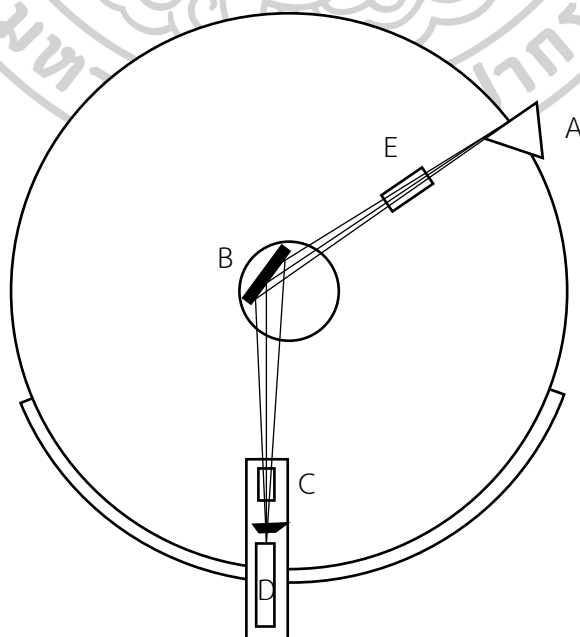
เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็ม

d interplanar spacing

θ เป็นมุมระหว่าง plane กับ X-ray beam

λ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์

การทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์แสดงดังภาพที่ 10 โดยแหล่งกำเนิดพลังงานสูง (A) ผลิตปล่อยรังสีเอกซ์แบบเฉพาะตัว (Characteristic) ที่เป็น $K\beta$ และ $K\alpha$ แล้วผ่านแผ่นกรองแสง (slit) E เพื่อกำจัดความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออก รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ไปยังสารตัวอย่าง (B) เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านสารตัวอย่างจะเกิดการเลี้ยวเบน แล้วให้ลำรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนรวมกันผ่านแผ่นกรองแสง (C) เพื่อไปยังดีเทกเตอร์ (detector) D ซึ่งสามารถวัดรังสีกระเจิงได้ที่มุมต่าง ๆ ทำให้ได้ค่า 2θ ได้ ข้อมูลที่ยืนยันที่ผลแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับค่า 2θ โดยสารแต่ละชนิดจะให้ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน (แม้น อมรสิทธิ์ *et al.*, 2553)



ภาพที่ 10 การทำงานเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.4.4 เครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

เทคนิคสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของวัสดุ ชนิดของพันธะเคมีในระดับ 2-20 ชั้นอะตอม ความหนาของฟิล์ม หมูฟังก์ชันของพื้นผิวและใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารชีวโมเลกุลที่มีการจับตัวกับอนุภาคโลหะที่มีขนาดระดับนาโนเมตร เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่เชิงคุณภาพและปริมาณและสามารถใช้ตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งได้หลายชนิด เช่น โลหะ แก้ว เซรามิก พอลิเมอร์และสารกึ่งตัวนำ

หลักการทางอาศัยหลักการของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คือ เมื่อฉายรังสีเอกซ์แก่สารตัวอย่างเกิดการถ่ายโอนพลังงานของรังสีเอกซ์ให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของธาตุ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพียงพอก็จะหลุดออกมา (E_k) ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ ($h\nu$) กับพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอิเล็กตรอน (E_B) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

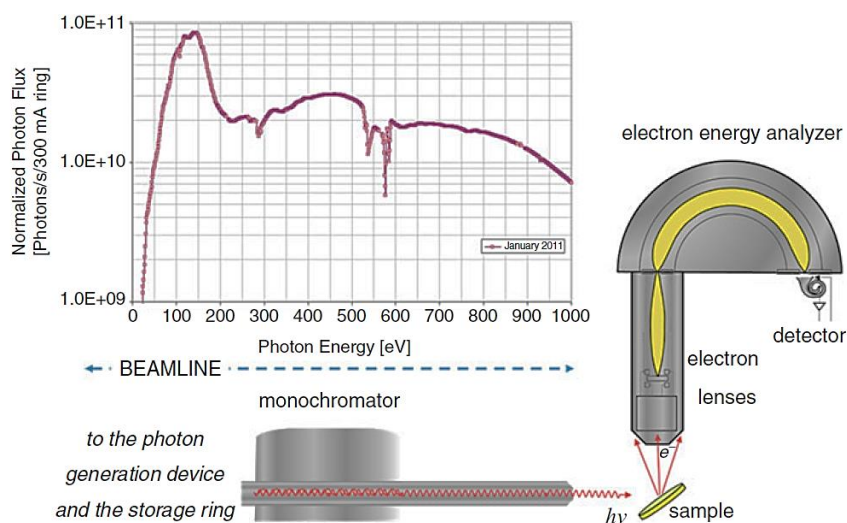
$$E_k = h\nu - E_B \quad (13)$$

โดย E_B คือ พลังงานยึดเหนี่ยว ซึ่งบ่งบอกถึงความแรงของอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส โดยขึ้นกับสถานะแวดล้อมของอะตอมและชนิดอะตอมด้วย หากสารตัวอย่างมีสถานะเป็นของแข็งค่า E_B คิดจากระดับพลังงานของแข็งที่เทียบกับ Fermi level หากให้อยู่ในรูป vacuum level ต้องเพิ่ม work function (ϕ) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_k = h\nu - E_B - \phi \quad (14)$$

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาของธาตุแต่ละชนิดไม่เท่ากันทำให้ทราบถึงชนิดของอะตอมที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนนั้นออกมาได้ ดังนั้นการปรากฏพีคที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวต่าง ๆ เป็นตัวบ่งบอกชนิดของธาตุ ส่วนความเข้มของพีคบ่งบอกปริมาณหรือความเข้มข้นของธาตุดังกล่าวในสารตัวอย่าง นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาสภาพแวดล้อมของอะตอมตัวนั้นได้ด้วยโดยพิจารณาจาก chemical shift หรือการเปลี่ยนแปลงพลังงานยึดเหนี่ยว

องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 11 ประกอบด้วย ระบบสุญญากาศ (vacuum system) แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray source) ตัววิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอน (electron energy analyzer) และระบบข้อมูล (data system)



ภาพที่ 11 เครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

(Doh *et al.*, 2015)

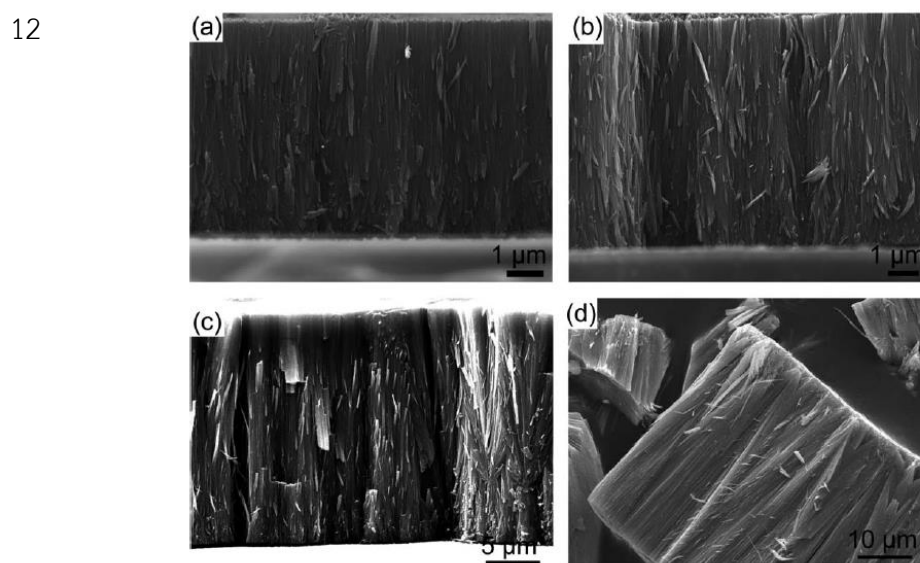
ระบบสูญญากาศ เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างต้องเดินทางไปยังเครื่องตรวจวัดโดยไม่มีการชนกับอนุภาคใดๆ

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์ถูกผลิตและปลดปล่อยออกมาจากขั้วแอโนดโดยวัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วแอโนดคือ อะลูมิเนียมและแมกนีเซียม การให้รังสีเอกซ์มักจะทำให้เกิดความร้อน จึงต้องมีระบบหล่อเย็นด้วยน้ำบริเวณแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วย

ตัววิเคราะห์พลังงาน ระบบตรวจวัดประกอบด้วย 3 ส่วนคือ collection lens energy analyzer และ detector โดย collection lens ทำหน้าที่รวบรวมโฟโตอิเล็กตรอนและทำหน้าที่ลดพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนให้เพียงพอที่จะเข้าสู่ energy analyzer ส่วน energy analyzer จะประกอบด้วย concentric hemisphere 2 ชุดที่มีรัศมีความโค้งแตกต่างกัน และความต่างศักย์ของทั้งสองแผ่นจะต่างกัน ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งอิเล็กตรอนจะมีช่วงพลังงานหนึ่ง ๆ เท่านั้น อิเล็กตรอนที่ค่าพลังงานแตกต่างกันจะถูกระบบคัดแยกออกจากกัน ส่วนของ detector ทำหน้าที่ตรวจนับอิเล็กตรอนที่ออกจาก energy analyzer ก็จะได้ค่าเชิงปริมาณของธาตุนั้น ๆ (ละอองนวล ศรีสมบัติ, 2555)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ (2012) สังเคราะห์ลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างไทเทเนียมไตรคลอไรด์กับกรดออกทานอิก (Octanoic acid) บนกระจกนำไฟฟ้า fluorine-doped tin oxide (FTO) ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-48 ชั่วโมง จะได้ลวดนาโนที่มีความยาวช่วง 6-46 ไมโครเมตร ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นถึง 95 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งระยะเวลาส่งผลต่อความยาวคือเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะเพิ่มความยาวเพิ่มขึ้น ดังภาพที่



ภาพที่ 12 ลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่ระยะเวลาต่างกัน

(a) 1 ชั่วโมง (b) 6 ชั่วโมง (c) 24 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง (X. Wang *et al.*, 2012)

นอกจากนั้นได้ศึกษาความยาวของลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ให้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงของลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

(X. Wang *et al.*, 2012)

ระยะเวลา (ชม.)	ความยาว (ไมโครเมตร)	η (%)
1	6.0	3.21
6	7.5	4.49
12	9.6	5.13
24	21.5	4.81

Liu และคณะ (2012) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนและแบบรูพรุนขนาดเล็กด้วยวิธีแอโนไดเซชัน โดยใช้แผ่นบางไทเทเนียมที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตร ที่สภาวะไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ความต่างศักย์ 10 โวลต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำที่แตกต่างกันเพื่อสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะแบบท่อนาโนและแบบรูพรุน ในการสังเคราะห์แบบท่อนาโนใช้ปริมาณน้ำ 2 โมลาร์ ส่วนแบบรูพรุนใช้ปริมาณน้ำ 1 โมลาร์ พบว่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบรูพรุนคือร้อยละ 1.59 และ ร้อยละ 0.53 ตามลำดับ นอกจากนี้ศึกษาขนาดท่อที่ต่างกันของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน พบว่า ท่อที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 1.59 ส่วนท่อที่มีขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 0.98 (N. Liu *et al.*, 2012)

Bozkurt Cirak และคณะ (2017) ศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน โดยใช้ความต่างศักย์ที่ต่างกัน ส่งผลให้ขนาดและความยาวของท่อต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยงานวิจัยนี้เตรียม ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากแผ่นบางไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ขนาด 1.3 x 2.5 มิลลิเมตร เตรียมที่สภาวะ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ร้อยละ 0.4 โดยมวล น้ำปริมาณร้อยละ 5 โดยมวล เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยศึกษาที่ความต่างศักย์ 10 20 30 40 และ 50 โวลต์ พบว่า การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน ที่ความต่างศักย์สูงจะให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากซึ่งให้ผลดังตารางที่ 2 (Bozkurt Çirak *et al.*, 2017)

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ

(Bozkurt Çirak *et al.*, 2017)

Anodization Voltage (V)	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF(%)	η (%)
10	1.10	0.46	56	0.30
20	1.90	0.45	54	0.50
30	2.30	0.44	54	0.60
40	4.60	0.44	53	1.10
50	8.10	0.46	53	2.00

Liu และคณะ (2014) สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่สภาวะความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แอมโมเนียมฟลูออไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล ปริมาณน้ำร้อยละ 3 โดยปริมาตร ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อให้ได้ผลึกอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มขึ้น โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นผลึกอะนาเทสทั้งหมด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นผลึกแบบรูไทล์เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลึกรูไทล์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพลดลงแสดงผลดังตารางที่ 3 (X. Liu *et al.*, 2014)

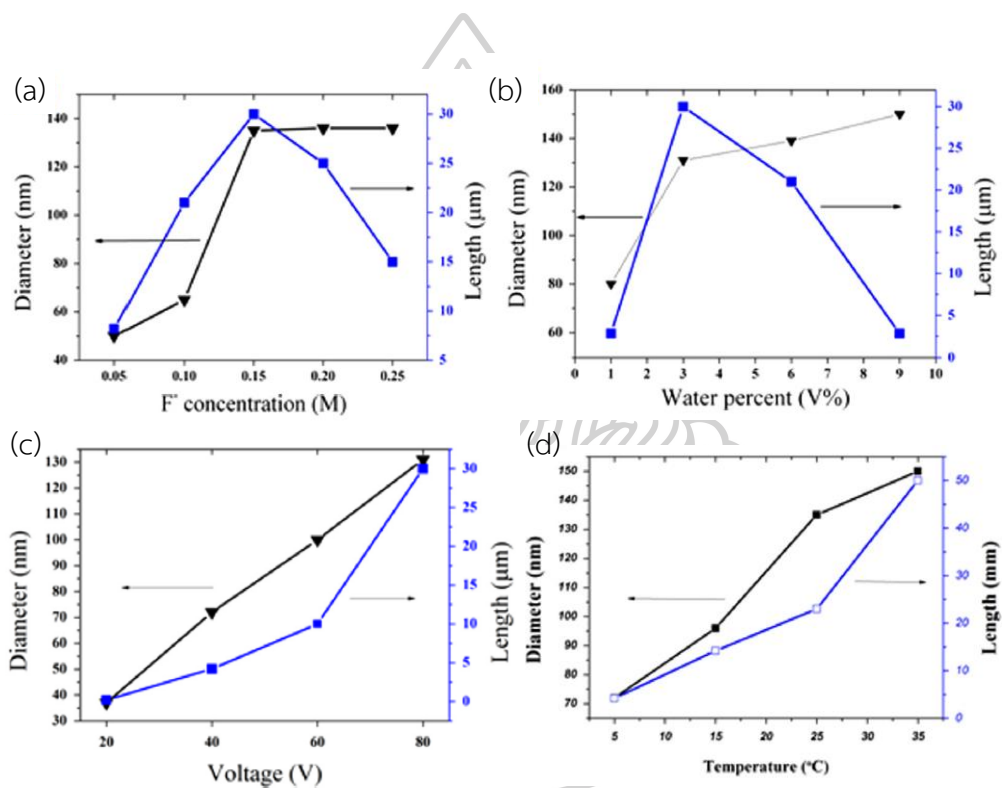
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน

(X. Liu *et al.*, 2014)

Annealing temperature (°C)	Rutile fraction %	J_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	η (%)
300	0	8.65	0.79	67.7	4.59
400	9.1	7.56	0.75	64.1	3.64
500	15.9	6.68	0.73	63.4	3.10

Mohammadpour และ Moradi (2015) ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน ซึ่งในงานนี้เตรียมจากแผ่นบางไทเทเนียมที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตร โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ปริมาณน้ำ ความต่างศักย์และอุณหภูมิ ผลการศึกษาขนาดและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 13 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์มากกว่า 0.15 โมลาร์ ความยาวของท่อลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มากเกินไปเกิดการกัดกร่อนด้านบนของท่อทำให้ท่อที่มีความยาวสั้นลงแสดงผลดังภาพที่ 13(a) ผลของปริมาณน้ำพบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นขนาดและความยาวท่อเพิ่มขึ้นแต่เมื่อปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 3 โดยปริมาตร ความยาวของท่อมีขนาดสั้นลงเนื่องจากปริมาณน้ำที่มากส่งผลให้ความต้านทานในระบบลดลงทำให้อัตราการละลายของออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ท่อมีขนาดที่กว้างขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แสดงผลขนาดและความยาวของท่อดังภาพที่ 13(b) ผลของความต่างศักย์พบว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดท่อเพิ่มขึ้นจึง

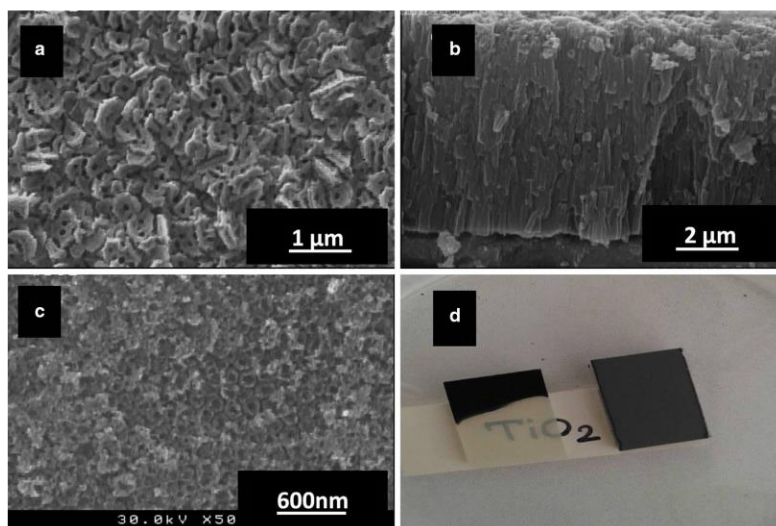
ทำให้ขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้น แสดงผลดังภาพที่ 13(c) ผลของอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลในไอออนในระบบเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นอัตราการเกิดท่อก็เพิ่มขึ้นจึงทำให้ขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 13(d) จากผลของตัวแปรทั้งหมดพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดและความยาวของท่อมากที่สุดคือที่สภาวะความต่างศักย์ 60 โวลต์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์เข้มข้น 0.15 โมลาร์และปริมาณน้ำร้อยละ 3 โดยปริมาตร (Mohammadpour Moradi, 2015)



ภาพที่ 13 กราฟแสดงขนาดและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่าง ๆ (a) ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (b) ปริมาณน้ำ (c) ความต่างศักย์ (d) อุณหภูมิ (Mohammadpour Moradi, 2015)

Iraj และคณะ (2016) เตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน เตรียมจากฟิล์มบางไทเทเนียมหนา 2 ไมโครเมตร บนกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่สภาวะ ความต่างศักย์ 50 โวลต์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แอมโมเนียมฟลูออไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล ในเอทิลีนไกลคอล พบว่าได้ท่อ นาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดท่อ 70 นาโนเมตร และความหนาของผนังท่อ 30

นาโนเมตร ลักษณะของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 14 นอกจากนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงอยู่ที่ 1.97% โดยใช้สีย้อม N719 (Iraj *et al.*, 2016)



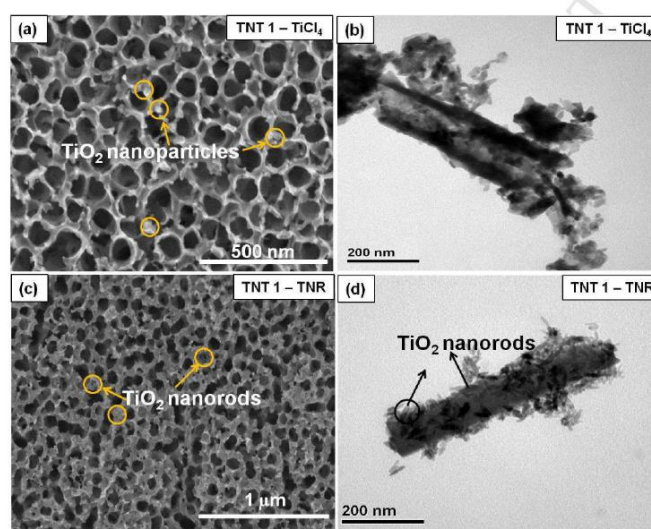
ภาพที่ 14 ลักษณะของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จาก FESEM

(a) ภาพด้านบน (b) ภาพด้านข้าง (c) ภาพด้านล่าง (d) ภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังแอนโนไดเซชัน (Iraj *et al.*, 2016)

Kathivel และคณะ (2015) เตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากไทเทเนียมฟิล์มบนกระจก FTO จากนั้นนำไปแอนโนไดเซชันที่สภาวะ ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.3 โดยมีปริมาณน้ำร้อยละ 2 โดยปริมาตร ในเอทิลีนไกลคอล ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ จะได้ท่อที่มีความยาว 2 ไมโครเมตร โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ขั้วแอโนดจากท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการดัดแปลง (TNT 1) ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่ไทเทเนียมคลอไรด์ (TNT 1 - TiCl_4) และท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีดัดแปลงพื้นผิวให้มีแท่งไทเทเนียมไดออกไซด์ (TNT 1 - TNT) พบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีดัดแปลงพื้นผิวให้มีแท่งไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงที่สุดแสดงผลดังตารางที่ 4 เนื่องจากการเพิ่มแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดูดซับสีย้อมได้ปริมาณมากขึ้น ดังภาพที่ 15 (Kathirvel *et al.*, 2015)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่รูปร่างไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกัน
(Kathirvel *et al.*, 2015)

Photoelectrode	ความหนา (ไมโครเมตร)	J_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	η (%)
TNT1	2	3.88	0.76	0.64	1.90
TNT1-TiCl ₄	2	5.45	0.76	0.63	2.59
TNT1-TNR	2	6.41	0.75	0.62	2.95



ภาพที่ 15 ภาพถ่าย SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปร่างต่างกัน

(a) FESEM และ (b) TEM ของ TNT1-TiCl₄ (c) FESEM และ (d) TEM ของ TNT1-TNR
(Kathirvel *et al.*, 2015)

Lei และคณะ (2010) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบระหว่างการให้แสงจากด้านหน้า (front-side illumination) และการให้แสงจากด้านหลัง (back-side illumination) โดยใช้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อม N719 เป็นขั้วแอโนด พบว่าการให้แสงจากด้านหน้ามีค่าประสิทธิภาพร้อยละ 8.07 ซึ่งสูงกว่าการให้แสงทางด้านหลังที่มีค่าประสิทธิภาพร้อยละ 7.29 เนื่องจากการให้แสงทางด้านหลังเกิดการสะท้อนของกระจกที่ขั้วแคโทด และอาจเกิดการดูดซับแสงของอิเล็กโทรไลต์ทำให้ปริมาณแสงที่สีย้อมจะดูดซับลดลงส่งผลประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้งานนี้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนและอนุภาคนาโนที่มีความหนาเท่ากันคือ 20.8

ไมโครเมตร พบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าประสิทธิภาพมากกว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดได้โดยตรงจึงลดการเกิด recombination กว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ให้แสงต่างกัน

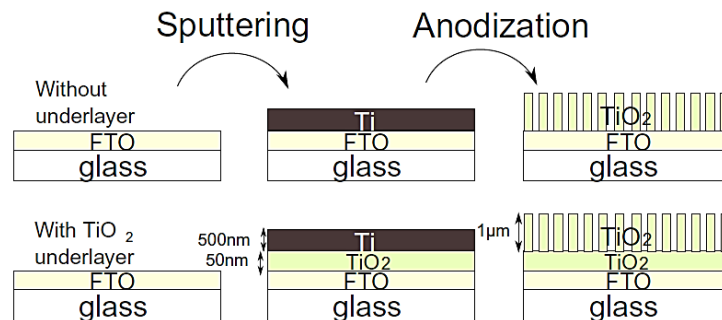
(Lei *et al.*, 2010)

สภาวะ	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF(%)	η (%)
TNT-front	15.46	0.81	64.1	8.07
TNT-back	13.18	0.82	67.5	7.29
TNT	15.46	0.81	64.1	8.07
P25	13.94	0.81	67.2	7.58

Krumpmann และคณะ (2017) ศึกษาชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ระหว่างกระจกนำไฟฟ้า FTO กับท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์กับไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ลักษณะของชั้นแสดงดังภาพที่ 16 การเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมจากฟิล์มไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชันจากนั้นนำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยสีย้อม Cis-Bis(isothiocyanato)(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)(4,4'-bis(5-(hexylthio)thiophen-2-yl)-2,2'-bipyridyl)ruthenium(II) (C106) เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ พบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์และไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะที่คล้ายกันเมื่อนำมาวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยให้ความยาวของท่อประมาณ 2 ไมโครเมตรพบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพเซลล์สูงกว่าร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสดงดังตารางที่ 6 (Krumpmann *et al.*, 2017)

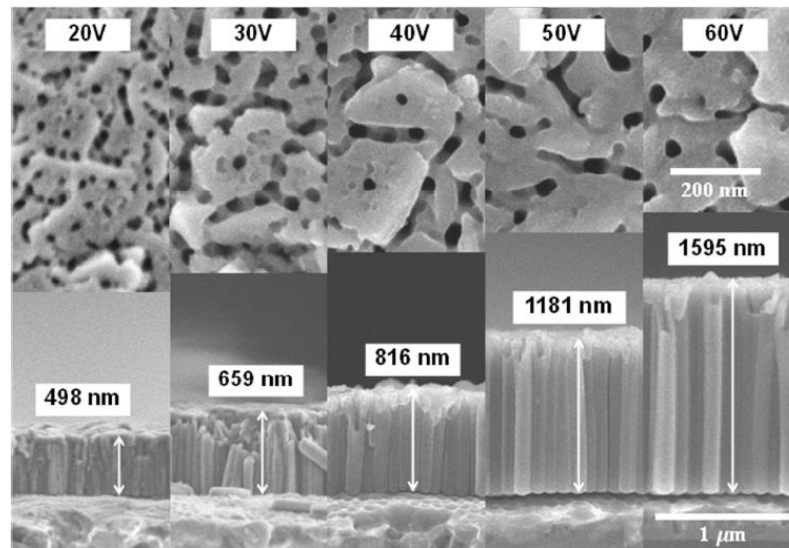
ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีและไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

สภาวะ	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
Without TiO ₂	5.4	0.5	0.36	1.0
With TiO ₂	4.5	0.7	0.50	1.6



ภาพที่ 16 ลักษณะท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีและไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์
(Krumpmann *et al.*, 2017)

Aimpanakit และคณะ (2016) ศึกษาการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มไทเทเนียมที่มีความหนา 700 นาโนเมตร ด้วยวิธีการแอโนไดเซชันโดยศึกษาผลของความต่างศักย์ในช่วง 20-60 โวลต์ ที่มีผลต่อขนาดและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดแอโนไดเซชันเพิ่มขึ้นจึงทำให้ขนาดของท่อกว้างขึ้นและความยาวของท่อเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 17 จะเห็นว่าที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์สามารถเตรียมท่อที่มีความยาวถึง 1595 นาโนเมตร (Aiempanakit *et al.*, 2016)



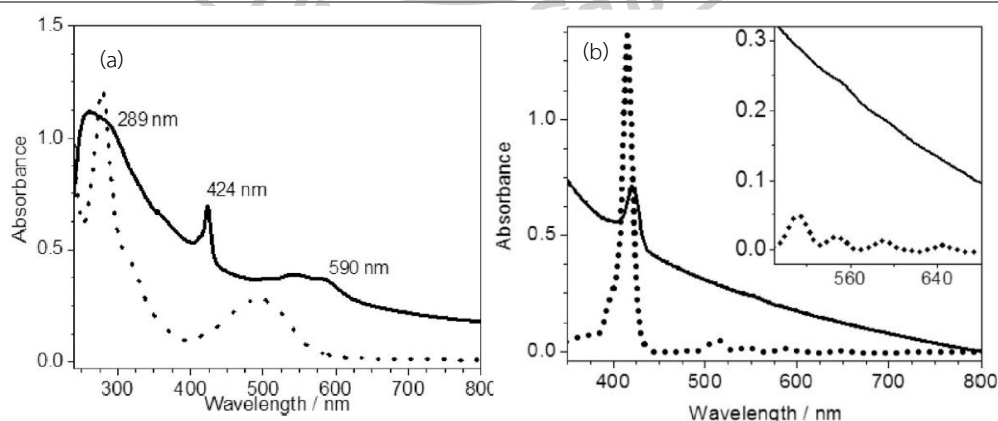
ภาพที่ 17 ภาพถ่าย FESEM ของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยความต่างศักย์ต่างกัน
(Aiempanakit *et al.*, 2016)

Munir และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับพอร์ไฟริน (porphyrin) และกรดคาร์มินิก ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์เตรียมโดยนำสารผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ กรดคาร์มินิกและพอร์ไฟรินเคลือบบนกระจก Indium-dope tin oxide (ITO) ด้วยวิธีการสปิน สภาวะที่ศึกษาผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงคือ อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ light) อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับกรดคาร์มินิก (TiO₂-CA) อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับพอร์ไฟริน (TiO₂-Por) และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับกรดคาร์มินิกและพอร์ไฟริน (TiO₂-CA-Por) แสดงผลประสิทธิภาพของเซลล์ดังตารางที่ 7 พบว่าสภาวะที่มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดคือ TiO₂-CA-Por เนื่องจากช่วงการดูดกลืนแสงของกรดคาร์มินิกและพอร์ไฟรินดูดกลืนช่วงแสงวิจิเบิลที่ต่างกันเมื่อนำมาผสมกันทำให้มีการดูดกลืนช่วงแสงที่กว้างขึ้น แสดงผลการดูดกลืนแสงดังภาพที่ 18 ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงดีขึ้น

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ดูดซับสีย้อมต่างกัน

(Munir *et al.*, 2015)

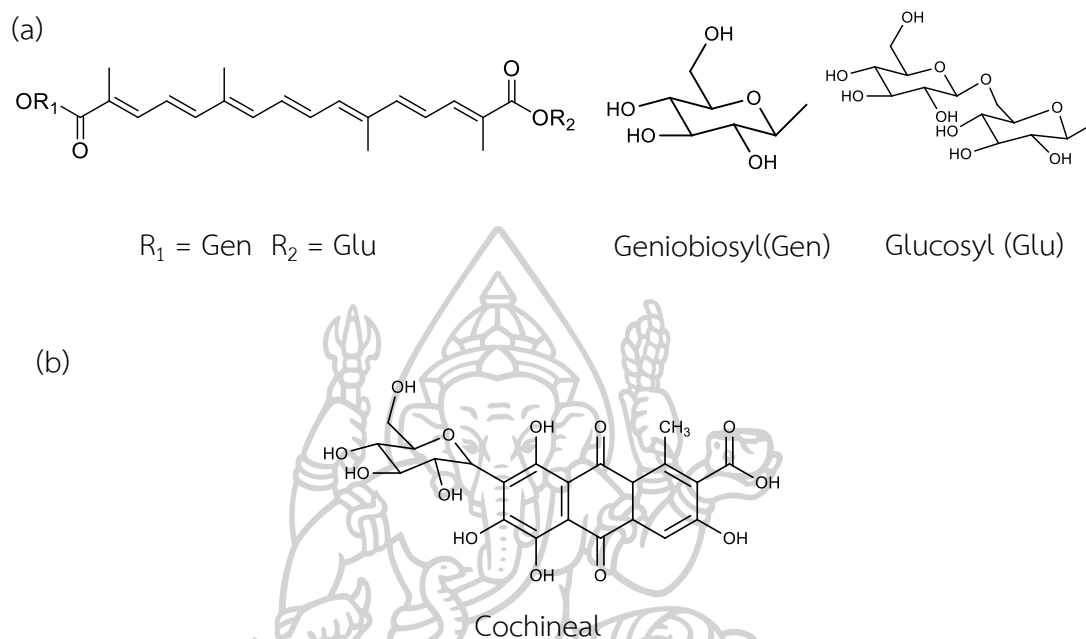
สภาวะ	J _{sc} (mA cm ⁻²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
TiO ₂ light	1.35	0.34	0.39	0.18
TiO ₂ -CA	2.96	0.41	0.46	0.55
TiO ₂ -Por	1.5	0.37	0.34	0.19
TiO ₂ -CA-Por	4.32	0.36	0.41	0.64



ภาพที่ 18 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่ดูดซับสีย้อมต่างกัน

- (a) (a) สเปกตรัมของ TiO₂-CA (····) และ TiO₂-CA-Por (—) (b) สเปกตรัมของพอร์ไฟริน (····) และ TiO₂-Por (—) (Munir *et al.*, 2015)

Park และคณะ (2014) การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวโดยใช้ไทเทเนียมฟิล์มเป็นขั้วแอโนดซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์โดยใช้สีย้อมจากธรรมชาติ 2 ชนิด คือ สีย้อม gardinia และสีย้อม cochineal มีโครงสร้างดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 โครงสร้างสีย้อม gardinia และ cochineal

(a) โครงสร้างสีย้อม gardinia (b) โครงสร้างสีย้อม cochineal (Park *et al.*, 2014)

ซึ่งสีย้อมสองชนิดนี้ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ตรงกัน งานวิจัยนี้จึงนำสีย้อมทั้งสองชนิดนี้มาผสมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ โดยศึกษาที่สภาวะดังนี้ ใช้สีย้อม gardinia สีย้อม cochineal สีย้อม gardinia-cochineal สีย้อม cochineal-gardinia และสีย้อมผสม gardinia กับ cochineal พบว่าสีย้อม cochineal-gardinia ให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงที่สุดคือร้อยละ 0.48 แสดงดังตารางที่ 8 (Park *et al.*, 2014)

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมต่างกัน (Park *et al.*, 2014)

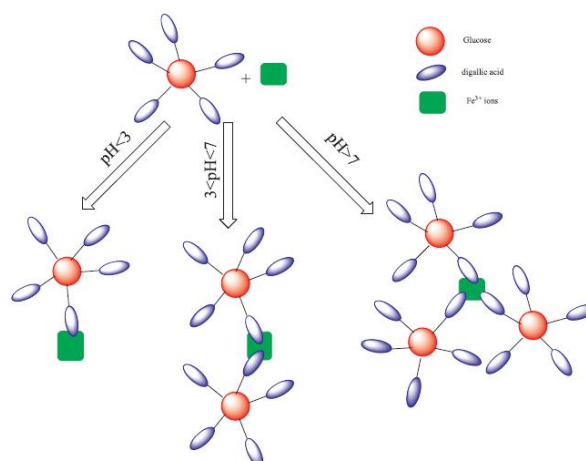
สีย้อม	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
gardinia	1.29	0.56	0.48	0.35
cochineal	0.78	0.51	0.25	0.10
cochineal-gardinia	1.55	0.54	0.57	0.48
gardinia-cochineal	1.44	0.52	0.50	0.37
ผสม gardinia กับ cochineal	1.43	0.51	0.43	0.31

Cakar และ Ozacar (2019) การศึกษาผลของ pH ที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วแอโนด และศึกษาช่วง pH ตั้งแต่ 3.5 - 11.5 พบว่าสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่เตรียมที่สภาวะกรด ไฮโดรเนียมไอออนจะจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของกรดแทนนิก และในสภาวะเบส ไฮดรอกไซด์ไอออนจะไปปกคลุมบริเวณไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับสีย้อมได้น้อยลง ดังนั้นที่สภาวะเป็นกลางประมาณ 7.5 มีการดูดซับสีย้อมได้มากที่สุด ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีค่ามากที่สุดคือ ร้อยละ 2.95 แสดงผลดังตารางที่ 9 และที่ pH ประมาณ 7.5 ลักษณะการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์เป็น ดังภาพที่ 20 (Çakar Özacar, 2019)

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ pH ต่างกัน (Çakar Özacar, 2019)

pH	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF(%)	η (%)
3.5	1.13	0.64	52.0	0.38
4.5	4.78	0.52	35.5	0.89
5.5	2.30	0.97	45.8	1.03
6.5	3.14	0.93	56.7	1.65
7.5	5.22	0.99	57.0	2.95
8.5	4.70	0.94	53.8	2.37
9.5	2.91	0.94	63.5	1.74
10.5	3.39	0.81	48.3	1.33
11.5	2.79	0.92	37.9	0.97

ภาพที่ 20 ความเป็นไปได้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe³⁺ กับกรดแทนนิกในช่วง pH ต่างกัน (Çakar Özacar, 2019)



บทที่ 3

เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonicator) (ยี่ห้อ Ultrasonic cleaner)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก แบบ Top loading 3 ตำแหน่ง (Top loading balance) (ยี่ห้อ Denver Instrument company)
- เตาอบอุณหภูมิสูง (Furnace) (ยี่ห้อ Carbolite รุ่น 301)
- เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) (ยี่ห้อ Diligent รุ่น ST-EC)
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) (ยี่ห้อ Ohaus รุ่น Starter3100)
- เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supplies) (ยี่ห้อ MCP lab electronics รุ่น M10-QS1001)
- เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar cell simulator) (ยี่ห้อ Newport)
- เครื่องฟลูอริเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transformed infrared spectrometer, FT-IR) (ยี่ห้อPerkin Elmer รุ่น Spectrum 100)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field emission scanning electron microscope, FESEM) (ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3)
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) (ยี่ห้อ Agilent รุ่น G1103A)
- เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) (ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8Advance)
- เครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) (ยี่ห้อ Kratos Analytical Ltd. รุ่น AXIS Ultra DLD)

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- โลหะแพลตตินัม
- ปีกเกอร์ (Beaker)
- แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- หลอดหยด (Dropper)

- จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
- ปิเปต (Pipette)
- ลูกยางสำหรับปิเปต (Pipette bulb)
- ไมโครปิเปต (micropipette)
- หยอดหยด (Pasteur pipette)
- มีดตัดกระจก
- คีมคีบ (Forceps)
- ช้อนตักสาร (Spatular)
- ขวดแก้ว (Vial)

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- Ethyleneglycol ($C_2H_6O_2$) (Fisher)
- Ammoniumfluoride (NH_4F) (Merck)
- Acetone (C_3H_6O) (RCLabsan)
- Ethanol (CH_3CH_2OH) (Chemipan, 95.5%)
- Methanol (CH_3OH) (RCLabsan)
- Iron(III) chloride ($FeCl_3$) (Riedel-de Haen)
- Tannic acid ($C_{76}H_{52}O_{46}$) (Riedel-de Haen)
- Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium(II) (N719, $C_{58}H_{86}N_8O_8RuS_2$) (Dyesol)
- Carminic acid ($C_{22}H_{20}O_{13}$) (Sigma Aldrich)
- Iodine (I_2) (Carlo Erba)
- 4-tert-butylpyridine ($C_9H_{13}N$) (Sigma Aldrich)
- Lithiumiodide (LiI) (Sigma Aldrich)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียม

ฟิล์มบางไทเทเนียมสามารถเตรียมด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยใช้เป้าโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.995% และใช้กระจกนำไฟฟ้าขนาด 2.50×3.00 เซนติเมตร เป็นซับสเตรต จากนั้นปรับความดันของระบบให้เป็นสุญญากาศที่ 5×10^{-5} มิลลิบาร์ ปล่อยแก๊สอาร์กอนที่มีอัตราการไหลอยู่ที่ 15 sccm (standard cubic centimeters per minute) โดยคุมความดันของระบบอยู่ที่ 1×10^{-3} มิลลิบาร์ ในการใช้เทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนี้จะใช้กำลังไฟอยู่ที่ 200 วัตต์ ใช้เวลาเคลือบนาน 500 วินาที

3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

นำไทเทเนียมฟิล์มขนาด 1.00×2.50 เซนติเมตร เป็นขั้วแอนโนดและโลหะแพลตทินัมเป็นขั้วแคโทดให้ระยะห่างของขั้วอยู่ที่ 3 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 21 ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากน้ำเอทิลีนไกลคอลผสมกับน้ำและแอมโมเนียมฟลูออไรด์ จากนั้นให้ความต่างศักย์กับระบบ ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยศึกษาผลของความต่างศักย์และผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ สภาวะในการเตรียมแสดงดังตารางที่ 10 หลังจากทำการแอนโนไดเซชันแล้วให้ทำความสะอาดด้วยเครื่องสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในน้ำเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและนำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 10 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

สภาวะ	ตัวแปรควบคุม	
ความต่างศักย์	- ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์	
- 20 V	- 30 V	0.8 %wt
- 40 V	- 50 V	- ปริมาณน้ำ 2 %wt
ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์	- ความต่างศักย์ 30 V	
- 0.4 %wt	- 0.8 %wt	- ปริมาณน้ำ 2 %wt
- 1.2 %wt	- 1.4 %wt	



ภาพที่ 21 กระบวนการเตรียมฟอนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

3.4.3 ทดสอบความสามารถทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.4.3.1 เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

นำลิเทียมไอโอดีต์ปริมาณ 0.0669 กรัม ไอโอดีนปริมาณ 0.0127 กรัมและ 4-เทอร์ท-บิวทิลไพรีดีนปริมาณ 0.0676 กรัมผสมกันละลายในอะซิโตนไตรัตปริมาณ 10.00 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

3.4.3.2 เตรียมสารละลายสีย้อม Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium(II) (N719)

เตรียมสีย้อม N719 ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ โดยชั่งสีย้อม N719 0.0594 กรัม ละลายในเอทานอล ปรับปริมาตรเป็น 100.00 มิลลิลิตร

3.4.3.3 เตรียมสารละลายสีย้อมกรดคาร์มินิก

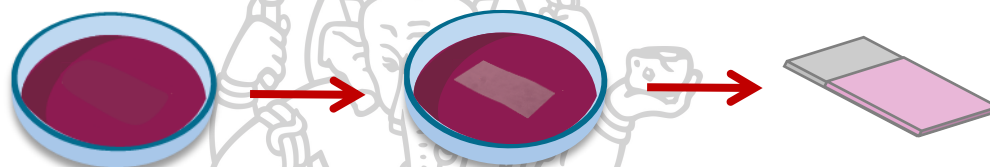
เตรียมสีย้อมกรดคาร์มินิก 3 ความเข้มข้น คือ 0.50 0.25 และ 0.10 มิลลิโมลาร์ กรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์เตรียมโดยชั่งกรดคาร์มินิก 0.0123 กรัม ละลายในเอทานอล ปรับปริมาตรเป็น 50.00 มิลลิลิตร เตรียมกรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ โดยปิเปตกรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 12.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 25.00 มิลลิลิตร เตรียมกรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ โดยปิเปตกรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 25.00 มิลลิลิตร

3.4.3.4 เตรียมสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

นำสารละลายกรดแทนนิกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร ที่ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 6 จากนั้นนำสารละลายไอรอนคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 8.00 มิลลิลิตร ที่ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายมาผสมกันจะได้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

3.4.3.5 เตรียมขั้วไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาแช่ในสีย้อมที่เตรียมไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องในที่มืด จากนั้นล้างสีย้อมส่วนเกินด้วยตัวทำละลายของสีย้อมแต่ละชนิดเป่าฟิล์มให้แห้ง ดังภาพที่ 22



สีย้อม N719 เข้มข้น
0.50 มิลลิโมลาร์

แช่ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียม
ไดออกไซด์ในสีย้อม 12 ชั่วโมง

ขั้วฟิล์มบางท่อนาโน
ไทเทเนียมไดออกไซด์

ภาพที่ 22 แผนภาพแสดงการเตรียมขั้วฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

3.4.3.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

ใช้ขั้วแพลตตินัมเป็นขั้วแคโทด และใช้ขั้วฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นขั้วแอโนด โดยติดเทปด้านข้างทั้งสองข้างให้ระยะประมาณ 0.10 เซนติเมตร จากนั้นนำขั้วทั้งสองประกบกันลักษณะแซนวิชและปิดแผ่นหน้ากักที่มีขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตร เพื่อกำหนดพื้นที่ในการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์ แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

สัญลักษณ์ดังต่อไปนี้ใช้แทนตัวแปรต่าง ๆ ตลอดรายงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 สัญลักษณ์ตัวแปรต่าง ๆ

สัญลักษณ์	ตัวแปร
TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
TNT ที่ไม่เผา	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการเผา
0.10mMCar/TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิก เข้มข้น 0.10 mM
0.25mMCar/TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิก เข้มข้น 0.25 mM
0.50mMCar/TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิก เข้มข้น 0.50 mM
0.002MFe-TA/TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน เข้มข้น 0.002 M
0.005MFe-TA/TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน เข้มข้น 0.005 M
0.010MFe-TA/TNT	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน เข้มข้น 0.010 M
TNT-ITO	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ITO
TNT-FTO	ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า FTO
POW-ITO	ฟิล์มบางอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ITO

3.4.4 ตรวจสอบโครงสร้างและคุณลักษณะต่าง ๆ ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

3.4.4.1 ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมที่สภาวะต่าง ๆ มาตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3

3.4.4.2 ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้แช่สีย้อมและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สีย้อมแต่ละชนิดด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์ อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum 100

3.4.4.3 ตรวจสอบผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เผาและฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผา 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยสร้างรังสีเอกซ์ด้วย $\text{Cu K}\alpha$ สแกนจาก 10° - 60° (2θ) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8Advance อัตราเร็วในการตรวจวัด 1.000 deg/min

3.4.4.4 ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุบนแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มที่ดูดซับสีย้อมชนิดต่าง ๆ

นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้แช่สีย้อม ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สีย้อม N719 ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สีย้อมกรดคาร์มินิก และฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Kratos Analytical Ltd. รุ่น AXIS Ultra DLD

3.4.4.5 ตรวจสอบช่องว่างพลังงาน (energy gap)

นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้แช่สีย้อม ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สีย้อมรูทีเนียม ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ Agilent รุ่น G1103A

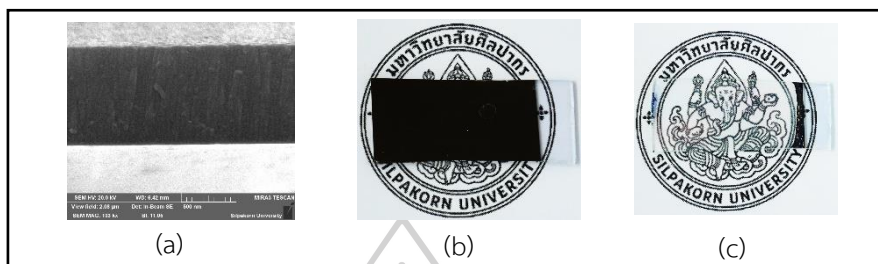
3.4.4.6 การหาปริมาณสีย้อมบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

นำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสีย้อมไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่มีสีย้อมหาปริมาณด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ Agilent รุ่น G1103A

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

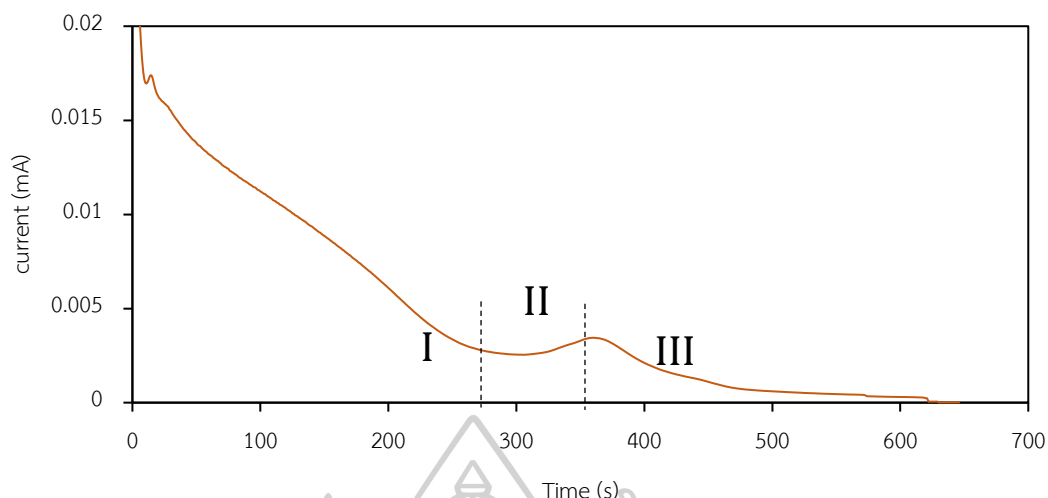


ภาพที่ 24 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมและไทเทเนียมไดออกไซด์

(a) ภาพถ่ายความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียม จากเทคนิค FESEM (b) ฟิล์มบางไทเทเนียม ก่อนผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชัน (c) ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน

การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่สภาวะความดันของระบบให้เป็นสุญญากาศที่ 5×10^{-5} มิลลิบาร์ แก๊สอาร์กอนที่มีอัตราการไหลอยู่ที่ 15 sccm ความดันของระบบอยู่ที่ 1×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟอยู่ที่ 200 วัตต์ ใช้เวลาเคลือบนาน 500 วินาที ได้ฟิล์มไทเทเนียมที่มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 24(a) และฟิล์มบางมีลักษณะที่บ่งชี้แสดงดังภาพที่ 24(b) เมื่อนำฟิล์มบางไทเทเนียมผ่านการแอนโนไดเซชันพบว่าฟิล์มบางที่เกิดขึ้นมีลักษณะโปร่งใสแสดงดังภาพที่ 24(c) บ่งบอกว่าไทเทเนียมเปลี่ยนไปเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อยืนยันการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์และฟลูออเรสเซนต์ฟอรัมอินฟราเรดสเปคโตรเมตรี

ขั้นตอนในการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้ากับเวลาดังภาพที่ 25 พบว่าสามารถแบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้



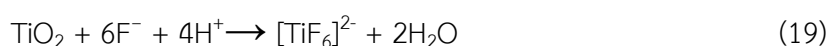
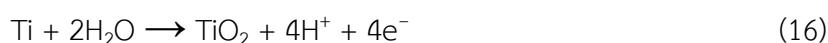
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้ากับเวลาในกระบวนการแอโนไดเซชัน

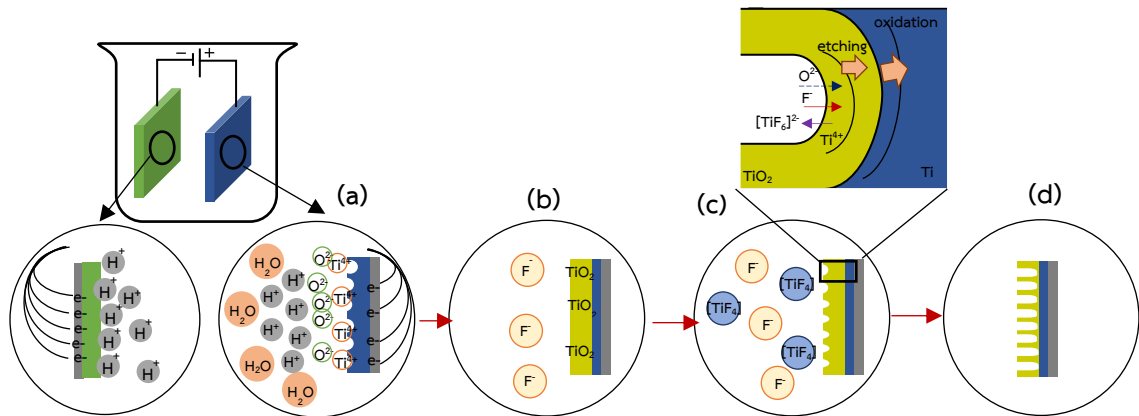
ขั้นที่ 1 ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ดังสมการที่ (15)-(17) ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณผิวของโลหะไทเทเนียมดังภาพที่ 26(b) ทำให้บริเวณผิวเกิดเป็นชั้นฉนวนไฟฟ้า ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดลดลงค่ากระแสไฟฟ้าจึงลดลง

ขั้นที่ 2 ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการกัดกร่อนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จากไอออนของฟลูออไรด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังสมการที่ (18)-(19) ทำให้ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดเป็นรูพรุนดังภาพที่ 26(c) ส่งผลให้ความต้านทานลดลงค่ากระแสไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น

ขั้นที่ 3 ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจนกระทั่งคงที่เป็นขั้นตอนที่เริ่มเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ดังภาพที่ 26(d) โดยในขั้นตอนนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะไทเทเนียมและเกิดการกัดกร่อนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ควบคู่กันไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งอัตราเกิดปฏิกิริยาทั้งสองสมดุลกัน

สมการในการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

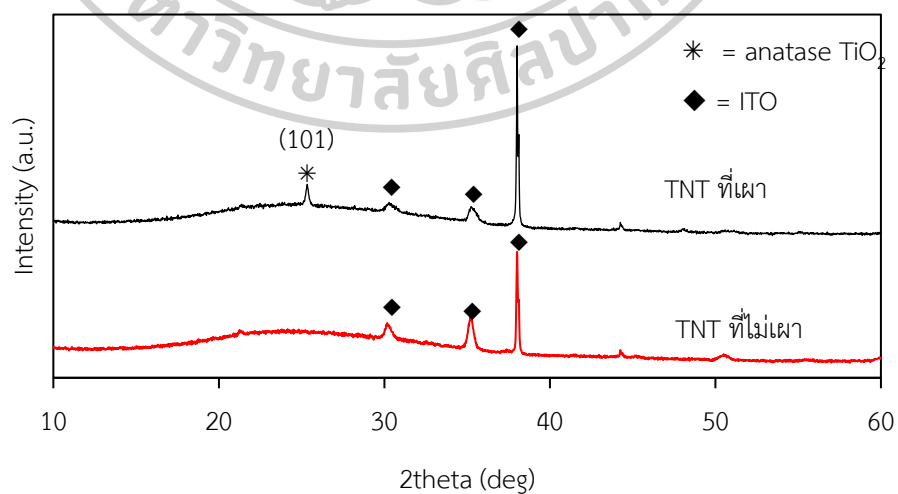




ภาพที่ 26 กระบวนการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

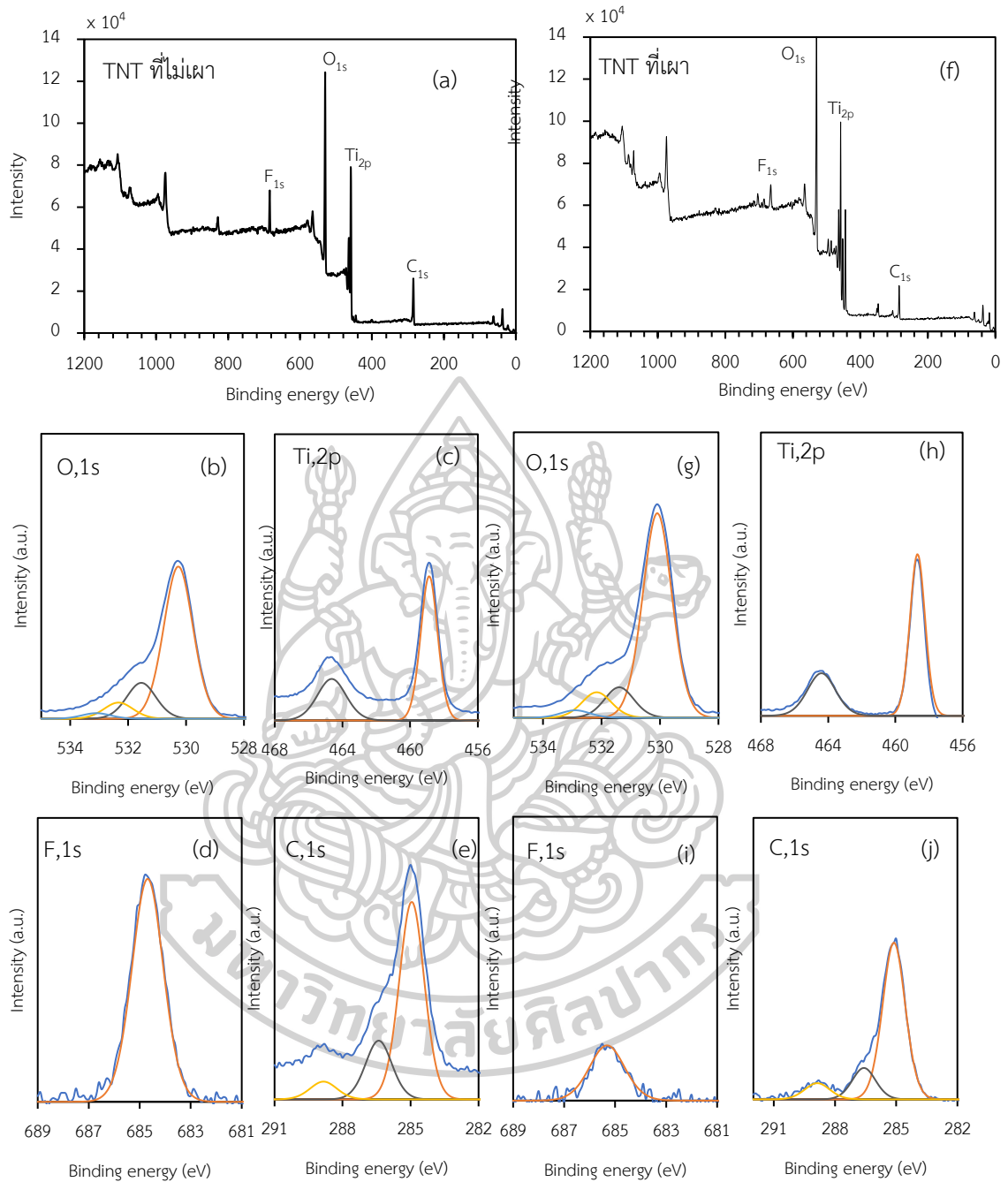
(a) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด (b) เกิดชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนโลหะไทเทเนียม (c) เกิดปฏิกิริยาการกัดเซาะชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (d) เกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภาพนี้ ดัดแปลงจากงานวิจัยก่อนหน้า (Ge *et al.*, 2016; Rho *et al.*, 2015)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยการแอโนไดเซชันด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เปรียบเทียบระหว่างฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และที่ไม่ผ่านการเผา พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.4 องศา ดังภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่าการเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นอะนาทาสได้



ภาพที่ 27 XRD pattern ของ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา

ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุภายในฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากการแอนโนไดเซชันด้วยเทคนิค XPS โดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และไม่ผ่านการเผา แสดงดังภาพ 28 และตารางที่ 12 แสดงองค์ประกอบและปริมาณของธาตุ ซึ่งประกอบด้วยธาตุ ไทเทเนียม ออกซิเจน ฟลูออรีน และคาร์บอน จะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนและฟลูออรีนลดลงเมื่อเผาฟิล์มที่ 400 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งธาตุไทเทเนียมที่เผาและไม่เผา ดังภาพที่ 28(c) และ (h) พบว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ 464.39 และ 458.68 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นตำแหน่งของธาตุไทเทเนียม ที่สร้างพันธะเป็นสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสองตำแหน่งและตำแหน่ง 458.68 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะฟลูออโรไททาเนต $[\text{TiF}_6]^{2-}$ ซึ่งยืนยันโดยตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวของฟลูออรีนที่ 685.30 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังภาพที่ 28 (d) และ (i) ซึ่งเป็นตำแหน่งของสารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะฟลูออโรไททาเนต $[\text{TiF}_6]^{2-}$ (Regonini, 2008) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์และยังถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ธาตุออกซิเจนที่เผาและไม่เผา ดังภาพที่ 28 (b) และ (g) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 530.09 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นตำแหน่งของธาตุออกซิเจน ที่มาจากสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Larsson et al., 1996) พลังงานยึดเหนี่ยว 531.37 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และอาจเป็นดีบุกออกไซด์ (Barreca et al., 2000) ซึ่งอยู่ในชั้นกระจกนำไฟฟ้า พลังงานยึดเหนี่ยวที่ 532.14 และ 532.87 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นสารประกอบเอทิลีนไกลคอล (Gonzalez-Torres et al., 2014) และน้ำ (Yamamoto et al., 2008) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนของฟิล์มที่เผาและไม่เผาดังภาพที่ 28 (e) และ (j) พลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) และพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ที่พลังงาน 285.09 อิเล็กตรอนโวลต์ พันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮดรอกซิล (C-OH) ที่พลังงาน 286.57 อิเล็กตรอนโวลต์ พันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O) ที่พลังงาน 288.88 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นตำแหน่งของสารประกอบเอทิลีนไกลคอล (Wang et al., 2017) จากผลของ XPS เป็นการยืนยันได้ว่าการทำแอนโนไดเซชันของฟิล์มบางไทเทเนียมสามารถเกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์ได้และนอกจากนั้นยังมีสารประกอบต่าง ๆ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น เอทิลีนไกลคอล น้ำ เฮกซะฟลูออโรไททาเนต เป็นต้น ที่ถูกดูดซับบนฟิล์มซึ่งอาจเกิดจากการกำจัดไม่หมดจึงยังคงเกาะอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แม้ว่าจะเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ก็ยังคงเหลืออยู่ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 12



ภาพที่ 28 XPS ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา

(a)-(e) แสดงตำแหน่งธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการเผา (f)-(j) แสดงตำแหน่งธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผา 400°C 3 ชม.

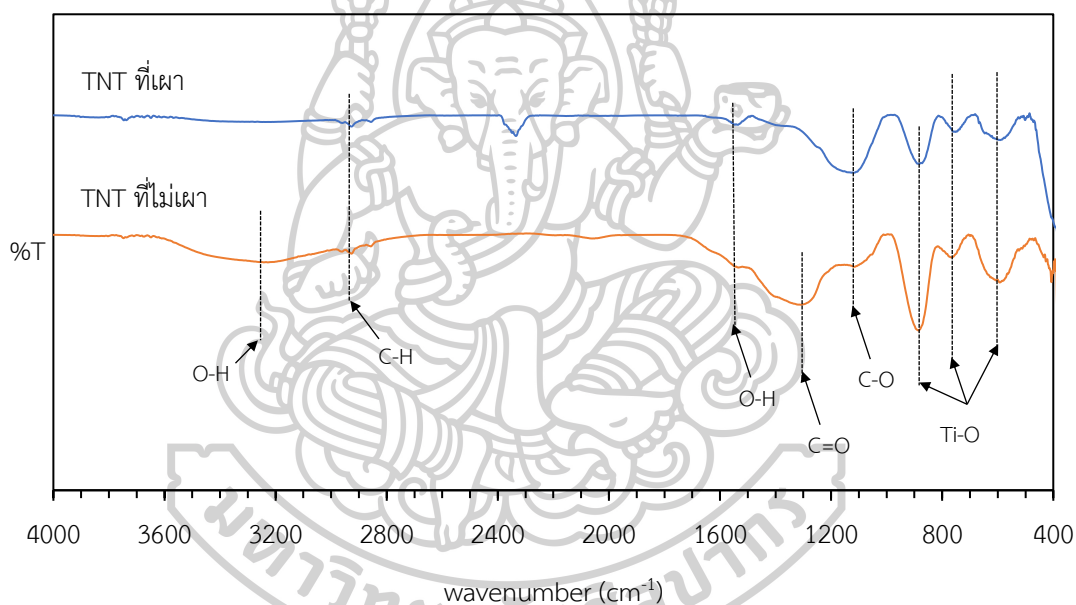
ตารางที่ 12 องค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่เผา

ธาตุ	ปริมาณธาตุบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เผา (%wt)	ปริมาณธาตุบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผา (%wt)
ไทเทเนียม	40.13	33.22
ออกซิเจน	32.40	35.13
ฟลูออรีน	5.68	1.44
คาร์บอน	20.07	11.00

ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคฟลูออริสเซนซ์ฟอรัมอินฟราเรดสเปกโตรเมตรีโดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มบางท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และที่ไม่ผ่านการเผา จากภาพที่ 29 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่ตำแหน่งต่าง ๆ และสรุปในตารางที่ 13 ดังนี้ ตำแหน่งเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 596 746 และ 880 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะระหว่างไทเทเนียมกับออกซิเจน (Ti-O stretching) (Praveen *et al.*, 2013) ในช่วงเลขคลื่น 3600-3000 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H stretching) (El-Sherbiny *et al.*, 2014; Praveen *et al.*, 2013) เป็นพันธะของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีตำแหน่งของสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดจากการกำจัดไม่หมดคือเอทิลีนไกลคอลซึ่งปรากฏหมู่ฟังก์ชัน ที่ตำแหน่ง 2926 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H stretching) (Praveen *et al.*, 2013) ตำแหน่ง 1304 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะคู่ ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O stretching) (Praveen *et al.*, 2013) ตำแหน่ง 1535 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H bending) (Krishnan Krishnan, 1966) และตำแหน่ง 1123 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O stretching) (Praveen *et al.*, 2013) จากผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟลูออริสเซนซ์ฟอรัมอินฟราเรดสเปกโตรเมตรีสอดคล้องกับเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ นั่นคือฟิล์มบางไทเทเนียมที่ผ่านวิธีการแอนโนไดเซชันสามารถเกิดปฏิกิริยาสามารถสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ซึ่งมีน้ำและเอทิลีนไกลคอลถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม

ตารางที่ 13 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR

เลขคลื่น (cm^{-1})	การสั่นของพันธะ
597 746 880	Ti-O stretch
1123	C-O stretch
1304	C=O stretch
1535	O-H bending ของหมู่ไฮดรอกซิล
2926	C-H stretch
3000 3600	O-H stretch ของ พันธะไฮโดรเจน

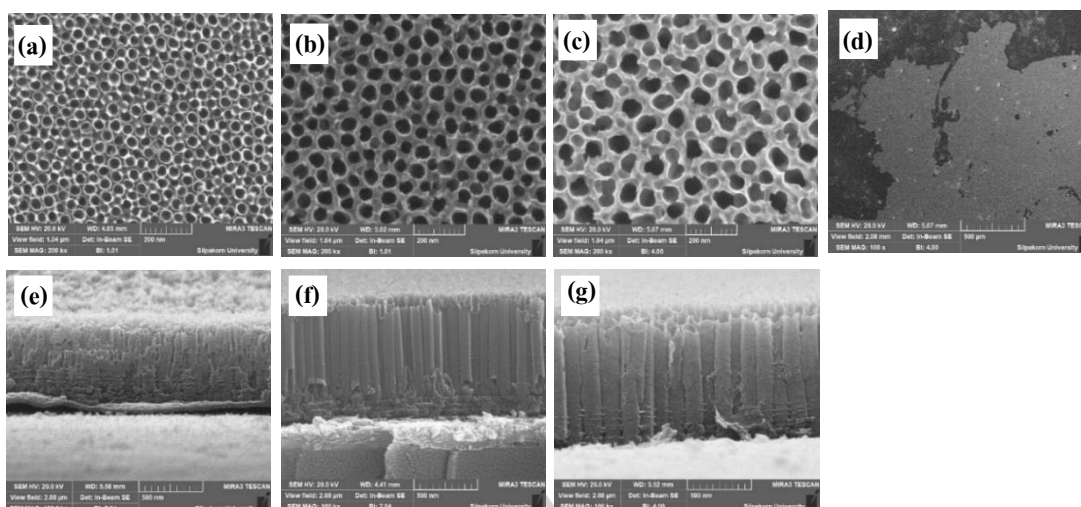


ภาพที่ 29 FT-IR spectrum ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา

4.2 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี แอนโนไดเซชัน

4.2.1 ผลของความต่างศักย์

จากการศึกษาผลความความต่างศักย์ต่อรูปร่างการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งศึกษาที่ความต่างศักย์ 20 – 50 โวลต์ รูปร่างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ในภาพที่ 30 (a)-(g) แสดงภาพถ่ายของรูปร่างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความต่างศักย์ 20 - 40 โวลต์ ทั้งด้านบนและด้านข้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ พบว่าเกิดการหลุดลอกของโลหะฟิล์มไทเทเนียมจึงไม่แสดงผล จากภาพ SEM เห็นได้ว่าที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ท่อที่มีขนาดเล็ก ความยาวของท่อสั้นและไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นได้ขนาดท่อใหญ่ขึ้น ความยาวของท่อเพิ่มขึ้นและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการกัดเซาะชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น (Bozkurt Çirak et al., 2017) จึงทำให้ขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้นตามความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลคล้ายกับงานวิจัยของ Mohammadpour และ Moradi (Mohammadpour and Moradi, 2015) และด้วยเหตุผลที่กล่าวข้างต้นนี้จึงทำให้ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เกิดการหลุดลอกทั้งแผ่นฟิล์มและที่ความต่างศักย์ที่ 40 โวลต์ เกิดการหลุดลอกบางส่วนดังภาพที่ 30(g) การหลุดของชั้นฟิล์มโลหะไทเทเนียมเกิดเนื่องจากไอออนที่เคลื่อนที่เร็วส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วจึงไม่เหมาะสมสำหรับการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร หากเพิ่มความหนาของไทเทเนียมฟิล์มอาจเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ขนาดและความยาวของท่อเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นความต่างศักย์ที่เหมาะสมในการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์คือความต่างศักย์ 30 โวลต์ ซึ่งมีลักษณะของความยาวท่อ 768 นาโนเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 44 นาโนเมตร ดังตารางที่ 14



ภาพที่ 30 ภาพถ่าย SEM ของ TiO_2 nanotube ทั้งด้านบนและด้านข้างที่มีความต่างศักย์ต่างกัน (a) และ (e) 20 V (b) และ (f) 30 V (c) (d) และ (g) 40 V

ตารางที่ 14 ผลความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากความต่างศักย์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

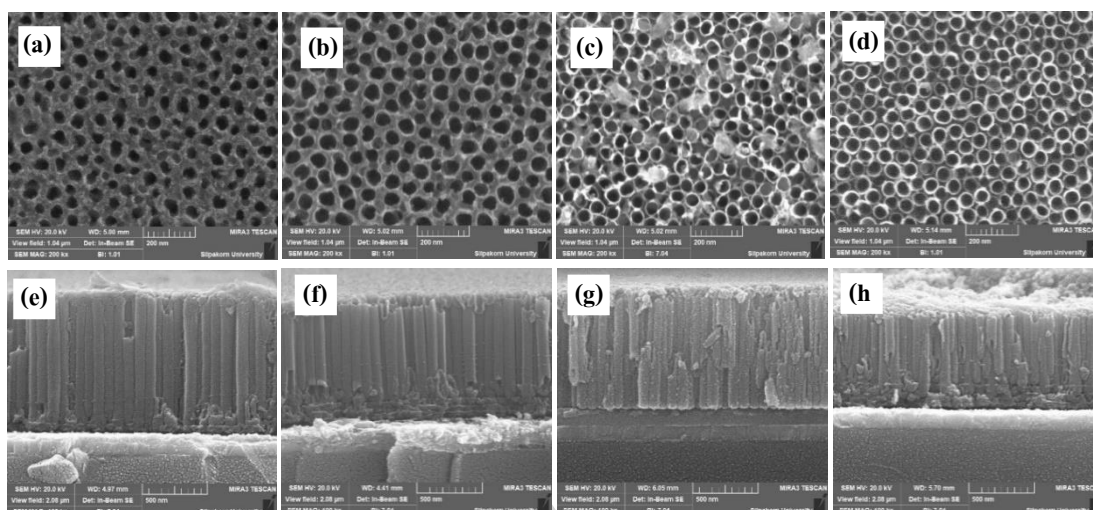
ความต่างศักย์ (V)	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (nm)	ความยาวท่อ (nm)
20	48 ± 7.38	296 ± 47.59
30	44 ± 4.63	768 ± 26.70
40	78 ± 6.95	846 ± 25.40
50	75 ± 7.18	1114 ± 12.36

4.2.2 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์

ศึกษาความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.4 0.8 1.2 และ 1.4 โดยมวล ซึ่งรูปร่างของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พิจารณาจากภาพถ่าย SEM แสดงดังภาพ 31 (a)-(h) จากภาพพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไอออนฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้น แต่ ความยาวของท่อลดลงเนื่องจากกระบวนการเกิดท่อนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นกับอัตราการเกิดชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มาจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะไทเทเนียมกับน้ำ และอัตราการกัดเซาะชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไอออนฟลูออไรด์ที่ทำให้เกิดเป็นท่อ ดังนั้นที่ความเข้มข้นของไอออนฟลูออไรด์น้อย อัตราการกัดเซาะชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงน้อยส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดเล็กและเมื่อความเข้มข้นของไอออนฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นอัตราการกัดเซาะชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของไอออนฟลูออไรด์นอกจากจะเกิดการกัดเซาะบริเวณก้นท่อซึ่งเกิดการกัดเซาะบริเวณด้านบนของท่อทำให้ความยาวของท่อสั้นลงซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นความสูงของท่อลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammadpour และคณะ (Mohammadpour and Moradi, 2015)

ตารางที่ 15 ผลความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (nm)	ความยาวท่อ (nm)
0.4%wt NH ₄ F	34 ±4.46	950 ±26.49
0.8%wt NH ₄ F	44 ±4.63	768 ±26.70
1.2%wt NH ₄ F	50 ±4.94	758 ±21.69
1.4%wt NH ₄ F	50 ±4.07	529 ±23.82

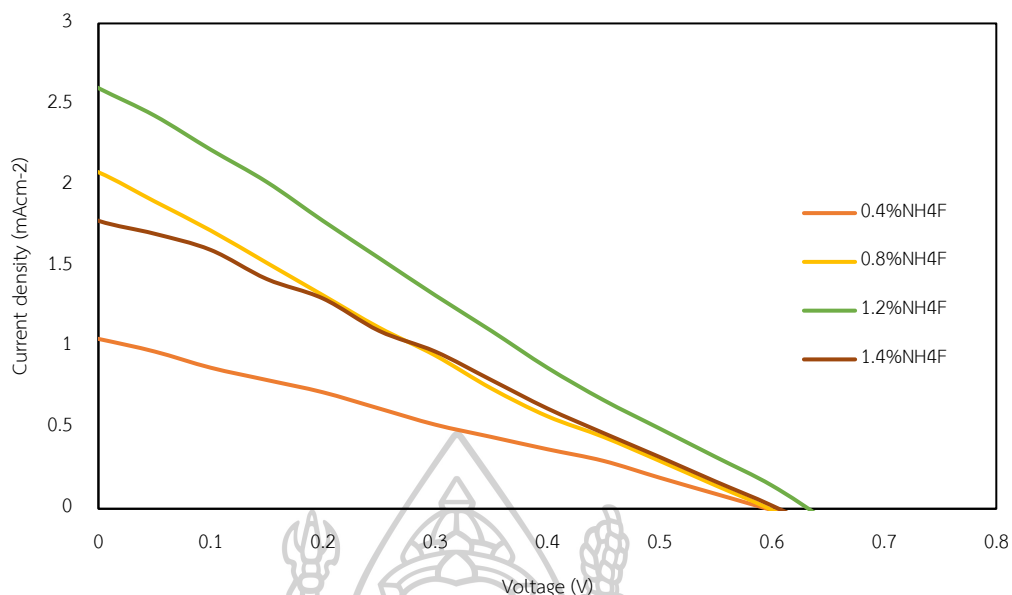


ภาพที่ 31 ภาพถ่าย SEM ของ TiO_2 nanotube ของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่เข้มข้นต่างกัน (a) และ (e) ร้อยละ 0.4 โดยมวล (b) และ (f) ร้อยละ 0.8 โดยมวล (c) และ (g) ร้อยละ 1.2 โดยมวล (d) และ (h) ร้อยละ 1.4 โดยมวล

เนื่องจากรูปร่างของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากแอมโมเนียมฟลูออไรด์มีรูปร่างที่คล้ายกันจึงนำท่อที่เตรียมได้จากแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อม N719 ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 16 พบว่าความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่ร้อยละ 1.2 โดยมวล ให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากที่สุดในงานวิจัยนี้จึงเลือกสภาวะที่ใช้ในการเตรียมท่อที่ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่ร้อยละ 1.2 โดยมวล ความต่างศักย์ 30 โวลต์

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ต่างกัน

สภาวะ	J_{sc}	V_{oc}	FF	η	ปริมาณสีย้อม (nmolcm^{-2})
0.4 %wt NH_4F	1.05	0.60	0.25	0.16	7.45
0.8 %wt NH_4F	2.05	0.60	0.23	0.28	8.41
1.2 %wt NH_4F	2.6	0.63	0.24	0.40	12.00
1.4 %wt NH_4F	1.81	0.60	0.27	0.29	5.33



ภาพที่ 32 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงบน TNT ที่ใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ต่างกัน

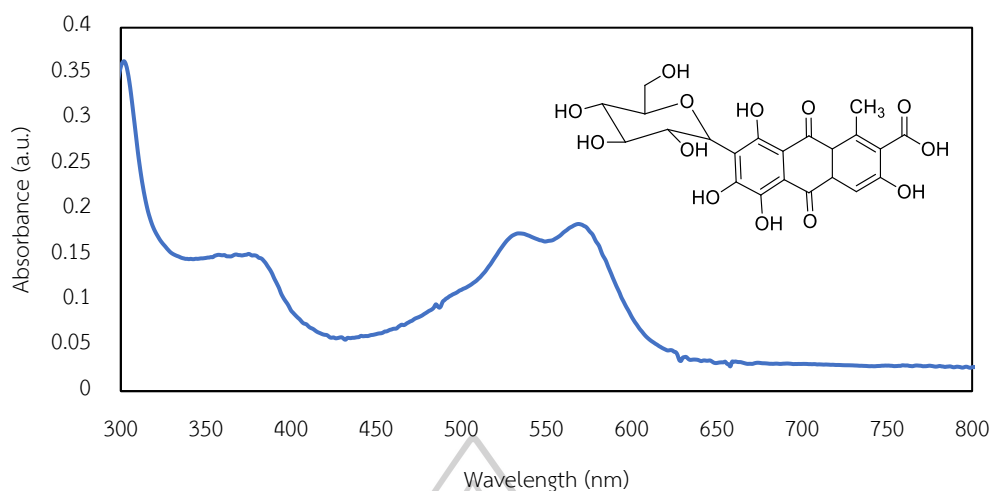
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

4.3.1 ผลการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิก



ภาพที่ 33 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

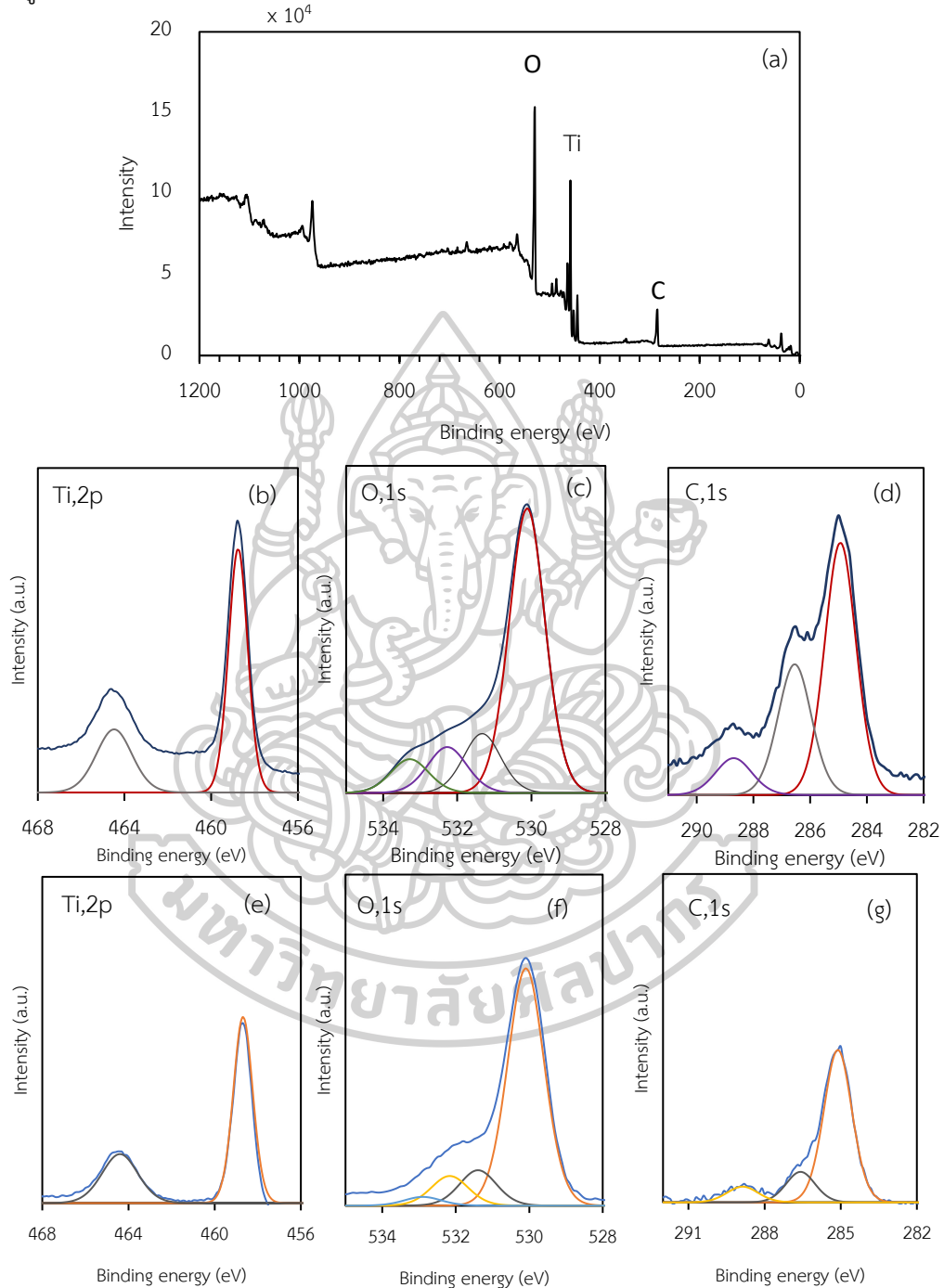
ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้น 0.50 0.25 และ 0.10 มิลลิโมลาร์ พบว่าสีของฟิล์มมีสีชมพูเข้มและเริ่มจางลงเมื่อความเข้มข้นของกรดคาร์มินิกลดลง แสดงดังภาพที่ 33 ซึ่งสีของกรดคาร์มินิกสอดคล้องกับกราฟการดูดกลืนแสงของกรดคาร์มินิก ดังภาพที่ 34 เพื่อยืนยันการดูดซับสีย้อมบนฟิล์มสามารถตรวจสอบด้วยเทคนิคสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ฟลูออเรสเซนต์ฟอรัมอินฟราเรดสเปกโทรเมตรีและยูวีวิส สเปกโทรสโคปี



ภาพที่ 34 กราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมกรดคาร์มินิก

ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกด้วยเทคนิคสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าบนแผ่นฟิล์มประกอบด้วยธาตุออกซิเจน ไทเทเนียมและคาร์บอนแสดงดังภาพที่ 35 เมื่อวิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุไทเทเนียมจากภาพที่ 35(b) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยว 2 ตำแหน่ง 458.48 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็น $Ti_{2p_{1/2}}$ และ 464.19 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็น $Ti_{2p_{3/2}}$ ซึ่งทั้งสองตำแหน่งเป็นไทเทเนียมจากสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Georgios Wolfgang, 2010) วิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุคาร์บอนจากภาพที่ 35(d) พบว่ามีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ตำแหน่ง 284.92 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C-C และพันธะ C-H พลังงานยึดเหนี่ยวตำแหน่งที่ 2 คือ 286.57 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C-OH และพลังงานยึดเหนี่ยวตำแหน่งที่สามคือ 288.72 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C=O (Marzec *et al.*, 2019) ซึ่งพันธะของคาร์บอนที่กล่าวมาเป็นพันธะที่อยู่ภายในโมเลกุลเอทิลีนไกลคอลและกรดคาร์มินิก ซึ่งคาร์บอนมีปริมาณมากกว่าปริมาณคาร์บอนของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ดูดซับสีย้อมดังภาพที่ 35(e) วิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุออกซิเจนจากภาพ 35(c) พบว่ามีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ตำแหน่ง 530.12 และ 531.31 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ Ti-O (Georgios Wolfgang, 2010) พลังงานยึดเหนี่ยวตำแหน่ง 532.28 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C-OH พลังงานยึดเหนี่ยวตำแหน่ง 533.27 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C=O (Shen *et al.*, 2018) ซึ่งพันธะของธาตุออกซิเจนทั้งสองที่กล่าวมานี้เป็นพันธะที่อยู่ในโมเลกุลกรดคาร์มินิก ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ดูดซับสีย้อมดังภาพที่ 35(f) ดังนั้นจากผล XPS พบว่าบนฟิล์มบางไทเทเนียมได

ออกไซด์ประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ กรดคาร์บอนิกที่ฟิล์มบางดูดซับไว้และมีเอทิลีนไกลคอลที่ฟิล์มดูดซับไว้เนื่องจากกำจัดสารออกไปไม่หมด



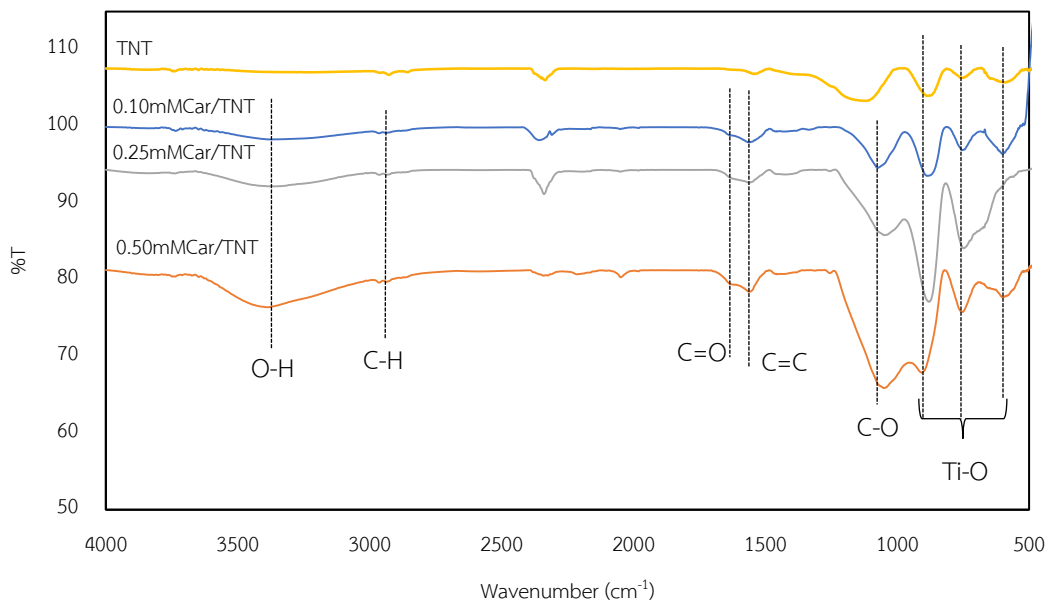
ภาพที่ 35 XPS ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์บอนิก

(a)-(d) แสดงตำแหน่งธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับกรดคาร์บอนิก (e)-(g) แสดงตำแหน่งธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ดูดซับกรดคาร์บอนิก

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมทรี ดังภาพที่ 36 พบว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกทั้งสามความเข้มข้นปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดียวกันซึ่งความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดคาร์มินิกเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาพีคแสดงตำแหน่งการสั่นของพันธะ Ti-O ซึ่งมีเลขคลื่นตำแหน่ง 895 739 และ 606 cm^{-1} (Praveen *et al.*, 2013) และบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกซึ่งยืนยันด้วยตำแหน่งการสั่นต่อไปนี้ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมเลกุลของกรดคาร์มินิก การสั่นของพันธะ C-O ที่ตำแหน่ง 1064 cm^{-1} การสั่นของวงอะโรมาติกพันธะ C=C ที่ตำแหน่ง 1568 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C=O ที่ตำแหน่ง 1628 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C-H ที่ตำแหน่ง 2920 cm^{-1} (Koperska *et al.*, 2010) และการสั่นของพันธะ O-H ที่ตำแหน่ง 3600-3000 cm^{-1}

ตารางที่ 17 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกด้วยเทคนิค FTIR

เลขคลื่น (cm^{-1})	การสั่นของพันธะ
895 739 และ 606	Ti-O stretch
1064	C-O stretch
1568	C=C stretch ของวงอะโรมาติก
1628	C=O stretch
2920	C-H stretch
3000 3600	O-H stretch ของ พันธะไฮโดรเจน



ภาพที่ 36 IR spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับกรดคาร์มินิกที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีด้วยเทคนิคยูวีวิสสเปกโตรสโคปีของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่มีความเข้มข้น 0.01 0.25 และ 0.50 มิลลิโมลาร์ แสดงดังภาพ 37 พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกดูดกลืนแสงในช่วงวิซิเบิลมากกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการดูดซับสีย้อมโดยดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 500-600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของกรดคาร์มินิก จึงยืนยันได้ว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับกรดคาร์มินิกบนพื้นผิวได้ การคำนวณแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมและไม่ดูดซับสีย้อมสามารถคำนวณได้จากสมการ

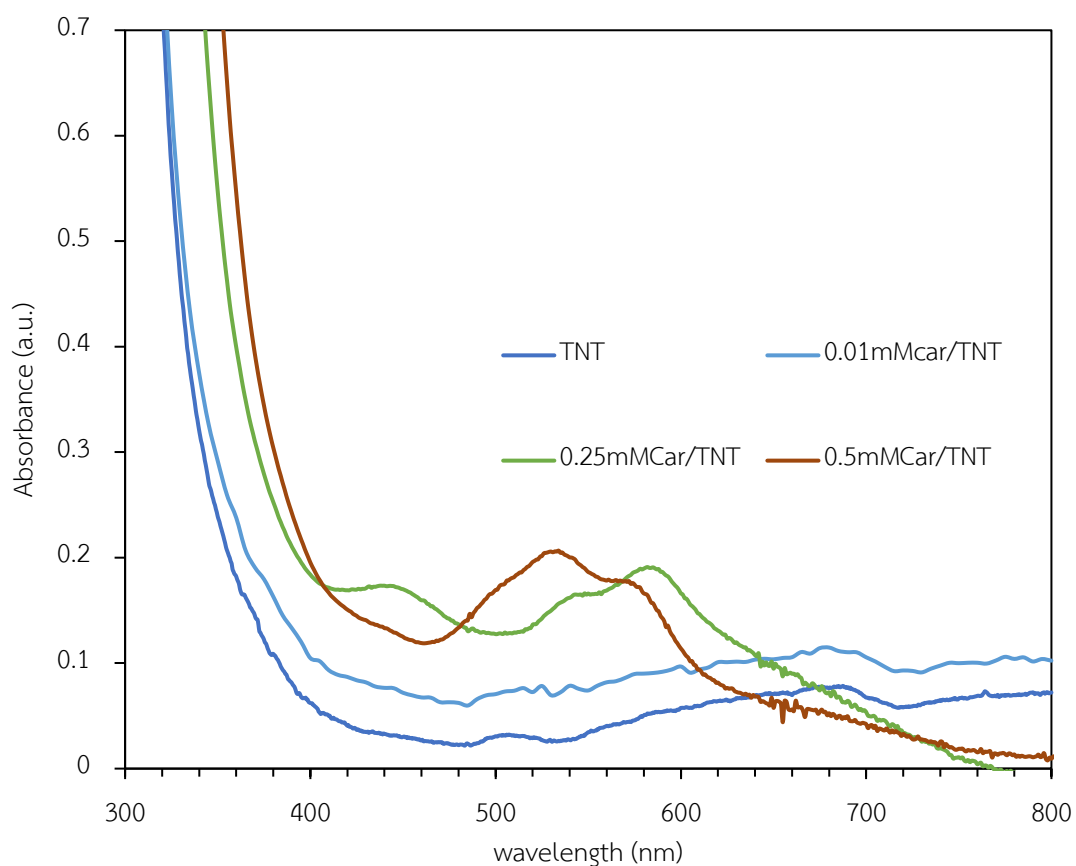
$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda}$$

โดยที่ E_g คือ แถบช่องว่างพลังงาน (eV) h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.67×10^{-34} J·s) c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s) λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ตารางที่ 18 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีข้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	λ_{onset} (nm)	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
TNT	375	3.31
0.01mMCar/TNT	390	3.18
0.25mMCar/TNT	410	3.02
0.50mMCar/TNT	420	2.95

ค่าแถบช่องว่างพลังงานแสดงดังตารางที่ 18 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดคาร์มินิกเพิ่มขึ้น แถบช่องว่างพลังงานลดลงและฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีข้อมมีแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ดูดซับสีข้อม

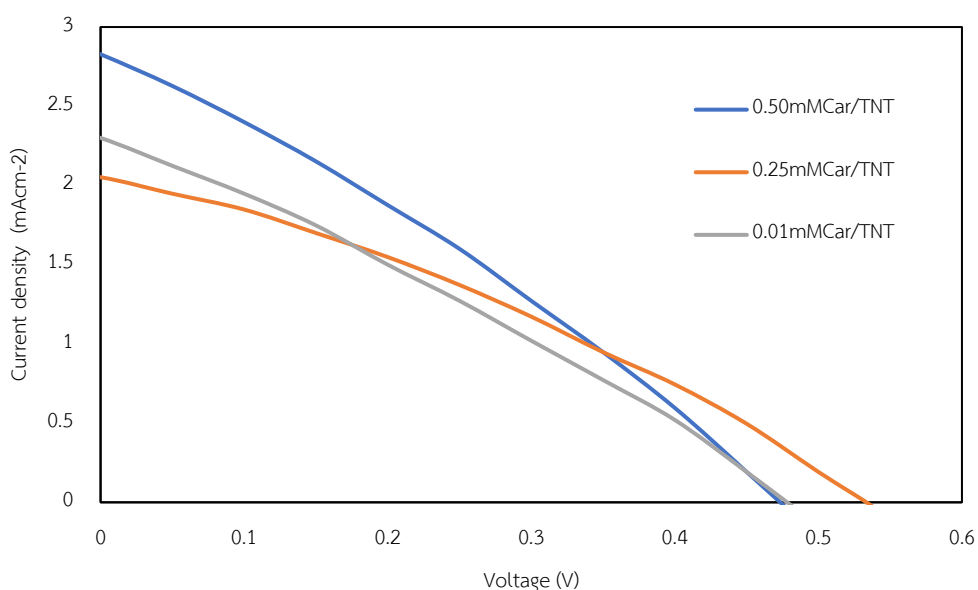


ภาพที่ 37 DRS spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีข้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ต่างกันคือที่ความเข้มข้น 0.50 0.25 และ 0.10 มิลลิโมลาร์ ซึ่งวัดด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ภายใต้ค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด (V_{oc}) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) และค่าร้อยละประสิทธิภาพ (η) นอกจากนี้ นำฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่างๆ หาปริมาณสีย้อมที่ดูดซับบนฟิล์ม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้แสดงผลในตารางที่ 19 พบว่า เมื่อความเข้มข้นสีย้อมกรดคาร์มินิกเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเนื่องเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมกรดคาร์มินิกเพิ่มขึ้นสามารถดูดซับบนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นทำให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 19 ผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ดูดซับสีย้อมกรดคาร์มินิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สถานะ	J_{sc}	V_{oc}	FF	η	ปริมาณสีย้อม (nmol cm^{-2})
0.5mMCar	2.82	0.472	0.30	0.400	38.0
0.25mMcar	2.02	0.532	0.33	0.352	22.3
0.10mMCar	2.28	0.479	0.30	0.318	9.1

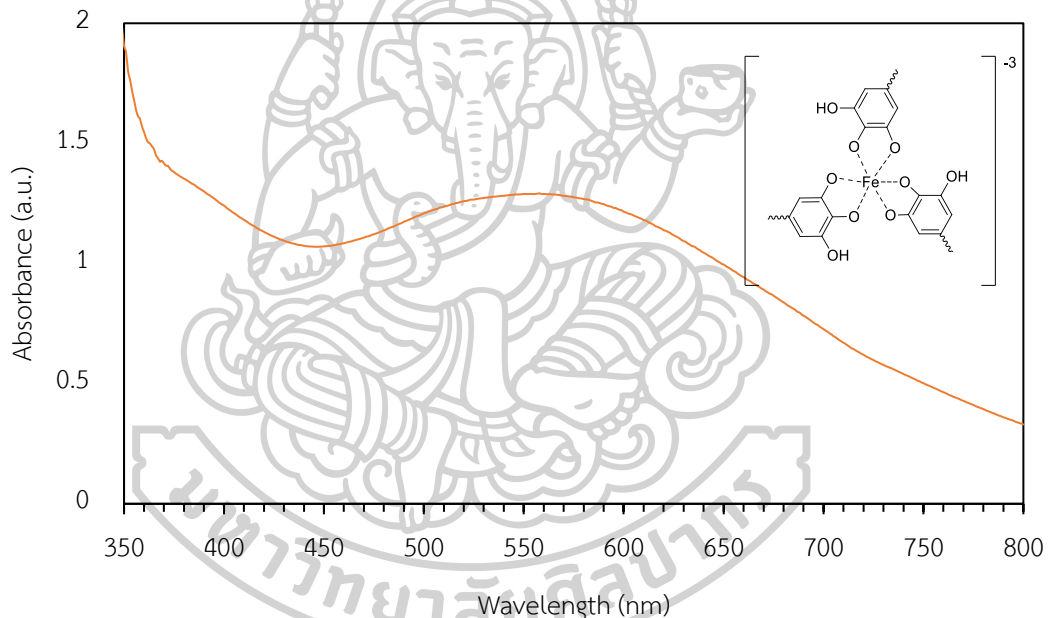


ภาพที่ 38 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมกรดคาร์มินิก

4.3.2 ผลการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อม Fe-tannic acid



ภาพที่ 39 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

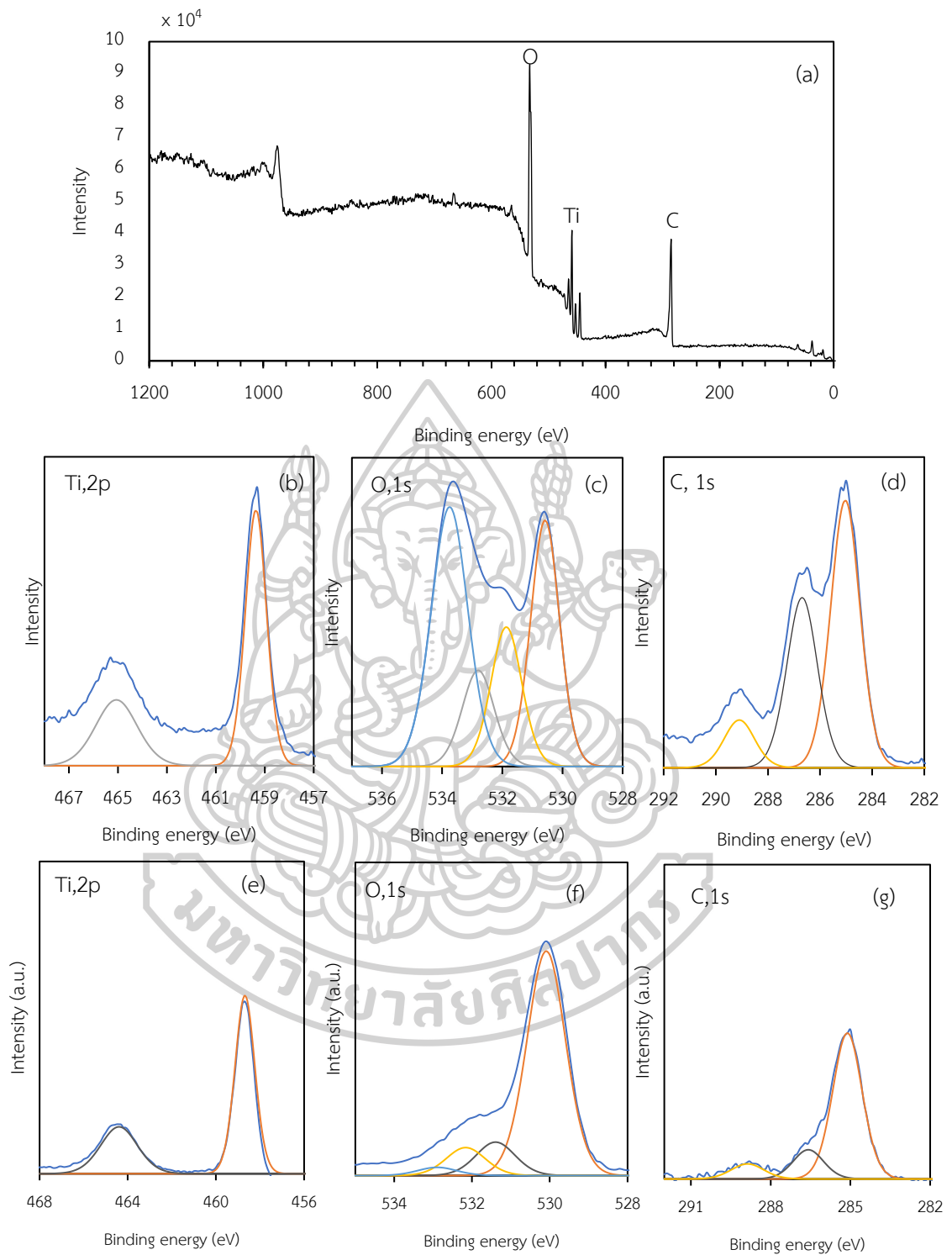


ภาพที่ 40 การดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-TA ที่ pH 7.5

ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้น 0.010 0.005 และ 0.002 โมลาร์ พบว่าสีของฟิล์มมีสีส้มและเริ่มจางลงเมื่อความเข้มข้นของ Fe-tannic acid ลดลง แสดงดังภาพที่ 39 เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid แสดงดังภาพที่ 40 พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงประมาณ 450-650 นาโนเมตร ซึ่งดูดกลืนแสงกว้างทำให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานแสงได้ปริมาณมากส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อยืนยันการดูดซับสีย้อมบนฟิล์มสามารถ

ตรวจสอบด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัมอินฟราเรดสเปกโทรเมตรีและเทคนิคยูวีวิสสเปกโทรสโกปี

ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าบนแผ่นฟิล์มประกอบด้วยธาตุออกซิเจน ไทเทเนียมและคาร์บอนแสดงดังภาพที่ 41 (a) เมื่อวิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุไทเทเนียมจากภาพที่ 41(b) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยว 2 ตำแหน่ง คือ 459.37 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็น $Ti_{2p1/2}$ และ 465.06 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็น $Ti_{2p3/2}$ พลังงานยึดเหนี่ยวทั้งสองมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (Georgios & Wolfgang, 2010) วิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุออกซิเจนจากภาพ 41(c) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ยืนยันสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ถูกดูดซับบนฟิล์มคือที่ตำแหน่ง 531.88 532.81 และ 533.77 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ Fe-O (Yang *et al.*, 2015) C-OH (Shen *et al.*, 2018) และ C=O (Shen *et al.*, 2018) ตามลำดับ โดยพันธะ Fe-O เป็นพันธะโคออร์ดิเนตชันระหว่างกรดแทนนิกกับไอออนเหล็ก (Fe^{3+}) ส่วนพลังงานยึดเหนี่ยวที่ตำแหน่ง 533.77 อิเล็กตรอนโวลต์ ยังเป็นพันธะ Fe-OH อีกด้วยซึ่งเป็นพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) (Yang *et al.*, 2015) ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 530.60 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ Ti-O ซึ่งเป็นพันธะไทเทเนียมไดออกไซด์ (Georgios Wolfgang, 2010) วิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุคาร์บอนจากภาพที่ 41(d) พบว่ามีพลังงานยึดเหนี่ยวที่แสดงพันธะในโมเลกุลสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid คือ 285.05 286.70 และ 289.11 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C-H C-OH และ C=O ตามลำดับ (Omoike, 2008)

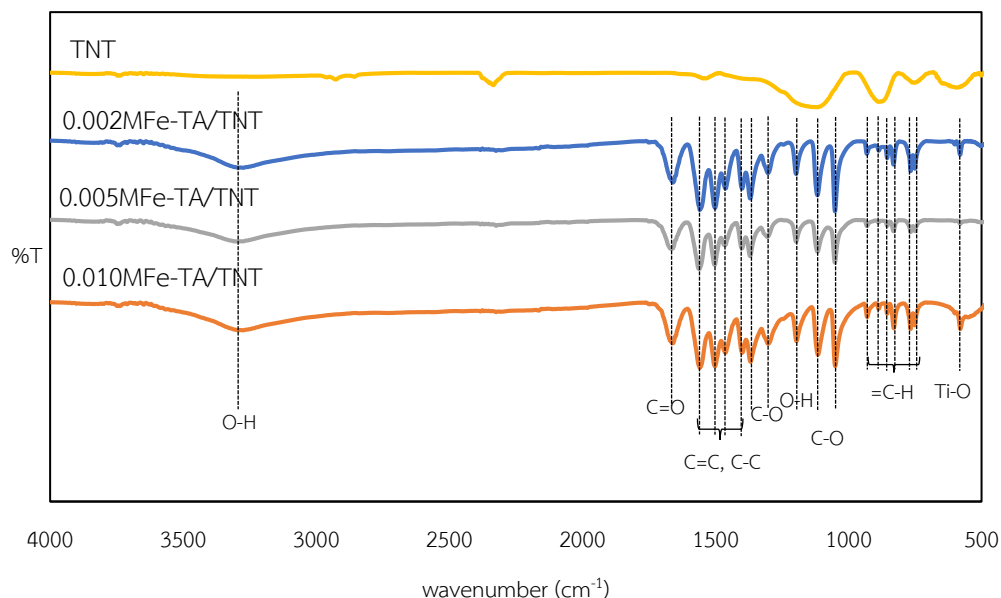


ภาพที่ 41 XPS ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid (a)-(d) แสดงตำแหน่งธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid (e)-(g) แสดงตำแหน่งธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ดูดซับกรดคาร์มินิก

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-Tannic acid ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมทรี ดังภาพที่ 42 และสรุปในตารางที่ 20 พบว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ทั้งสามความเข้มข้นปรากฏพิกที่ตำแหน่งเดียวกันซึ่งความเข้มของพิกเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาพิกพบว่าการสั่นของพันธะที่ตำแหน่งต่อไปนี้เป็นพันธะที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ได้แก่ การสั่นแบบงอของพันธะ =C-H ซึ่งเป็นพันธะของวงอะโรมาติก ช่วงเลขคลื่น 600-900 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C-O ในหมู่คาร์บอกซิลิก ที่ตำแหน่ง 1052 1117 1308 และ 1372 cm^{-1} การสั่นของพันธะ O-H ในหมู่ฟีนอล ที่ตำแหน่ง 1197 การสั่นของพันธะ C-C และ C=C ในวงอะโรมาติก ที่ตำแหน่ง 1405 1466 1505 1561 cm^{-1} และการสั่นของพันธะ C=O ในหมู่คาร์บอกซิลิก ที่ตำแหน่ง 1666 cm^{-1} นอกจากนี้บริเวณพื้นผิวของฟิล์มมีการดูดซับโมเลกุลของน้ำเนื่องจากแสดงการสั่นของพันธะ O-H ที่ตำแหน่ง 3550-3000 cm^{-1} (ÇAkar Ozacar, 2016)

ตารางที่ 20 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-Tannic acid ด้วยเทคนิค FTIR

เลขคลื่น (cm^{-1})	การสั่นของพันธะ
895 739 และ 606	Ti-O stretch
600-900	=C-H bending ของวงอะโรมาติก
1052 1117 1308 และ 1372	C-O stretch ของคาร์บอกซิลิก
1197	O-H ของฟีนอล
1405 1466 1505 และ 1561	C=C และ C-C stretch ของวงอะโรมาติก
1666	C=O stretch
3000 3600	O-H stretch ของ พันธะไฮโดรเจน



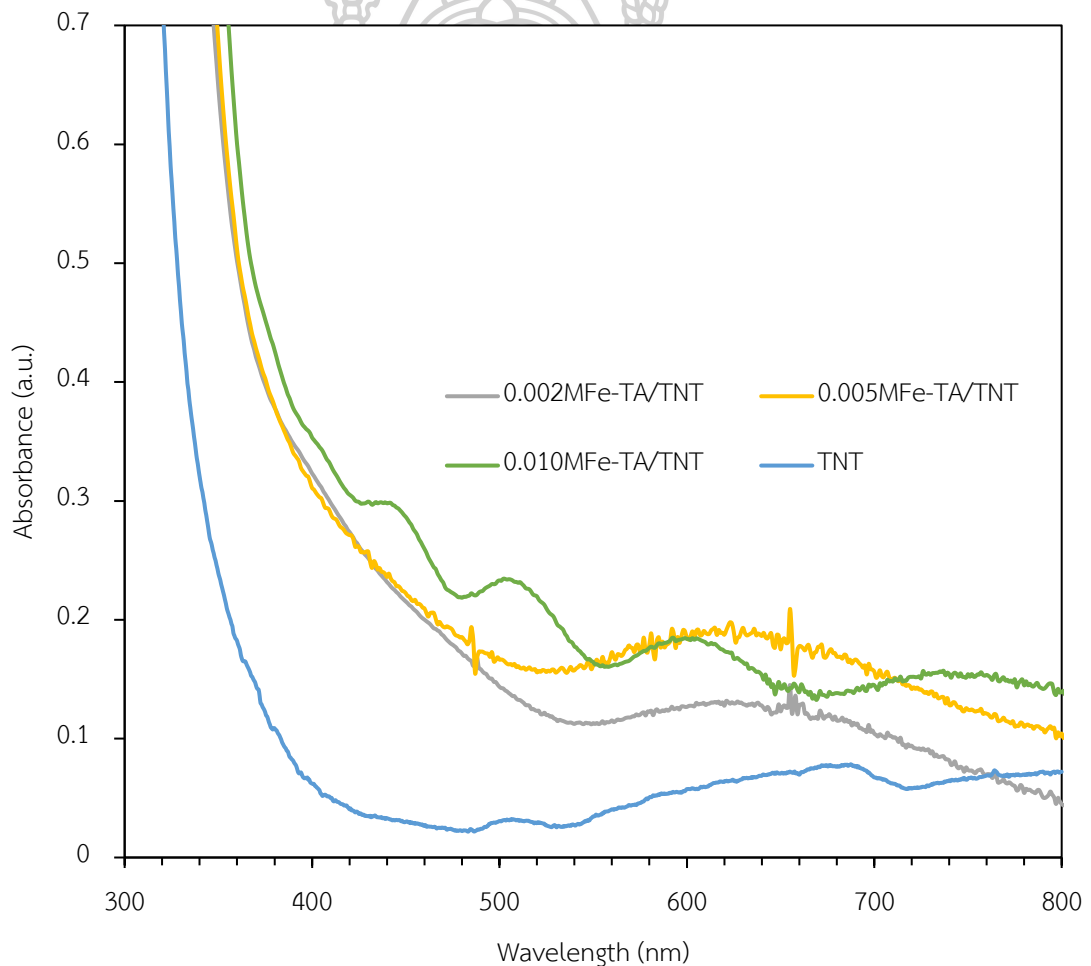
ภาพที่ 42 IR spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีด้วยเทคนิคยูวีวิส สเปกโตรสโคปีของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้น 0.002 0.005 และ 0.01 โมลาร์ แสดงดังภาพ 43 พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ดูดกลืนแสงในช่วงวิชิเบิลมากกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการดูดซับสีเข้มและช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-650 นาโนเมตร ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid มีการดูดกลืนแสงซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

ผลจากการคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานแสดงดังตารางที่ 21 พบว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid มีแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ดูดซับสีเข้ม

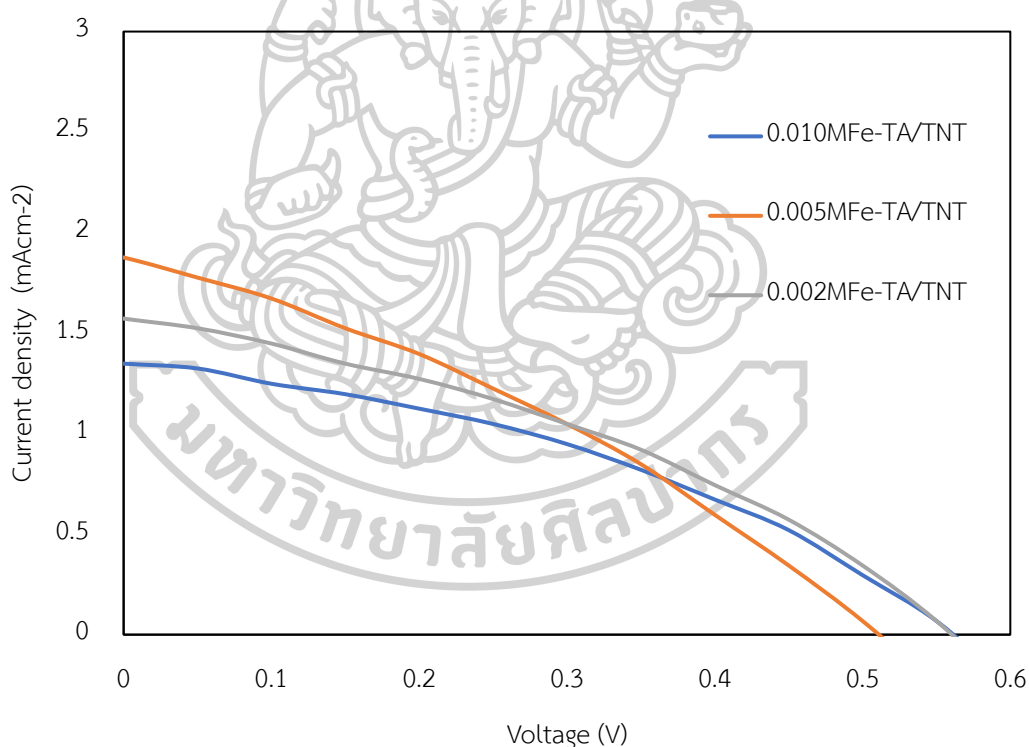
ตารางที่ 21 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	λ_{onset} (nm)	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
TNT	390	3.18
0.002MFe-TA	490	2.53
0.005 MFe-TA	495	2.50
0.010 MFe-TA	500	2.48



ภาพที่ 43 DRS spectrum ของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ต่างกันคือที่ความเข้มข้น 0.010 0.005 และ 0.002 โมลาร์ และหาปริมาณสีย้อมที่ดูดซับบนฟิล์มบางท่อนานโนไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงผลในตารางที่ 22 พบว่าเมื่อความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid สูง อาจเกิดการรวมตัวกันเองของสารประกอบเชิงซ้อนนี้ทำให้อิเล็กตรอนส่งผ่านขั้วแคโทดได้ไม่ดีส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ลดลง การรวมตัวกันเองของสารประกอบเชิงซ้อนลดลงส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดได้ดี ประสิทธิภาพของเซลล์ก็เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางท่อนานโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่ำให้ประสิทธิภาพมากกว่าความเข้มข้นสูง



ภาพที่ 44 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-TA

ตารางที่ 22 ผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

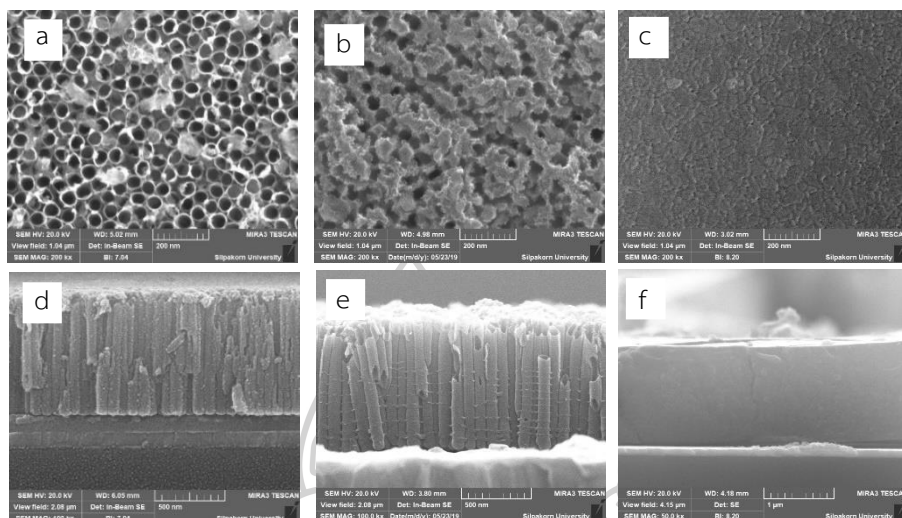
สถานะ	J_{sc}	V_{oc}	FF	η	ปริมาณสีย้อม (nmol cm^{-2})
0.01MFe-TA	1.35	0.554	0.38	0.287	21.0
0.005MFe-TA	1.89	0.507	0.33	0.314	20.2
0.002MFe-TA	1.57	0.555	0.37	0.322	12.9

4.3.3 ผลการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ซับสเตรดต่างกัน

ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วแคโทดโดยเปรียบเทียบผลของซับสเตรดที่ต่างกันระหว่างกระจก ITO และ FTO พบว่าทั้งกระจก ITO และ FTO สามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีรูปร่างเป็นท่อนาโนที่มีลักษณะใกล้เคียงกันแต่พื้นผิวด้านบนของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก FTO มีความขรุขระและไม่เห็นเป็นท่อที่ชัดเจนกว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก ITO เนื่องจากพื้นผิวของชั้น FTO มีลักษณะขรุขระเมื่อเกิดปฏิกิริยาแอนโนไดเซชันของโลหะไทเทเนียมที่มีความหนาเพียง 1 ไมโครเมตร จึงทำให้เกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเอียงตามพื้นผิวของชั้น FTO แสดงดังภาพที่ 45 นอกจากนี้ในงานวิจัยเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีรูปร่างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกันระหว่างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมบนกระจก ITO

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ซับสเตรดต่างกันในการเตรียมขั้วแคโทดระหว่างกระจก FTO และ ITO ซึ่งสีย้อมที่นำมาใช้คือ สีย้อม N719 จากผลการทดลองดังตารางที่ 23 พบว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กระจก FTO มีปริมาณสีย้อมน้อยกว่ากระจก ITO แต่มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่ากระจก FTO เนื่องจากกระจก ITO มีความต้านทานสูงชัน เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นผลึกอะนาเทส ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การนำไฟฟ้าของกระจกลดลงส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอนโนดได้ยากขึ้นจึงเกิดการ recombination ของอิเล็กตรอนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงลดลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อเผากระจก FTO ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กระจกไม่มีความต้านทานที่สูงขึ้นอิเล็กตรอน

เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดได้ดีจึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงกว่ากระจก ITO ถึงแม้ปริมาณสีย้อมจะน้อยกว่า



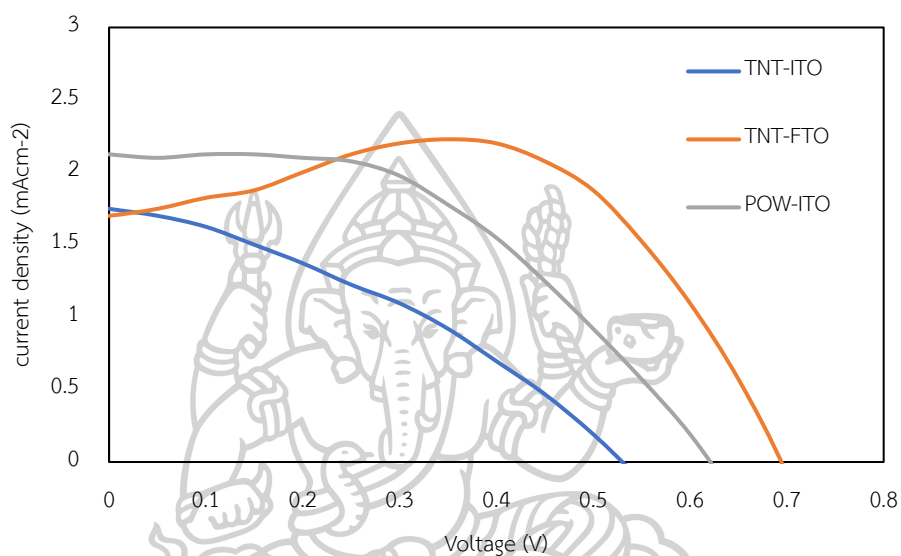
ภาพที่ 45 ภาพถ่าย SEM ไทเทเนียมไดออกไซด์บนซับสเตรตต่างกัน

(a) และ (d) ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก ITO (b) และ (e) ฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก FTO (c) และ (f) ฟิล์มบางอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก ITO

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีรูปร่างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกันระหว่างรูปร่างแบบท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับรูปร่างแบบอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 23 พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาประมาณ 2500 ไมโครเมตร ซึ่งมากกว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ 2.5 เท่า เมื่อพิจารณาที่ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพคือร้อยละ 0.62 ซึ่งมากกว่าฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อยเมื่อเทียบกับความหนาของไทเทเนียมไดออกไซด์ถึง 2.5 เท่า เนื่องจากท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยลดการเกิด recombination ของอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Roy. *et.al*, 2010) ดังนั้นหากเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผู้วิจัยคาดว่าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 23 ผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ซับสเตรตต่างกัน

สถานะ	J_{sc}	V_{oc}	FF	η	ความหนา (nm)	ปริมาณสีข้อม (nmol cm ⁻²)
N719-ITO	2.6	0.63	0.24	0.40	758	12.00
N719-FTO	1.71	0.693	0.79	0.938	874	12.9
N719-POW	2.13	0.617	0.47	0.622	2500	7.1



ภาพที่ 46 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีข้อมไวแสงบนกระจกนำไฟฟ้าต่างกัน



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอนแนะ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง พบว่ากระบวนการแอนโนไดเซชันสามารถเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเป็นระเบียบ จากผล XRD เมื่อเผาแผ่นฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงสามารถเปลี่ยนเฟสเป็นผลึกอะนาเทสได้ เมื่อศึกษาผลของความต่างศักย์และความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่ส่งผลต่อขนาดและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมในการเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์คือ ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ ได้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาด 44 นาโนเมตร และความยาว 768 นาโนเมตร หากความต่างศักย์เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมเกิดการหลุดลอกได้ ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่ต่างกันให้รูปร่างของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกันเมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยแอมโมเนียมฟลูออไรด์เข้มข้นร้อยละ 1.2 โดยมวล มีประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มากที่สุด ซึ่งที่สภาวะนี้สามารถเตรียมท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาด 50 นาโนเมตร ความยาว 758 นาโนเมตร

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมกรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.50 0.25 และ 0.10 มิลลิโมลาร์ พบว่า สีย้อมกรดคาร์มินิกเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์สามารถเกาะบนผิวของฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มากที่สุดจึงเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด ซึ่งผลจากเทคนิค XPS และเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นว่าพันธะและหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมกรดคาร์มินิกที่เกาะบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid เข้มข้น 0.010 0.005 และ 0.002 โมลาร์ พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนเข้มข้น 0.002 โมลาร์ มีประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมากที่สุดเนื่องจากที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.002 โมลาร์ สารประกอบเชิงซ้อนอาจเกิดการรวมตัวกันเองส่งผลให้อิเล็กตรอนส่งผ่านได้ไม่ดีจึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid เพิ่มขึ้น

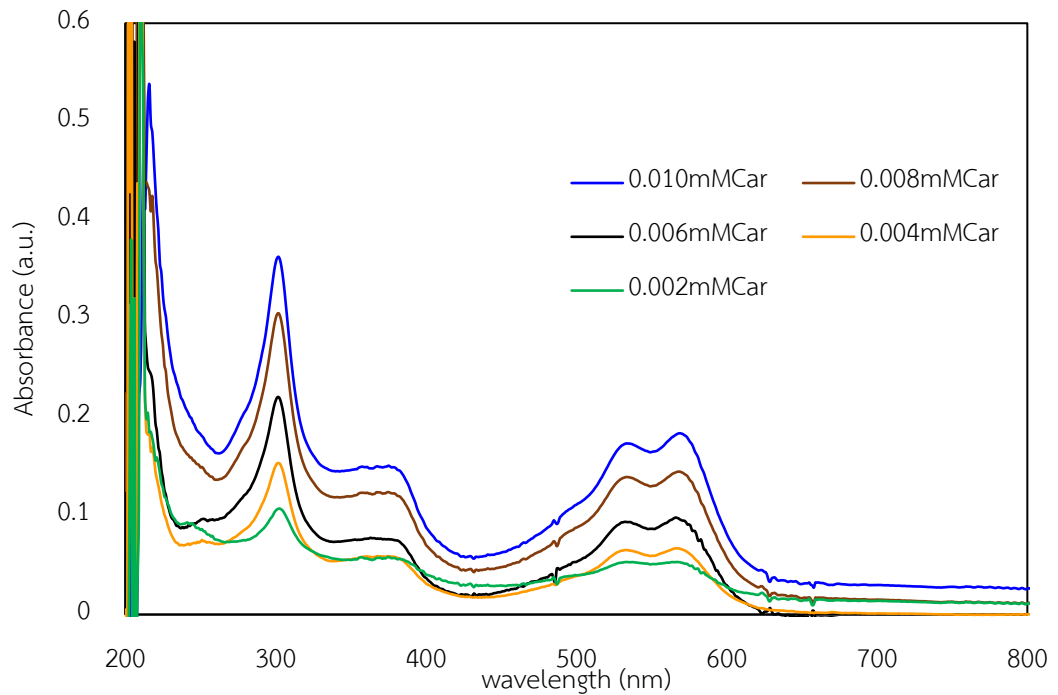
ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมควรเตรียมบนกระจก FTO เนื่องจากเมื่อนำกระจกไปเผาเพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเฟสเป็นผลึกอะนาเทสที่อุณหภูมิสูงทำให้ความต้านทานของกระจกไม่เปลี่ยนแปลงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงกว่าการใช้กระจกนำไฟฟ้า ITO
2. ความหนาของฟิล์มไทเทเนียมควรเตรียมที่ความหนามากกว่า 10 ไมโครเมตร เพื่อจะได้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความสูงมากซึ่งทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้จำนวนมากส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเพิ่มขึ้น
3. ในการพัฒนาด้านเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง อาจนำโมเลกุลของสีย้อมตัวอื่นที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานที่สูงขึ้นอีกทั้งสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเพิ่มขึ้น

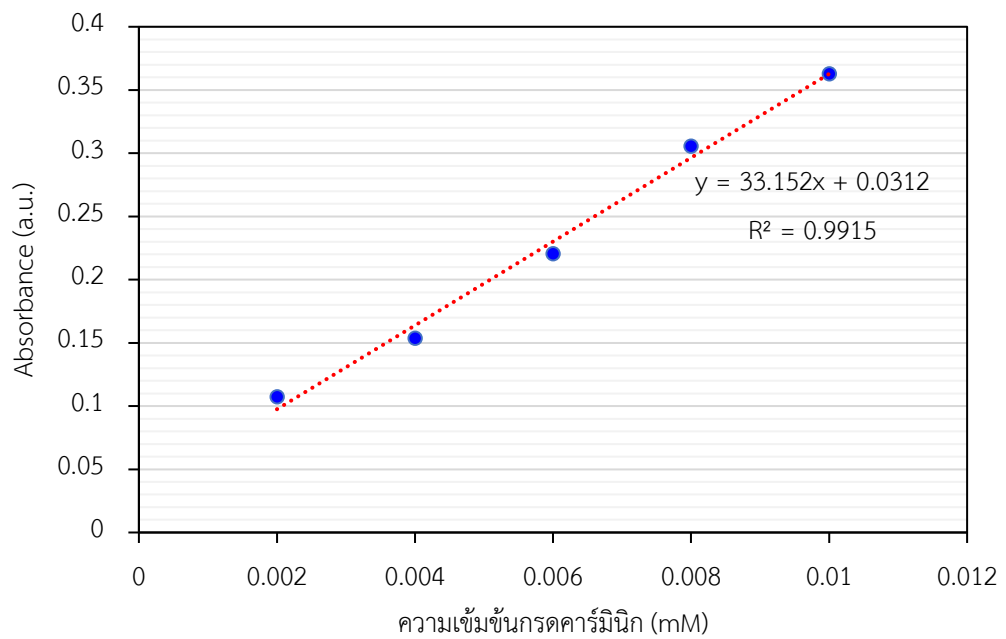


ภาคผนวก

ผลการหาปริมาณสีข้อมกรดคาร์มินิก

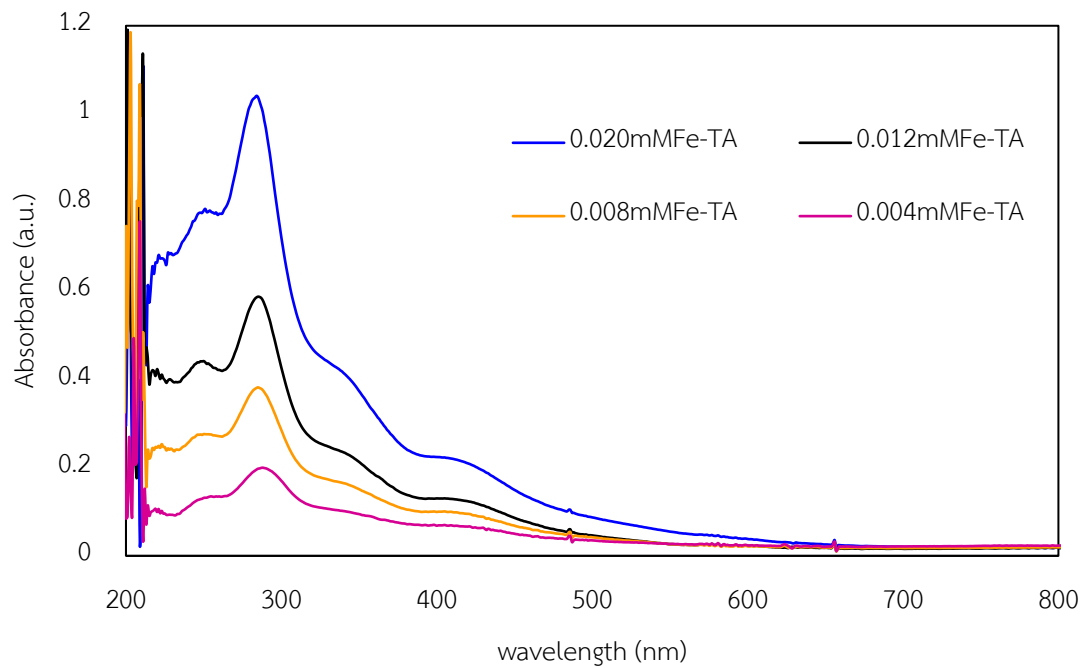


ภาพแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานกรดคาร์มินิก

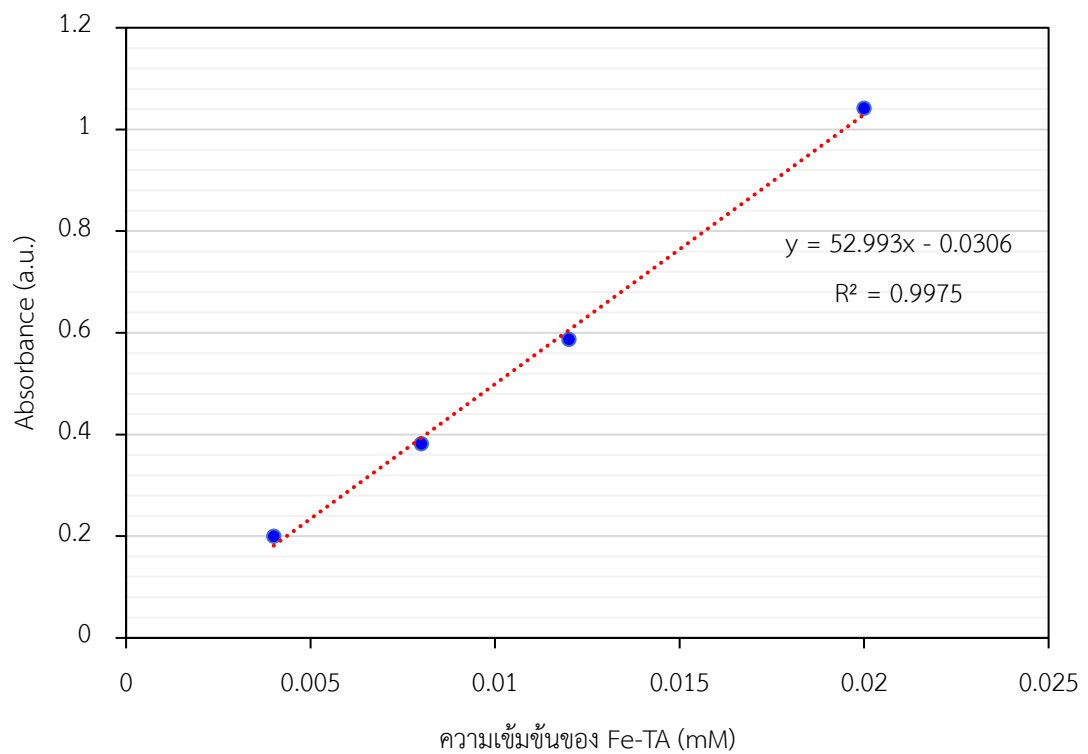


กราฟมาตรฐานกรดคาร์มินิก

ผลการหาปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

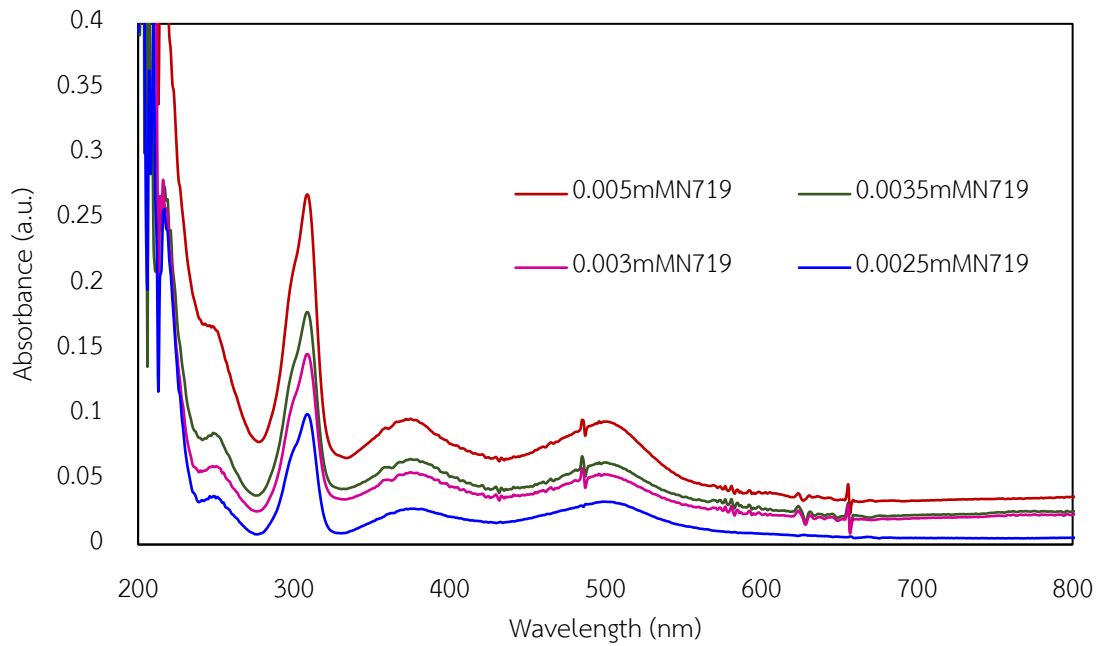


ภาพแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

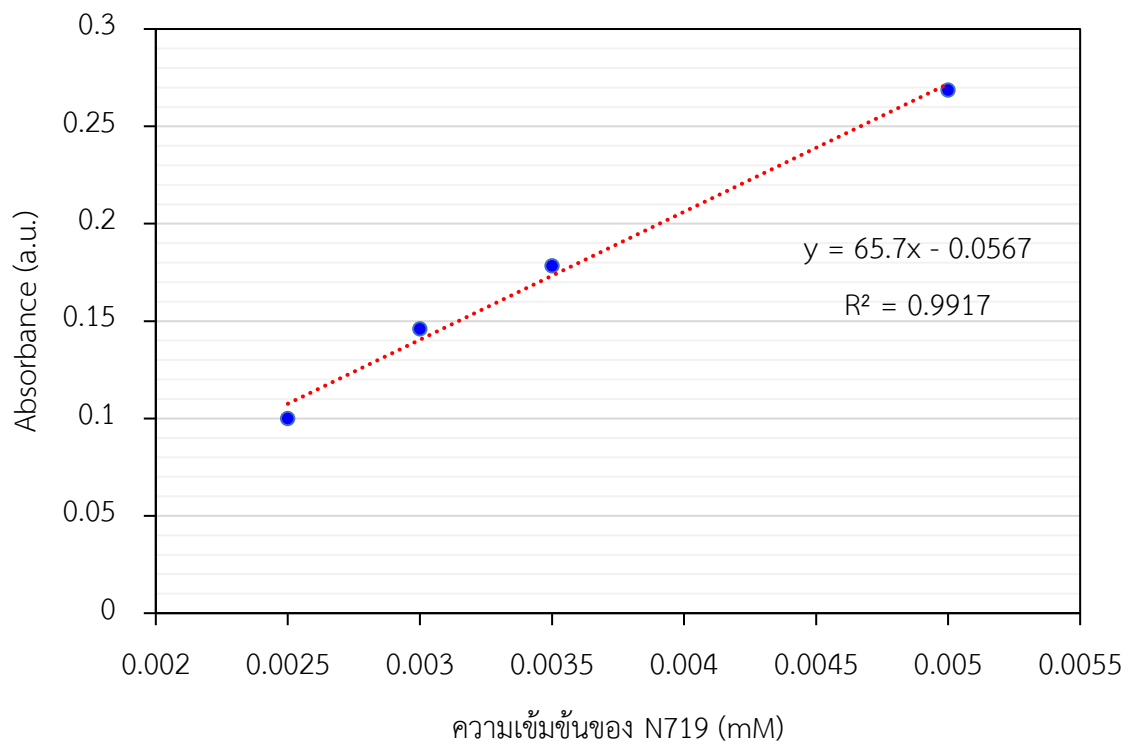


กราฟมาตรฐานสารประกอบเชิงซ้อน Fe-tannic acid

ผลการหาปริมาณสีย้อม N719



ภาพแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานสีย้อม N719



กราฟมาตรฐานสีย้อม N719

ผลการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ N719 บนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สภาวะต่างกัน



ภาพแสดงฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมที่ความต่างศักย์ต่างกัน โดยดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ N719

(a) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ (b) ความต่างศักย์ 30 โวลต์ (c) ความต่างศักย์ 40 โวลต์





ภาพแสดงฟิล์มบางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมที่ความเข้มข้นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ต่างกัน โดยดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ N719 (a) 0.4wt% NH_4F (b) 0.8wt% NH_4F (c) 1.2wt% NH_4F (d) 1.4wt% NH_4F

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลงานงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 44 ระหว่างวันที่ 29-31 ตุลาคม 2561 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ

FABRICATION OF NANOSTRUCTURE TiO₂ BY ANODIZATION METHOD

Vanida lumpol¹, Montri Aiempanakit², Cheewita Suwanchawalit^{1*}

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand
²Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand
* e-mail; suwanchawalit_c@su.ac.th

INTRODUCTION

Nanostructure TiO₂ with high-specific surface area have been considered for various potential applications in photocatalysis, sensor, wastewater treatment and dye sensitized solar cell.

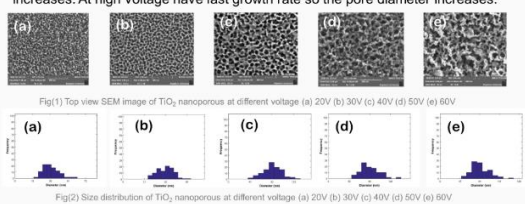
Electrochemical anodization is low cost and simple method for fabrication of nanostructures TiO₂ thin films

This work, we fabricate nanostructure TiO₂ films using anodization method

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of voltage

The effect of voltage on the morphology of grown TiO₂ was investigated by changing this parameter from 20 to 60V. As can be seen from SEM images in Fig.1(a)-(e), at low voltage have small porous when voltage increases, the pore diameter increases. At high voltage have fast growth rate so the pore diameter increases.

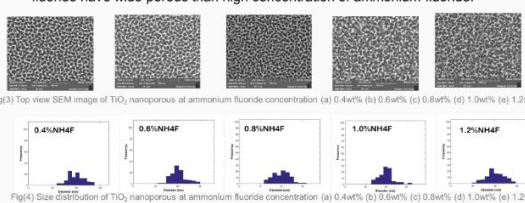


Fig(1) Top view SEM image of TiO₂ nanoporous at different voltage (a) 20V (b) 30V (c) 40V (d) 50V (e) 60V

Fig(2) Size distribution of TiO₂ nanoporous at different voltage (a) 20V (b) 30V (c) 40V (d) 50V (e) 60V

Effect of Ammonium fluoride (NH₄F)

The effect of ammonium fluoride (NH₄F) on the morphology of grown TiO₂ was investigated by changing this parameter from 0.4wt% to 1.2wt%. As can be seen from SEM images in Fig.2(a)-(e). At low concentration of ammonium fluoride have wide porous than high concentration of ammonium fluoride.



Fig(3) Top view SEM image of TiO₂ nanoporous at ammonium fluoride concentration (a) 0.4wt% (b) 0.6wt% (c) 0.8wt% (d) 1.0wt% (e) 1.2wt%

Fig(4) Size distribution of TiO₂ nanoporous at ammonium fluoride concentration (a) 0.4wt% (b) 0.6wt% (c) 0.8wt% (d) 1.0wt% (e) 1.2wt%

Both fabrication parameters have similar results of XRD and FT-IR. XRD results of TiO₂ films were amorphous phase. FT-IR results indicated Ti-O stretching mode in the (700-980 nm⁻¹), O-H stretching mode (3000-3600 nm⁻¹) and alkyl C-H stretching (2800,2900 nm⁻¹). So, Titanium thin films were successfully transformed TiO₂ films by anodization method.



Fig(5) XRD of TiO₂ nanoporous at different voltage

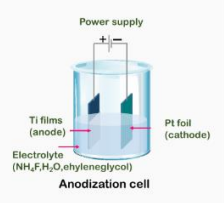
Fig(6) FT-IR of TiO₂ nanoporous at different voltage

Fig(7) FT-IR of TiO₂ nanoporous at different NH₄F concentration

METHODLOGY

Preparation of TiO₂ nanostructure by anodization

Titanium thin films immersed in water, ammonium fluoride (NH₄F) and ethylene glycol electrolytes to form nanostructure TiO₂ film. The composition of anodization was investigated i.e. concentration of NH₄F was varied from 0.4-1.2 wt% and voltage was varied from 20-60V. After anodization, the sample were rinsed with acetone and cleaned with ultrasonication in distilled water.



Anodization cell

Characterizations of TiO₂ nanostructure

- ▶▶ Scanning electron microscope (SEM)
- ▶▶ X-Ray Diffractometry (XRD)
- ▶▶ Fourier-Transformed Infrared spectrophotometry (FT-IR)

CONCLUSIONS

Anodization method could be transform from titanium thin films to nanoporous TiO₂ films. Ammonium fluoride concentration and voltage affected morphology of nanoporous TiO₂ films. Both fabrication parameter affected diameter pore when ammonium fluoride concentration increase, the diameter pore decrease while voltage increase, the diameter pore increase.

Reference :

Iraj M., Kolaheidou, M., Soleimani, E.A., Esmaili, E., Kolaheidou, Z. *J Master Sci: Mater Electron*, **2016**, 27, 6496-6501.

Qin, L., Chen, Q., Lan, R., Jiang, R., Qian, X., Xu, B., Zhang, F., Jia, Y. *Journal of materials science & technology*, **2015**, 31, 1059-1064.

Ozkan, S., Mazare, A., Schmuki, P. *Electrochimica Acta*, **2018**, 268, 435-447.

Mohammadpour, F., Moradi, M. *Materials science in semiconductor processing*, **2015**, 39, 255-264.

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลงานงานประชุมวิชาการนานาชาติ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2019) ระหว่างวันที่ 7-8 กุมภาพันธ์ 2562 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ

FABRICATION OF NANOTUBES TiO₂ FILMS AND THEIR DSSC APPLICATION

Vanida Lumpol¹, Montri Aiempanakit², Narit Triamnak³, Jaran sritharathikhun⁴, Cheewita Suwanchawalit^{1*}

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

³Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

⁴National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Pathum Thani, 12120, Thailand

*E-mail: suwanchawalit_c@su.ac.th8



OBJECTIVE

To study the effect of power voltage influence morphology of TiO₂ nanotubes and the energy conversion efficiency (η)

METHODOLOGY

Preparation of TiO₂ nanotubes by anodization



Characterizations of TiO₂ nanotubes

- ▶▶ Scanning electron microscope (SEM)
- ▶▶ X-Ray Diffractometry (XRD)
- ▶▶ Fourier-Transformed Infrared spectrophotometry (FT-IR)
- ▶▶ Diffused reflectance UV-Vis spectroscopy (DRS)

CONCLUSIONS

Nanotubes TiO₂ films were successfully prepared via anodization method. Power voltage affected morphology of nanotube TiO₂ films. The diameter of tubes increase with increasing power voltage. Fabrication TiO₂ nanotubes with voltage at 30V has a highest the energy conversion efficiency (η)

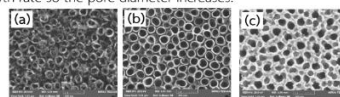
Reference :

- Iraj,M., Kolahdouz,M., Soleimani,E.A., Esmaili, E., Kolahdouz, Z. J *Master Sci: Mater Electron*, 2016, 27, 6496-6501.
- Qin, L.,Chen,Q.,Lan,R., Jiang,R., Qian, X., Xu,B., Zhang,F.,Jia,Y. *Journal of materials science & technology*, 2015, 31, 1059-1064.
- Ozkan,S., Mazare,A., Schmuki,P. *Electrochimica Acta*, 2018, 268, 435-447.

RESULTS AND DISCUSSION

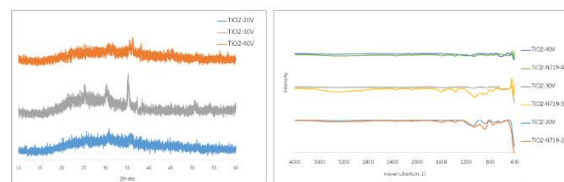
Characterizations of TiO₂ nanotubes

The effect of voltage on the morphology of grown TiO₂ was investigated by changing this parameter from 20 to 40V. As can be seen from SEM images in Fig.1(a)-(c), at low voltage have small porous when voltage increases, the pore diameter increases. At high voltage have fast growth rate so the pore diameter increases.



Fig(1) Top view SEM image of TiO₂ nanotube at different voltage (a) 20V (b) 30V (c) 40V

XRD results of TiO₂ nanotubes films were amorphous and anatase phase. The surface chemical composition was investigated with FT-IR as shown in figure (3). Both TiO₂ nanotubes and N719 adsorbed TiO₂ nanotubes exhibited characterization band of TiO₂ which indicate Ti-O stretching mode (700-980 cm⁻¹) and O-H stretching mode (3000-3600 cm⁻¹). In addition, N719 adsorbed TiO₂ nanotubes exhibiting characterization of N719 dye band were C-O stretching (1,000-1,200 cm⁻¹), C=C stretching (1,600cm⁻¹) and thiocyanato group (NCS) (2,100 cm⁻¹).



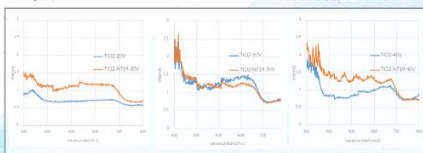
Fig(2) XRD of TiO₂ nanotubes at different voltage

Fig(3) FT-IR of TiO₂ nanotubes at different voltage

DRS as shown in Figure 4 and Table 1. DRS results of N719 adsorbed TiO₂ nanotubes extended in visible light region than pure TiO₂ nanotubes.

Table 1 Calculated band gap energy of TiO₂ films

Sample	Eg (eV)
TiO ₂ -20V	2.76
TiO ₂ -N719-20V	2.38
TiO ₂ -30V	3.10
TiO ₂ -N719-30V	2.88
TiO ₂ -40V	3.10
TiO ₂ -N719-40V	2.76



Fig(4) DRS of TiO₂ nanotubes and N719 adsorbed TiO₂ nanotubes at different voltage

Performance of dye-sensitized solar cells

Table 2 Photovoltaic characteristics of different DSSC

Sample	Jsc	Voc	FF	Eff%
TiO ₂ -N719-20V	0.98	0.59	0.20	0.117
TiO ₂ -N719-30V	2.05	0.60	0.23	0.284
TiO ₂ -N719-40V	1.94	0.60	0.23	0.269

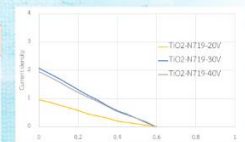


Figure 5 J-V curve

รายการอ้างอิง

- Aiempanakit, K., Jessadaluk, S., Tongmaha, S., Supati, A., Khemasiri, N., Pornthreeraphat, S., Horprathum, M., Patthanasetakul, V., and Eiamchai, P. (2016). Vertical Alignment TiO₂ Nanotube Based on Ti Film Prepared via Anodization Technique. *Key Engineering Materials*, 675-676, 167-170.
- Atacan, K., and Ozacar, M. (2015). Characterization and immobilization of trypsin on tannic acid modified Fe₃O₄ nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 128, 227-236.
- Bavykin, D. V., Parmon, V. N., Lapkin, A. A., and Walsh, F. C. (2004). The effect of hydrothermal conditions on the mesoporous structure of TiO₂ nanotubes. *Journal of Materials Chemistry*, 14(22), 3370-3377.
- Bozkurt Çırak, B., Karadeniz, S. M., Kiliç, T., Çağlar, B., Ekinci, A. E., Yelgin, H., Kürekçi, M., and Çırak, Ç. (2017). Synthesis, surface properties, crystal structure and dye sensitized solar cell performance of TiO₂ nanotube arrays anodized under different voltages. *Vacuum*, 144, 183-189.
- Çakar, S., and Ozacar, M. (2016). Fe-tannic acid complex dye as photo sensitizer for different morphological ZnO based DSSCs. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 163, 79-88.
- Çakar, S., and Özacar, M. (2019). The pH dependent tannic acid and Fe-tannic acid complex dye for dye sensitized solar cell applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 371, 282-291.
- Chen, H., Chen, S., Quan, X., and Zhang, Y. (2010). Structuring a TiO₂-Based Photonic Crystal Photocatalyst with Schottky Junction for Efficient Photocatalysis. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 451-455.
- Chen, X., and Mao, S. S. (2007). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891-2959.
- Day, J., Senthilarasu, S., and Mallick, T. K. (2019). Improving spectral modification for applications in solar cells: A review. *Renewable Energy*, 132, 186-205.

- Doh, W. H., Papaefthimiou, V., and Zafeiratos, S. (2015). Applications of Synchrotron-Based X-Ray Photoelectron Spectroscopy in the Characterization of Nanomaterials. *Surface Science Tools for Nanomaterials Characterization*, 317-366.
- El-Sherbiny, S., Morsy, F., Samir, M., and Fouad, O. A. (2014). Synthesis, characterization and application of TiO₂ nanopowders as special paper coating pigment. *Applied nanoscience*, 4(3), 305-313.
- Ge, M. Z., Cao, C. Y., Huang, J. Y., Li, S. H., Zhang, S. N., Deng, S., Li, Q. S., Zhang, K. Q., and Lai, Y. K. (2016). Synthesis, modification, and photo/photoelectrocatalytic degradation applications of TiO₂ nanotube arrays: a review. *Nanotechnology Reviews*, 5(1), 75-112.
- Georgios, P., and Wolfgang, S. M. (2010). X-ray photoelectron spectroscopy of anatase-TiO₂ coated carbon nanotubes. *Solid State Phenomena*, 162, 163-177.
- Haggerty, J. E. S., Schelhas, L. T., Kitchaev, D. A., Mangum, J. S., Garten, L. M., Sun, W., Stone, K. H., Perkins, J. D., Toney, M. F., Ceder, G., Ginley, D. S., Gorman, B. P., and Tate, J. (2017). High-fraction brookite films from amorphous precursors. *Scientific Reports*, 7(1), 15232.
- Haring, A., Morris, A., and Hu, M. (2012). Controlling Morphological Parameters of Anodized Titania Nanotubes for Optimized Solar Energy Applications. *Materials*, 5(10), 1890-1909.
- Iraj, M., Kolaheidou, M., Asl-Soleimani, E., Esmaeili, E., and Kolaheidou, Z. (2016). TiO₂ nanotube formation by Ti film anodization and their transport properties for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(6), 6496-6501.
- Jiang, Z., Yang, F., Luo, N., Chu, B. T. T., Sun, D., Shi, H., Xiao, T., and Edwards, P. P. (2008). Solvothermal synthesis of N-doped TiO₂ nanotubes for visible-light-responsive photocatalysis. *Chemical Communications*, 47, 6372-6374.
- Kathirvel, S., Su, C., Yang, C. Y., Shiao, Y. J., Chen, B. R., and Li, W. R. (2015). The growth of TiO₂ nanotubes from sputter-deposited Ti film on transparent conducting glass for photovoltaic applications. *Vacuum*, 118, 17-25.

- Kim, J. T., Lee, S. H., and Han, Y. S. (2015). Enhanced power conversion efficiency of dye-sensitized solar cells with Li_2SiO_3 -modified photoelectrode. *Applied Surface Science*, 333, 134-140.
- Kim, T. H., Lee, J. W., Kim, B. S., Cha, H., and Nah, Y. C. (2014). Morphological investigation of anodized TiO_2 nanotubes fabricated using different voltage conditions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 196, 41-45.
- Koperska, M., Lojewski, T., and Lojewska, J. (2010). Vibrational spectroscopy to study degradation of natural dyes. Assessment of oxygen-free cassette for safe exposition of artefacts. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 399, 3271-3283.
- Krishnan, K., and Krishnan, R. S. (1966). Raman and infrared spectra of ethylene glycol. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 64(2), 111-122.
- Krumpmann, A., Dervaux, J., Derue, L., Douh ret, O., Lazzaroni, R., Snyders, R., and Decroly, A. (2017). Influence of a sputtered compact TiO_2 layer on the properties of TiO_2 nanotube photoanodes for solid-state DSSCs. *Materials & Design*, 120, 298-306.
- Kuo, Y.-Y., and Chien, C.-H. (2013). Sinter-free transferring of anodized TiO_2 nanotube-array onto a flexible and transparent sheet for dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*, 91, 337-343.
- Lei, B.-X., Liao, J.-Y., Zhang, R., Wang, J., Su, C.-Y., and Kuang, D.-B. (2010). Ordered Crystalline TiO_2 Nanotube Arrays on Transparent FTO Glass for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(35), 15228-15233.
- Lin, C.-J., Yu, W.-Y., and Chien, S.-H. (2010). Transparent electrodes of ordered opened-end TiO_2 -nanotube arrays for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 20(6), 1073-1077.
- Liu, N., Lee, K., and Schmuki, P. (2012). Small diameter TiO_2 nanotubes vs. nanopores in dye sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications*, 15(1), 1-4.
- Liu, X., Lin, J., Tsang, Y. H., Chen, X., Hing, P., and Huang, H. (2014). Improved anatase phase stability in small diameter TiO_2 nanotube arrays for high performance dye-sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 607, 50-53.
- Macak, J. M., Tsuchiya, H., Ghicov, A., and Schmuki, P. (2005). Dye-sensitized anodic TiO_2 nanotubes. *Electrochemistry Communications*, 7(11), 1133-1137.

- Marzec, A., Szadkowski, B., Rogowski, J., Maniukiewicz, W., Moszynski, D., Rybinski, P., and Zaborski, M. (2019). Carminic Acid Stabilized with Aluminum-Magnesium Hydroxycarbonate as New Colorant Reducing Flammability of Polymer Composites. *Molecules*, 24, 560-574.
- Masuko, K., Shigematsu, M., Hashiguchi, T., Fujishima, D., Kai, M., Yoshimura, N., Yamaguchi, T., Ichihashi, Y., Mishima, T., Matsubara, N., Yamanishi, T., Takahama, T., Taguchi, M., Maruyama, E., and Okamoto, S. (2014). Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(6), 1433-1435.
- Mathew, S., Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B. F. E., Ashari-Astani, N., Tavernelli, I., Rothlisberger, U., Nazeeruddin, M. K., and Grätzel, M. (2014). Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. *Nature Chemistry*, 6, 242.
- Mohammadpour, F., and Moradi, M. (2015). Double-layer TiO₂ nanotube arrays by two-step anodization: Used in back and front-side illuminated dye-sensitized solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 255-264.
- Munir, S., Shah, S. M., Hussain, H., and Siddiq, M. (2015). Adsorption of porphyrin and carminic acid on TiO₂ nanoparticles: A photo-active nano-hybrid material for hybrid bulk heterojunction solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 153, 397-404.
- Omoike, A. (2008). Synthesis and Characterization of Tannic Acid Functionalized Magnetic Nanoparticles. *Nanoparticles: Synthesis, Stabilization, Passivation, and Functionalization*, 996(996), 90-107.
- Ozacar, M., Soykan, C., and Şengil, A. (2006). Studies on synthesis, characterization, and metal adsorption of mimosa and valonia tannin resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 786-797.
- Park, K.-H., Kim, T.-Y., Han, S., Ko, H.-S., Lee, S.-H., Song, Y.-M., Kim, J.-H., and Lee, J.-W. (2014). Light harvesting over a wide range of wavelength using natural dyes of gardenia and cochineal for dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 128, 868-873.

- Patil, J. V., Mali, S. S., Hong, C. K., Kim, J. H., and Patil, P. S. (2017). Structural, morphological, and wettability study of electrochemically anodized 1D TiO₂ nanotube arrays. *Applied Physics A*, 123(10), 610.
- Peng, L., Mendelsohn, A. D., LaTempa, T. J., Yoriya, S., Grimes, C. A., and Desai, T. A. (2009). Long-Term Small Molecule and Protein Elution from TiO₂ Nanotubes. *Nano Letters*, 9(5), 1932-1936.
- Praveen, P., Viruthagiri, G., Mugundan, S., and Shanmugam, N. (2013). Structural, optical and morphological analyses of pristine titanium di-oxide nanoparticles-Synthesized via sol-gel route. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 117, 622-629.
- Regonini, D. (2008). *Anodised TiO₂ Nanotubes: Synthesis, Growth Mechanism and Thermal Stability*. Doctor of philosophy, Materials Research Centre, Department of Mechanical Engineering, University of Bath.
- Rho, W.-Y., Jeon, H., Kim, H.-S., Chung, W.-J., Suh, J. S., and Jun, B.-H. (2015). Recent Progress in Dye-Sensitized Solar Cells for Improving Efficiency: TiO₂ nanotube Arrays in Active Layer. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-17.
- Ringwald, C., and Ball, V. (2015). Layer-by-layer deposition of tannic acid and Fe³⁺ cations is of electrostatic nature but almost ionic strength independent at pH 5. *Journal of Colloid and Interface Science*, 450, 119-126.
- Roy, P., Kim, D., Lee, K., Spiecker, E., and Schmuki, P. (2010). TiO₂ nanotubes and their application in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale*, 2(1), 45-59.
- Shahzad, N., Shah, S. M., Munir, S., Hana, A., Jabeen, U., Nosheen, E., Habib, B., Khan, A. U., Hassan, Z., Siddiq, M., and Hussain, H. (2015). Charge-Transfer Complexation at Carminic Acid-CdS Interface and Its Impact on the Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Electronic Materials*, 44(4), 1167-1174.
- Shankar, K., Mor, G. K., Prakasam, H. E., Yoriya, S., Paulose, M., Varghese, O. K., and Grimes, C. A. (2007). Highly-ordered TiO₂ nanotube arrays up to 220 μm in length: use in water photoelectrolysis and dye-sensitized solar cells. *Nanotechnology*, 18(6), 065707-065716.

- Shao, Z., Zhu, W., Li, Z., Yang, Q., and Wang, G. (2012). One-Step Fabrication of CdS Nanoparticle-Sensitized TiO₂ Nanotube Arrays via Electrodeposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(3), 2438-2442.
- Shen, C., Wang, L., Zhou, A., Wang, B., Wang, X., Lian, W., Hu, Q., Qin, G., and Liu, X. (2018). Synthesis and Electrochemical Properties of Two-Dimensional RGO/Ti₃C₂T_x Nanocomposites. *Nanomaterials*, 8, 80-88.
- Tao, Y. (2016). Screen-Printed Front Junction n-Type Silicon Solar Cells. 47-73.
- Tripathi, B., Yadav, P., and Kumar, M. (2014). Charge transfer and recombination kinetics in dye-sensitized solar cell using static and dynamic electrical characterization techniques. *Solar Energy*, 108, 107-116.
- Venkatasubramanian, R., Quinn, B. C. O., Hills, J. S., Sharps, P. R., Timmons, M. L., Hutchby, J. A., Field, H., Ahrenkiel, R., and Keyes, B. (1996). 18.2% (AM1.5) efficient GaAs solar cell on optical-grade polycrystalline Ge substrate. *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists*, 31-36.
- Wang, J., Qu, S., Zhong, Z., Wang, S., Liu, K., and Hu, A. (2014). Fabrication of TiO₂ nanoparticles/nanorod composite arrays via a two-step method for efficient dye-sensitized solar cells. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(6), 588-592.
- Wang, X., Liu, Y., Zhou, X., Li, B., Wang, H., Zhao, W., Huang, H., Liang, C., Yu, X., Liu, Z., and Shen, H. (2012). Synthesis of long TiO₂ nanowire arrays with high surface areas via synergistic assembly route for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 22(34), 17531-17538.
- Wei, W., Berger, S., Hauser, C., Meyer, K., Yang, M., and Schmuki, P. (2010). Transition of TiO₂ nanotubes to nanopores for electrolytes with very low water contents. *Electrochemistry Communications*, 12(9), 1184-1186.
- Yang, L., Han, L., Ren, J., Wei, H., and Jia, L. (2015). Coating process and stability of metal-polyphenol film. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 484, 197-205.
- Yu, X., Wang, H., Liu, Y., Zhou, X., Li, B., Xin, L., Zhou, Y., and Shen, H. (2013). One-step ammonia hydrothermal synthesis of single crystal anatase TiO₂ nanowires for

highly efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(6), 2110-2117.

แม่น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, พลกฤษณ์ แสงวณิช, ภควดี สุทธิไวยกิจ, มาณพ สิทธิเดช, สายสุนีย์ เท ลี๋ยวเรืองรัตน์, อุมาพร สุขม่วง, and วันเพ็ญ ช้อนแก้ว. (2553). หลักการและเทคนิคการ วิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

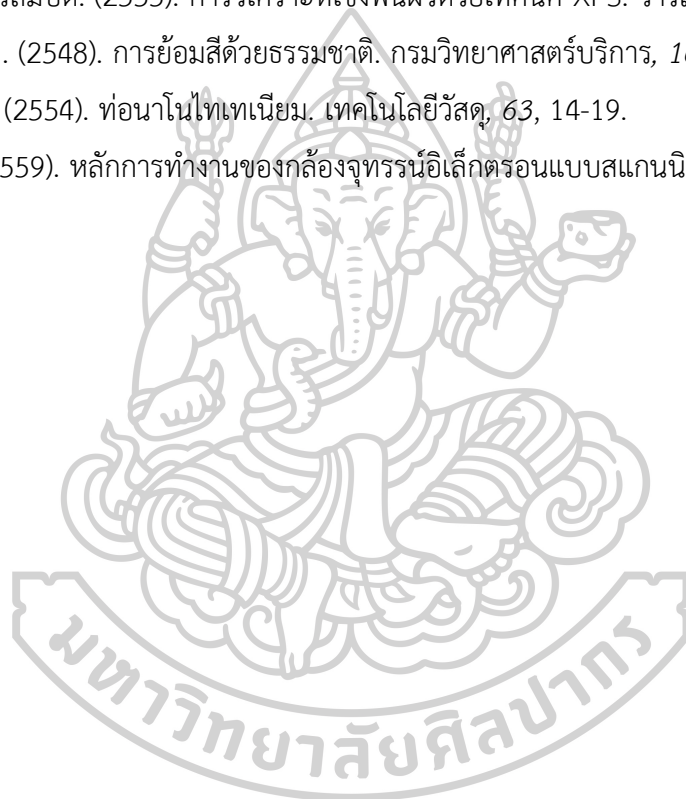
รักไทยเจริญชีพ, ศ. (2558). ประโยชน์จากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและ ผลิตภัณฑ์. *กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 197(63), 38-40.

ละอองนวล ศรีสมบัติ. (2555). การวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยเทคนิค XPS. *วารสารฟิสิกส์ไทย*, 29, 3-9.

วันโพนทอง, ว. (2548). การย้อมสีด้วยธรรมชาติ. *กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 168(53), 35-37.

ศรชล โยริยะ. (2554). ท่อนาโนไทเทเนียม. *เทคโนโลยีวัสดุ*, 63, 14-19.

ศรีอ่อน, อ. (2559). หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง. *เทคโนโลยีวัสดุ*, 81, 77-80.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วนิดา ลำพล
วัน เดือน ปี เกิด	05 พฤศจิกายน 2533
สถานที่เกิด	อ.เมือง จ.กระบี่
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย กระบี่ ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิทยาศาสตร์-เคมี (กศ.บ.) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ 190/9 ม.2 ตำบลคลองท่อมใต้ อำเภอคลองท่อม จังหวัดกระบี่ วิฑวัส ชาญดี, ธีระพัฒน์ ชื่นใจ, วนิดา ลำพล และ ศศิประภา วิลาวัลย์. (2562). การศึกษามโนมติคลาดเคลื่อนเรื่องสมดุลเคมีของนักศึกษา วิทยาศาสตร์การกีฬาในรายวิชาปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน.เอกสารประกอบการ ประชุมนำเสนอผลงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ระดับชาติ ครั้งที่ 15, มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, 445-456. การนำเสนอผลงานวิจัย Lumpol V., Aiempanakit M. and Suwanchalit C., Fabrication of nanostructure TiO ₂ by Anodization method. Poster presentation at 44th Congress on Science and Technology of Thailand (STT44), Bangkok, Thailand, 29th-31th October 2018. Lumpol V., Aiempanakit M., Triamrak N., Sritharathikhun J., and Suwanchawalit C., Fabrication of nanotubes TiO ₂ films and their DSSC application. Poster presentation at Pure and Application Chemistry International Conference 2019 (PACCON), Bangkok, Thailand, 7th-8th February 2019.
ที่อยู่ปัจจุบัน	
ผลงานตีพิมพ์	

