



การสังเคราะห์คาร์บอนดัดแปลงพื้นผิวของทินออกไซด์ขนาดนาโนเมตรพร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติใน
การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง

โดย

นายวรเชษฐ สมบูรณ์นะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การสังเคราะห์คาร์บอนดัดแปลงพื้นผิวของทินออกไซด์ขนาดนาโนเมตรพร้อมทั้งศึกษา
คุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

SYNTHESIS OF CARBON-MODIFIED TIN OXIDE NANOPARTICLES AND STUDY
ON PHOTOCATALYTIC PROPERTIES



By
MR. Worrachead SOMBOONNA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science PHYSICS
Department of PHYSICS
Academic Year 2023
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การสังเคราะห์คาร์บอนดัดแปลงพื้นผิวของทินออกไซด์ขนาดนาโน
โดย	เมตรพร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
สาขาวิชา	นายวรเชฐ สมบูรณ์นะ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เอี่ยมพนากิจ
	รองศาสตราจารย์ ดร. ชีวตา สุวรรณชวลิต

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ ฉิมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เอี่ยมพนากิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีวตา สุวรรณชวลิต)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวรัตน์ ศิริวงษ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร. มนฤดี เลี้ยงรักษา)

650720003 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ทिनออกไซด์ คาร์บอนดอท การย่อยสลายสีย้อม การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

นาย วรเชษฐ์ สมบูรณ์นะ: การสังเคราะห์คาร์บอนดัดแปลงพื้นผิวของทिनออกไซด์ขนาดนาโนเมตรพร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เอี่ยมพนากิจ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำทिनออกไซด์และเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท วัสดุดังกล่าวได้รับการออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงยูวี การสังเคราะห์ทिनออกไซด์โดยใช้วิธีการตกตะกอนอย่างง่ายที่พีเอชต่าง ๆ สารสังเคราะห์ถูกเผาที่อุณหภูมิต่างกันและดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าทिनออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นแผ่นระดับขนาดนาโนเมตรที่เกาะเป็นกลุ่มทรงกลมขนาดระดับไมโครเมตร อย่างไรก็ตามทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้สภาวะที่เป็นด่างแสดงลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดระดับนาโนเมตรที่อัดตัวแน่นบนพื้นผิวเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่ำ การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าโครงสร้างของสารสังเคราะห์เปลี่ยนจากทินไฮดรอกไซด์เป็นทिनออกไซด์และทินไดออกไซด์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 150 เป็น 250 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 3.15 ถึง 3.80 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นอยู่กับเฟสของสารสังเคราะห์ ในแง่ของการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงยูวีพบว่าสารสังเคราะห์ที่พีเอช 2 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลินบลูอยู่ที่ 98.41 เปอร์เซ็นต์ ภายใน 40 นาที ภายใต้แสงยูวี เมื่อปรับปรุงพื้นผิวทिनออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลินบลูเพิ่มขึ้นเป็น 99.22 เปอร์เซ็นต์ ภายใน 10 นาที นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างน้อยสองรอบ การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการดัดแปลงพื้นผิวทिनออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอทในด้านการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการใช้งานต่อไป

650720003 : Major PHYSICS

Keyword : Carbon dot, Degradation of dye, Photocatalysis, Tin oxide

MR. Worrachad SOMBOONNA : Synthesis of Carbon-modified Tin Oxide Nanoparticles and Study on Photocatalytic Properties Thesis advisor : Assistant Professor Montri Aiempanakit, Ph.D.

This research aimed to identify optimal conditions for synthesizing tin oxide semiconductors and enhancing their efficiency by surface modification with carbon dots. The materials were designed to function as photocatalysts for the degradation of methylene blue dye under UV irradiation. The synthesis of tin oxide using a simple precipitation method under acid-basic conditions. The synthetic tin oxide was calcined at different temperatures and modified with varying amounts of carbon dots. It found that the tin oxide synthesized under acidic conditions exhibited a morphology characterized by nanosheets grouped into microspheres. However, synthetic tin oxide under alkaline conditions showed nanometer-sized spherical particles densely packed on the surface when calcined at low temperatures. Structural analysis using X-ray diffraction revealed that the substance's structure transitioned from tin hydroxide to tin oxide and tin dioxide as the temperature increased from 150 to 250°C. The energy gap ranged from 3.15 to 3.80 eV depending on the phase of the tin oxide. In terms of methylene blue dye degradation under UV irradiation, we found that the substance synthesized at a pH of 2, calcined at 150°C, the efficiency of methylene blue degradation was 98.41 % within 40 minutes under UV irradiation. When the tin oxide surface was modified with 2.5 % by mass of carbon dot, it was found that the efficiency of methylene blue degradation increased to 99.22 % within 10 minutes. Furthermore, it demonstrated the ability to be reused for at least two cycles. These findings suggest its potential as a photocatalyst for further applications.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ และภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในการอนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ ขอขอบคุณนางสาวชุตติมา นาคमुख ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำวิธีการสังเคราะห์สาร นางสาวกัญญาพร วงษ์แหวน ซึ่งได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ คุณวิฑูรย์ วรรณะนิตย์ สำหรับความรู้และประสบการณ์มากมาย และอีกหลายท่านในศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความรู้และคำแนะนำระหว่างการใช้เครื่องมือ



วรเชษฐ สมบูรณ์นะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 ทินออกไซด์ (SnO).....	4
2.1.2 ทินไดออกไซด์ (SnO ₂).....	4
2.1.3 คาร์บอนดอท (CDs).....	4
2.1.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ SnO ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม.....	5
2.1.5 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis).....	5
2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์.....	6
2.2.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD).....	6
2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	6
2.2.3 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer, UV-Vis).....	6

2.2.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR).....	7
2.2.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer).....	7
2.2.6 สเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS).....	9
2.2.7 สเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)	9
2.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM).....	9
2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	16
3.4.1 การสังเคราะห์ทินออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน.....	16
3.4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท.....	17
3.4.3 การสังเคราะห์สารผสมระหว่างทินออกไซด์และคาร์บอนดอท	17
3.5 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของทินออกไซด์	17
3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ	17
3.5.2 การตรวจสอบลักษณะรูปร่างและวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ	18
3.5.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน	18
3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสง	18
3.5.5 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาค	19
3.5.6 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน.....	19

3.6 การย่อยสลายสีย้อม	19
3.6.1 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม.....	19
3.6.2 การทดสอบปริมาณอนุมูลที่เกิดขึ้น	19
3.6.3 ประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา	20
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล	21
4.1 การสังเคราะห์ทินออกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ	21
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน	21
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน.....	23
4.1.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน	26
4.1.4 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน.....	30
4.1.5 พื้นที่ผิวของทินออกไซด์ที่ pH ต่างกัน.....	32
4.1.6 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน	34
4.2 การสังเคราะห์ SnO ₂ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	36
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน	36
4.2.2 โครงสร้างของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน	36
4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน	37
4.2.4 ประจุบนพื้นผิวและขนาดอนุภาคของทินออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน.....	40
4.2.5 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน	42
4.2.6 พื้นที่ผิวของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน.....	44
4.2.7 ศึกษาการสั่นของพันธะด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	45
4.2.8 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่พื้นผิวด้วยเทคนิค XPS	46
4.2.9 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน.....	47
4.3 การสังเคราะห์ทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท.....	53
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติของคาร์บอนดอท	53

4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคาร์บอนดอท.....	54
4.3.3 การศึกษาการเรืองแสงของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์.....	54
4.3.4 การสั่นของพันธะของคาร์บอนดอทโดยการดูคลื่นแสงอินฟราเรด.....	55
4.3.4 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท.....	56
4.3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท.....	56
4.3.6 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท.....	58
4.3.7 การศึกษาการสั่นของพันธะของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท.....	60
4.3.8 การศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวของทินออกไซด์ที่มีการดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอน ดอท.....	60
4.3.9 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	66
รายการอ้างอิง.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	76



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ขนาดผลึกโดยเฉลี่ยคำนวณจากสมการเซอร์เรอร์ของทินออกไซด์แต่ละเงื่อนไข.....	26
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผา.....	29
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH เเผาที่ 400 องศาเซลเซียส.....	30
ตารางที่ 4 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ในแต่ละเงื่อนไข.....	32
ตารางที่ 5 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของทินออกไซด์.....	33
ตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมในที่มืดและประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมภายใต้แสงยูวีใน เวลา 90 นาที.....	34
ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา.....	40
ตารางที่ 8 ศักย์ซีตาของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา.....	42
ตารางที่ 9 ค่า λ_{onset} และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ที่แต่ละอุณหภูมิเผา.....	43
ตารางที่ 10 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของทินออกไซด์เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	44
ตารางที่ 11 λ_{onset} และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นที่ผิwtินออกไซด์ ด้วยปริมาณคาร์บอนดอทต่าง ๆ.....	59
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมกับงานวิจัยอื่น.....	65

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กลไกการย่อยสลายสีย้อมของ SnO โดยการกระตุ้นด้วยแสงยูวี.....	2
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ SnO.....	16
ภาพที่ 3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ CDs	16
ภาพที่ 4 แผนภาพขั้นตอนการทดลองทั้งหมด.....	20
ภาพที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผา.....	22
ภาพที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยผ่านการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส .	22
ภาพที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ...	23
ภาพที่ 8 XRD ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผา.....	25
ภาพที่ 9 XRD ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH ผ่านการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส	26
ภาพที่ 10 SEM ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผากำลังขยาย 100,000 เท่า.....	28
ภาพที่ 11 SEM กำลังขยาย 100,000 เท่า ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH เผาที่ 400 องศาเซลเซียส.	29
ภาพที่ 12 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา.....	31
ภาพที่ 13 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH ที่ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	32
ภาพที่ 14 การดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา.....	33
ภาพที่ 15 การกระจายขนาดรูพรุนในทินออกไซด์ที่ pH ต่าง ๆ.....	33
ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา	35
ภาพที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ในแต่ละอุณหภูมิเผา.....	35
ภาพที่ 18 XRD ของทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิเผาต่างกัน	37
ภาพที่ 19 SEM ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผากำลังขยาย 100,000 เท่า.....	38
ภาพที่ 20 TEM ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	39
ภาพที่ 21 ศักย์ซีตาของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา.....	42

ภาพที่ 22 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา.....	43
ภาพที่ 23 การดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา.....	44
ภาพที่ 24 การกระจายขนาดรูพรุนในทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เเผที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	45
ภาพที่ 25 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา.....	46
ภาพที่ 26 XPS spectra ของทินออกไซด์ที่เผาที่ 150 องศาเซลเซียส.....	47
ภาพที่ 27 การดูดซับสีย้อมในที่มีด 60 นาที ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา	48
ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา	48
ภาพที่ 29 การหาค่าคงที่การย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
ภาพที่ 30 การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 644 นาโนเมตร ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เเผที่ 150 องศาเซลเซียส	50
ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมที่ใส่สารดักจับอนุมูลชนิดต่าง ๆ ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เเผที่ 150 องศาเซลเซียส.....	50
ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพการย่อยสลายซ้ำในแต่ละรอบของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เเผที่ 150 องศาเซลเซียส	51
ภาพที่ 33 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เเผที่ 150 องศาเซลเซียส หลังจากทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง.....	52
ภาพที่ 34 XRD ของทินออกไซด์หลังจากใช้ย่อยสลายสีย้อม 3 รอบ ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เเผที่ 150 องศาเซลเซียส.....	52
ภาพที่ 35 ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องตีมีซี-วิท	53
ภาพที่ 36 การดูดกลืนแสงของคาร์บอนดอท.....	53
ภาพที่ 37 ศักย์ซีตาของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องตีมีซี-วิท.....	54
ภาพที่ 38 TEM ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องตีมีซี-วิท	54
ภาพที่ 39 ความเข้มของการเรืองแสงของคาร์บอนดอทที่พลังงานกระตุ้น 355 นาโนเมตร.....	55

ภาพที่ 40 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของคาร์บอนดอท	55
ภาพที่ 41 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์เผาที่ 150 องศาเซลเซียส แล้วดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในปริมาณต่าง ๆ.....	57
ภาพที่ 42 SEM ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทกำลังขยาย 100,000 เท่า.....	57
ภาพที่ 43 TEM ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์.....	58
ภาพที่ 44 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์	59
ภาพที่ 45 การดูดซับแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์.....	61
ภาพที่ 46 XPS Spectra ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์.....	61
ภาพที่ 47 การดูดซับเมทิลีนบลูในที่มีดของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในปริมาณที่ต่างกัน.....	62
ภาพที่ 48 ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท ปริมาณต่างกัน	63
ภาพที่ 49 ค่าคงที่การย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์.....	63
ภาพที่ 50 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโดยใส่สารจับอนุภาคแต่ละชนิดของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์.....	64
ภาพที่ 51 ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ในแต่ละรอบ	64

บทที่ 1

บทนำ

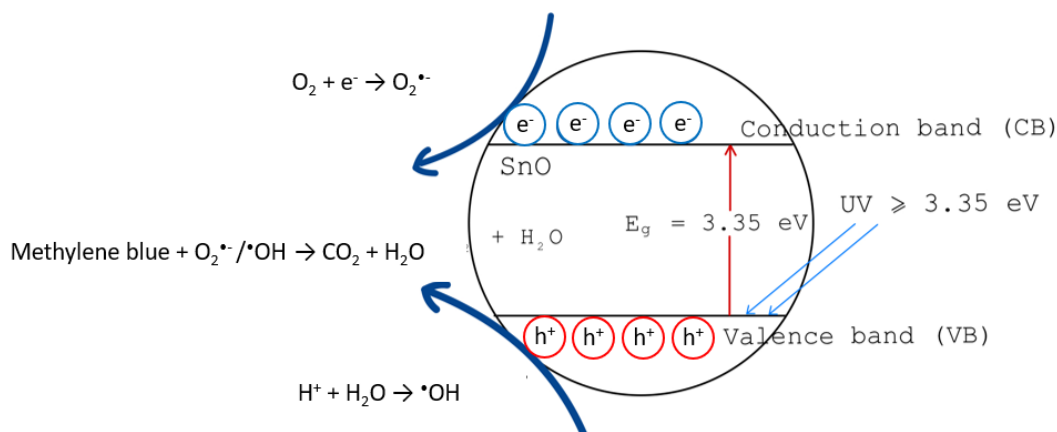
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษทางน้ำเป็นหนึ่งในปัญหาใหญ่ที่สุดในยุคปัจจุบันซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกปี โดยมีสาเหตุหลายประการ เช่น ธรรมชาติ เกษตรกรรม พุทธิกรรมของมนุษย์ และที่ใหญ่ที่สุดคือภาคอุตสาหกรรม [1] เช่น การผลิตยาง พลาสติก หนัง กระดาษ เครื่องสำอาง สิ่งพิมพ์ อาหาร [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีสีย้อมปนเปื้อนมากับน้ำทิ้ง ในปัจจุบันหลายงานวิจัยให้ความสนใจในเรื่องนี้ เนื่องจากความเป็นพิษและความอันตรายของสีย้อมเมื่อปนเปื้อนกับแหล่งน้ำในธรรมชาติ สีย้อมคือสารอินทรีย์ที่ให้ความเป็นสีกับสารอื่น ซึ่งมีด้วยกันหลายประเภทขึ้นกับชนิดของอุตสาหกรรม สามารถจำแนกได้ 3 ชนิด คือ สีย้อมประจุบวก ประจุลบ และแบบไม่มีประจุ โดยที่สีย้อมประจุลบจะมีความอันตรายมากกว่าสีย้อมประจุบวก [3] และเมื่อสีย้อมปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารอาจส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนังอักเสบ หรือแม้แต่การกลายพันธุ์ในมนุษย์ [4] การกำจัดสีย้อมในอดีตที่ผ่านมาได้ด้วยกันหลายวิธี เช่น การตกตะกอนหนัก การเกาะกลุ่มตกตะกอน การกรอง การตกตะกอน การดูดซับ และการย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากแสง ซึ่งการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นมีข้อดีคือต้นทุนต่ำ ประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูง ทนต่อการกัดกร่อนและอุณหภูมิ รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นพิษเพิ่มขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นนิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) ทิน (IV) ออกไซด์ (SnO_2) และทินออกไซด์ (SnO) เป็นต้น ซึ่งการพัฒนาประสิทธิภาพของสารเหล่านี้ สามารถทำได้ตั้งแต่กระบวนการสังเคราะห์ เช่น ปรับเปลี่ยนรูปร่าง ขนาด เพิ่มความเป็นผลึก เป็นต้น [5]

SnO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p - type semiconductor) ซึ่งมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap, E_g) ประมาณ 2.5 - 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ [6] ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือ ถูกกระตุ้นโดยแสงได้ง่ายตามกลไกดังแสดงในภาพที่ 1 และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วิธีการสังเคราะห์ไม่ซับซ้อน ต้นทุนการสังเคราะห์ต่ำ บางงานวิจัย สังเคราะห์ทินออกไซด์และดัดแปลงประสิทธิภาพด้วยการเติมคลอรีน (Cl) [7] และบทความ 8 ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจี้ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 30 นาที มีการเพิ่มประสิทธิภาพของทินออกไซด์ด้วยการใส่สารลดแรงตึงผิวในขั้นตอนการสังเคราะห์ พบว่าสามารถย่อยสลายเมทิลินบลูได้ 94 เปอร์เซ็นต์ ภายใน 30 นาที ภายใต้

แสงยูวี และ 30 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยใช้อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อม เป็น 0.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร [8] บางงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับสารที่ช่วงในการสังเคราะห์ SnO โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนีย โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่าทินออกไซด์ที่ได้ จากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นรูปผลึกคล้ายแผ่นของทินออกไซด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการ ย่อยสลายและดูดซับสีย้อมในที่มืดได้ดีที่สุด โดยมีการดูดซับเมทิลีนบลูในที่มืดได้ 22.6 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 9 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 30.75 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสง ยูวีในเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากการมีผลึกของ SnO คล้ายแผ่นที่บางที่สุดเทียบกับการใช้สารตั้งต้นตัว อื่น

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเงื่อนไขในการสังเคราะห์ SnO ที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างคาร์บอนดอท (CDs) ที่สังเคราะห์ได้จาก เครื่องดื่มยี่ห้อซี-วิท (C-vitt) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมภายใต้แสงยูวีของ SnO เป็น 1 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล



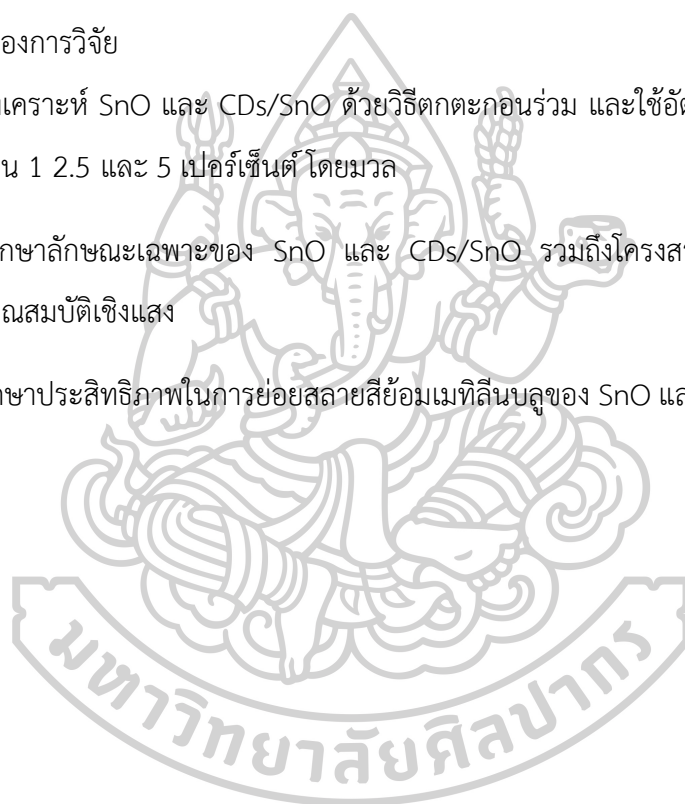
ภาพที่ 1 กลไกการย่อยสลายสีย้อมของ SnO โดยการกระตุ้นด้วยแสงยูวี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ทินออกไซด์ (SnO) และทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท (CDs/SnO)
2. เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยา ลักษณะเฉพาะ และคุณสมบัติเชิงแสงของ SnO และ CDs/SnO
3. เพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของ SnO และ CDs/SnO ภายใต้แสงยูวี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สังเคราะห์ SnO และ CDs/SnO ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม และใช้อัตราส่วนคาร์บอนดอทต่อทินออกไซด์เป็น 1 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล
2. ศึกษาลักษณะเฉพาะของ SnO และ CDs/SnO รวมถึงโครงสร้างสัณฐานวิทยา ขนาดอนุภาค และคุณสมบัติเชิงแสง
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของ SnO และ CDs/SnO ภายใต้แสงยูวี



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทินออกไซด์ (SnO)

ทินออกไซด์หรือดีบุกออกไซด์ มีชื่อตาม IUPAC ว่า Tin(II) oxide สูตรโมเลกุลคือทินออกไซด์ และมีมวลต่อโมลเป็น 134.709 กรัมต่อโมล เป็นสารประกอบระหว่างธาตุดีบุก (Sn) กับออกซิเจน (O) โครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล ไม่ละลายน้ำ โดย Sn ต้องมีสถานะออกซิเดชันเป็น +2 มีโครงสร้างสองแบบสังเกตได้จากสีของสาร คือ โครงสร้างแบบเสถียรจะมีสีน้ำเงินเข้มหรือกรมท่า แต่จะเปลี่ยนเป็นสีขาวถ้าอยู่ในน้ำ ส่วนโครงสร้างกึ่งเสถียรจะมีสีแดง ถ้าทินออกไซด์อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ (SnO₂) [9]

2.1.2 ทินไดออกไซด์ (SnO₂)

ทินไดออกไซด์มีชื่อตาม IUPAC ว่า Tin(IV) oxide สูตรโมเลกุลคือ SnO₂ และมีมวลต่อโมลเป็น 150.708 กรัมต่อโมล เป็นสารประกอบระหว่างดีบุกสถานะออกซิเดชันเท่ากับ 4 กับออกซิเจน โครงสร้างผลึกเป็นแบบรูทีลเตตระโกนอล ไม่ละลายน้ำ มีสีเทาอ่อน หรือสีเหลืองอ่อน เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N - type semiconductor) [10] ซึ่งเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานประมาณ 3.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ทินไดออกไซด์ถูกใช้ในงานหลากหลายประเภทเช่น ก๊าซเซ็นเซอร์ ตัวเก็บประจุ เซลล์แสงอาทิตย์ หรือเครื่องมือทางแสงต่าง ๆ [11] และในการสังเคราะห์ SnO₂ ทำได้โดยเผาดีบุกภายใต้บรรยากาศปกติ [12]

2.1.3 คาร์บอนดอท (CDs)

คาร์บอนดอท มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1 ถึง 10 นาโนเมตร มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิว ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางแสง ปลอดภัย สังเคราะห์ง่าย ต้นทุนต่ำ คาร์บอนดอทสามารถวางแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้หลายสีเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นของแสงที่กระตุ้น ซึ่งการวางแสงขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดของคาร์บอนดอทที่เล็กลงจะส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมาก ส่งผลให้พลังงานกระตุ้นและแสงที่เกิดจากการวางเปลี่ยนไป หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอทที่ต่างชนิดกันส่งผลให้การวางแสงต่างกัน ปรากฏการณ์สถานะโมเลกุลเป็นปรากฏการณ์ที่การวางแสงถูกกำหนดโดยโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันของคาร์บอนดอท และการคาย

พลังงานเมื่อเกิดการเชื่อมขวาง เป็นการรวมแสงที่พบในคาร์บอนดอทที่เกิดจากการเชื่อมกันของสารตั้งต้นที่เป็นโพลิเมอร์ การรวมแสงของคาร์บอนดอทอาจเกิดจากหลายกลไกแต่สามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนดอทมีคุณสมบัติการรวมแสงที่น่าสนใจ [13] นอกจากนี้คาร์บอนดอทสามารถนำไปใช้ในชีวเวชศาสตร์ เซ็นเซอร์ หรือไดโอดเปล่งแสง [14]

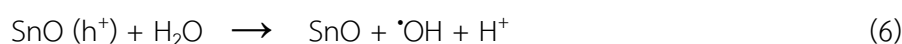
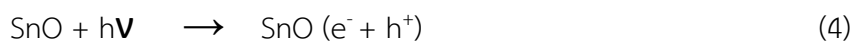
2.1.4 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ SnO ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม

ปฏิกริยาการสังเคราะห์ SnO เริ่มจากทินคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำ จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นเข้าแทนที่คลอรีนในโมเลกุล ทินคลอไรด์ไดไฮเดรต มีผลให้เกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และน้ำในปฏิกริยา (1) จากนั้นเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) อีกครั้งได้ทินไฮดรอกไซด์ ($\text{Sn}(\text{OH})_2$) [15] จากนั้นทินไฮดรอกไซด์ทำปฏิกริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดทินออกไซด์จาก $\text{Sn}(\text{OH})_2$ (3) อีกด้วย [16]



2.1.5 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

เมื่อ SnO ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานจะเกิดอิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ขึ้นที่ผิวของ SnO ดังสมการที่ (4) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่แถบการนำ (Conduction band, CB) ทำปฏิกริยากับออกซิเจนเกิดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) (5) และโฮลที่แถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) จะเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของน้ำเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) (6) เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ขึ้นเนื่องจากอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ดังสมการที่ (7) สุดท้ายอนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกริยาออกซิเดชันกับสีย้อม (8) ได้เป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์





2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

2.2.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่อาศัยกฎของแบร็ก (Bragg's Law) คือเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของอะตอมภายในผลึก รังสีเอกซ์จะเกิดการสะท้อนที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ทำให้มีการนำมาใช้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาแตกต่างกัน จึงทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ ทำให้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification) โครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้

2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ โดยผลที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิง วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างด้วยสเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) ที่ติดอยู่กับ SEM

2.2.3 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer, UV-Vis)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการตรวจวัดปริมาณของแสง และค่าความเข้มแสงในช่วงแสงยูวีจนถึงช่วงแสงที่ตามองเห็นที่เกิดจากทั้งการทะลุผ่าน การส่องผ่าน และการสะท้อนของวัสดุตัวอย่างที่ถูกวางไว้ในตัวเครื่องมือ หลักการของการฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวที่มีพลังงานที่เหมาะสมไปที่วัสดุตัวอย่างทำให้เกิดการย้ายระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมของสารนั้นทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า แล้วเกิดการคายพลังงานออกมาอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่เหมาะสมในรูปของความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งตัวเครื่องจะทำการตรวจจับช่วงของพลังงานเหล่านั้นเพื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านการสะท้อน และการส่องผ่านจากวัสดุตัวอย่าง

แล้วนำมาทำการเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของเบียร์แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) โดยค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) จะแปรผันตรงกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้น เราจึงสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการระบุทั้งชนิด และปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่างได้

2.2.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เพื่อตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุล โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงช่วงอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) คือประมาณ 400 - 4000 ต่อเซนติเมตร เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการงอ (Bending) ของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสง และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่นได้ผลเป็นสเปกตรัม ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน ทำให้จำแนกพันธะของสารที่ทำการทดสอบได้

2.2.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิธีการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิววัสดุ [17] ซึ่งถูกศึกษาโดย บรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ทั้งนี้เทคนิคดังกล่าวถูกเรียกย่อ ๆ ว่าเทคนิค BET โดยมีหลักการคือวัดการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่ผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของสารที่อุณหภูมิของก๊าซเหลว พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิว จากนั้นก๊าซไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษานี้ สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการที่เรียกว่าสมการของ BET คือ

$$\frac{1}{W\left(\frac{P}{P_0}\right)-1} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (9)$$

โดยที่ W คือ ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

W_m คือ ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะเป็นโมเลกุลชั้นเดียว

P คือ ความดันของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง (มิลลิเมตรปรอท)

P_0 คือ ความดันอิ่มตัวของก๊าซไนโตรเจน (มิลลิเมตรปรอท)

C คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟสมการ (9) ระหว่าง $\frac{1}{W\left(\frac{P}{P_0}\right)-1}$ และ $\frac{P}{P_0}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (S) และจุดตัดแกน (i) ตามสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$S = \frac{C-1}{W_m C} \quad (10)$$

$$i = \frac{1}{W_m C} \quad (11)$$

การดูดซับก๊าซบนพื้นผิวของวัสดุมีลักษณะเป็นโมเลกุลชั้นเดียว ดังนั้นปริมาณของก๊าซที่ดูดซับบนพื้นผิว (W_m) คำนวณได้จากการนำค่า S และ i ที่ได้จากการทดลองแทนค่าในสมการ

$$W_m = \frac{1}{S+i} \quad (12)$$

และสามารถคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (W_m) ได้ตามสมการ

$$S_t = \frac{WNA_{cs}}{M} \quad (13)$$

โดย S_t คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ หน่วยตารางเมตร

N คือ เลขอาโวกราโดร ประมาณ 6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล

M คือ มวลต่อโมลของก๊าซไนโตรเจน ประมาณ 28 กรัมต่อโมล

A_{cs} คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลก๊าซไนโตรเจน ประมาณ 16.2×10^{-23} ตารางเมตร

2.2.6 สเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลักการคือเมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอน จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ด้วยการผลึกให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์แบบแคแบริกเทอร์สติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของแสงที่ตกกระทบ และส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อไป จึงสามารถใช้ระบุชนิดของธาตุได้

2.2.7 สเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

สเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron spectroscopy, XPS) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของวัสดุ หลักการคืออิเล็กตรอนในอะตอมของวัสดุที่ทำการวัดจะดูดกลืนลำแสงโฟตอน (Photon) จนหลุดออกมาพร้อมพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เมื่ออิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ก็จะคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ ถ้าพลังงานนี้ทำให้อิเล็กตรอนตัวอื่นดูดกลืนแล้วหลุดออกไปจะเรียกว่าอิเล็กตรอนโอเจอร์ (Auger electron) โดยเครื่องจะทำการวัดพลังงานจลน์ดังกล่าวแล้วเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของธาตุที่เราวัด โดยทั่วไปแล้วสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนในชั้นต่าง ๆ จะไม่เหมือนกันในแต่ละธาตุ ทำให้สามารถระบุธาตุองค์ประกอบและสถานะทางเคมีบริเวณพื้นผิวได้ [18]

2.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ใช้สำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก หลักการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งให้ภาพ 2 มิติ กำลังขยาย 50 ถึง 600,000 เท่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 120 กิโลโวลต์ สามารถทำงานร่วมกับเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-

ray spectrometer, EDS) ซึ่งทำให้สามารถศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุหรือสารมลทินบนพื้นผิวของวัสดุที่นำมาศึกษา [19]

2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Kaizra, Louafi และคณะวิจัย (ปี 2015) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในฟิล์มบางซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้ผลึกของทินบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้น พบว่าในการย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน ได้ 67 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้แสงช่วงที่มองเห็นได้ โดยการปลูกฟิล์มทินออกไซด์ลงบนเป้าทิน [20] Lee, Kim และคณะวิจัย (ปี 2019) ประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 4 – 9 เปอร์เซ็นต์ จากปกติ 37 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงช่วงที่สามารถมองเห็นได้ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้วิธีปลูกทินออกไซด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ [21] Liang, Sun และคณะวิจัย (ปี 2018) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของทินออกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งย่อยสลายสีย้อมเมทิลลอรันจ์ได้ 98.3 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 40 นาที ภายใต้แสงความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ภายใต้เงื่อนไขการเผาที่ 225 องศาเซลเซียส และพบว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์จะน้อยที่สุดเมื่อเผาที่ 225 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ 200 100 ตามลำดับ [22] Liang, Zhang และคณะวิจัย (ปี 2019) ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของทินออกไซด์โดยการเติมคลอรีน และใช้วิธีบดเชิงกลเป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าการย่อยสลายเมทิลลอรันจ์ได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 30 นาที ภายใต้แสงช่วงที่ตามองเห็นได้ด้วย ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร [7] Cui, Wang และคณะวิจัย (ปี 2015) สังเคราะห์ทินออกไซด์ โดยวิธีไฮโดรเทอร์มัลให้เป็นรูปผลึกคล้ายดอกไม้ขนาดเฉลี่ยประมาณ 12 ไมโครเมตร ส่วนที่เป็นกลีบดอกกว้าง 400 ยาว 800 และหนาประมาณ 27 นาโนเมตร ตามลำดับ มีพื้นที่ผิว 7.59 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่ามีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลลอรันจ์ 83 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 150 นาที ภายใต้แสงยูวีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร [6]

Chen, Jiang และคณะวิจัย (ปี 2021) ประสบความสำเร็จในการตกแต่งคาร์บอนดอทบนทินไดออกไซด์โดยเทคนิคไฮโดรเทอร์มัล พบว่าเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมโรโดมินบีจาก 20.1 เปอร์เซ็นต์ เป็น 99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 120 นาที ภายใต้แสงช่วงที่ตามองเห็นได้ [23] Haspulat, Saribel และคณะวิจัย (ปี 2020) ประสบความสำเร็จในการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับการสังเคราะห์ทินออกไซด์ โดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูและโรโดมินบีเป็น 100 และ 91 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 60 นาที ภายใต้แสงยูวี และสำหรับแสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้คือ 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์ [8] Luque และคณะวิจัย (ปี 2020) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดเปลือกส้มช่วย

ในการสังเคราะห์ทินไดออกไซด์โดยใช้ความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 1 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ในการตกตะกอน เมื่อเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง พบว่าทินออกไซด์ที่ได้มีขนาด 4.5 นาโนเมตร และเมื่อใช้ความเข้มข้นสารสกัดผสมในสารละลายที่ใช้สังเคราะห์ 4 เปอร์เซ็นต์ สารที่ได้จะมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน 3.49 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 120 นาที [15] Garrafa-Galvez และคณะวิจัย (ปี 2019) ใช้แหล่งคาร์บอนจากเปลือกมะเขือเทศเป็นสารละลายตัวกลางสังเคราะห์ทินไดออกไซด์ ด้วยวิธีตกตะกอน หลังจากเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการใช้สารสกัดจากเปลือกมะเขือเทศผสมในสารละลายตอนสังเคราะห์ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลต่อปริมาตร ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่ดีที่สุดคือ 99 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 120 นาที โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเป็น 4.1 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็ก และยังพบว่าการผสมสารสกัด 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลต่อปริมาตร ทินออกไซด์จะมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานต่ำที่สุดคือ 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ [24] Singh และคณะวิจัย (ปี 2019) ใช้แหล่งคาร์บอนจากใบทับทิมเป็นสารละลายตัวกลางสังเคราะห์ ทินไดออกไซด์โดยวิธีตกตะกอน เผาที่ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง พบว่าทินออกไซด์มีการเกาะกลุ่มกันขนาดเล็ก โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน 2.96 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีประสิทธิภาพการย่อยเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 24 ชั่วโมง [25] González และคณะวิจัย (ปี 2022) ใช้แหล่งคาร์บอนจากต้นลินผสมในสารละลายในการสังเคราะห์ทินไดออกไซด์ โดยวิธีตกตะกอน หลังจากเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง พบว่าการความเข้มข้นของสารผสมที่มาก มีผลในการลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนโฮล (recombination) โดยพบว่าการผสมสารสกัด 2 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ในชั่วโมงแรกภายใต้แสงยูวี และ 83.5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 180 นาที [26] Honarmand และคณะวิจัย (ปี 2019) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดพุทราผสมในสารละลายตอนสังเคราะห์ทินไดออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน เผาที่ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้แสงอาทิตย์ และเมื่อทดสอบรอบการใช้งาน 4 รอบ พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมลดลงเพียงเล็กน้อย [27] Chinchillas-Chinchillas และคณะวิจัย (ปี 2022) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดเปลือกตะลุมพุก (*Tamilnadia uliginosa*) เป็นสารละลายตัวกลางสังเคราะห์ ZnO และ ทินออกไซด์₂ ด้วยวิธีตกตะกอน หลังจากเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เมื่อทดสอบการย่อยสลายเมทิลีน บลูพบว่าซิงค์ออกไซด์และทินไดออกไซด์มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 100 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 210 นาที ภายใต้แสงยูวี โดยมีช่องว่าง

ระหว่างแถบพลังงานอยู่ที่ 3.8 และ 3.5 อิเล็กตรอนโวลต์ [28] Gomathi และคณะวิจัย (ปี 2021) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดเปลือกกีวีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลต่อปริมาตร ผสมในสารละลายที่ใช้สังเคราะห์ทินไดออกไซด์ โดยวิธีตกตะกอน พบว่าหลังจากเผาที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.96 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 45 นาโนเมตร และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ 89 เปอร์เซ็นต์ เมทิลออเรนจ์ 87 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 8 นาที และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายโรดามีนบีได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 6 นาที [29] Fatimah และคณะวิจัย (ปี 2020) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดดอกอัญชัน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลต่อปริมาตร ผสมในสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์ทินไดออกไซด์ ด้วยวิธีตกตะกอนแล้วเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อย่อยสลายโรดามีนบี ภายใต้แสงยูวี พบขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 7 นาโนเมตร โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น จาก 3.54 เป็น 3.66 อิเล็กตรอนโวลต์ และพื้นที่ผิวของทินออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากดอกอัญชัน มากกว่า 2 เท่า และประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมยั้งดีกว่าไม่ใช้สารสกัดจากดอกอัญชันถึง 30 เปอร์เซ็นต์ [30] I. Buniyamin และคณะวิจัย (ปี 2021) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดใบต้นกาญูการู เป็นสารละลายตัวกลางสังเคราะห์ทินไดออกไซด์ โดยวิธีตกตะกอน พบว่าหลังจากเผาที่ 700 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง แล้วทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลูมีประสิทธิภาพ 83 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 70 นาที ภายใต้แสงยูวีและ 80 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ [31] Wicaksono และคณะวิจัย (ปี 2020) ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารสกัดผักโขมแดงผสมในสารละลายที่ใช้สังเคราะห์ทินไดออกไซด์โดยวิธีตกตะกอน พบว่าหลังจากเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ทินไดออกไซด์มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเป็น 3.52 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อทดสอบการย่อยสลายโบรโมฟีนอลบลู พบว่าประสิทธิภาพ อยู่ที่ 96.04 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 180 นาที ภายใต้แสงยูวี [32] Baoyan Liang และคณะวิจัย (ปี 2018) พบว่าการสังเคราะห์ทินออกไซด์โดยการเผาที่ 225 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์เท่ากับ 98.3 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 40 นาที ภายใต้แสงช่วงที่ตามองเห็น เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานต่ำที่สุดคือ 1.40 อิเล็กตรอนโวลต์ [22] Wenxiu LIU และคณะวิจัย (ปี 2018) ได้ทำการสังเคราะห์ทินออกไซด์โดยเปลี่ยนจากน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายเป็นเอทานอล พบว่าขนาดอนุภาคของทินออกไซด์ลดจาก 4 ถึง 10 ไมโครเมตร เหลือเพียง 1 ถึง 2 ไมโครเมตร และความหนาของแผ่นผลึกทินออกไซด์ลดจาก 200 ถึง 500 นาโนเมตร เหลือ 20 ถึง 30 นาโนเมตร แต่มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเป็น 3.12 อิเล็กตรอนโวลต์ เทียบกับการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายคือ 2.88 อิเล็กตรอนโวลต์ [33]

Yuwei Chen และคณะวิจัย (ปี 2021) ได้ทำการดัดแปลงผิวของทินไดออกไซด์ด้วยไนโตรเจน และคาร์บอนดอท 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน บีได้จาก 20.1 เป็น 99.0 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงช่วงที่ตามองเห็นได้ในเวลา 120 นาที และลดช่องว่างระหว่างแถบพลังงานจาก 3.31 เป็น 3.14 อิเล็กตรอนโวลต์ [23] Hui Zhang และคณะวิจัย (ปี 2016) ได้ดัดแปลงพื้นผิว $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ด้วยคาร์บอนดอท 0.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายฟีนอล ดีซีน 3.7 เท่า หรือภายใน 200 นาที ภายใต้แสงที่ตามองเห็น เมื่อเทียบกับ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ เพียงอย่างเดียวซึ่งย่อยสลายได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากคาร์บอนดอทที่ใช้ดัดแปลงผิวทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นได้ [34] Zhijie Xie และคณะวิจัย (ปี 2018) ได้ทำการดัดแปลงผิวของ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ และ $\text{MoO}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$ ด้วยคาร์บอนดอท 0.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเตตระไฮดรอกซีควิโนนภายใต้แสงที่ตามองเห็นภายใน 90 นาที ดีซีน 46.2 และ 3.5 เท่า ตามลำดับ เทียบกับตัวเร่งที่ไม่ได้ดัดแปลงพื้นผิว [35]



บทที่ 3

เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่อง X-ray diffraction spectroscopy ยี่ห้อ Malvern Panalytical รุ่น Aeris
- เครื่อง Field emission scanning electron microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (FE-SEM/EDS) ยี่ห้อ Tescan รุ่น Mira3
- เครื่อง Dynamic Light Scattering Nano-Particle Size Analyzer (DLS) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Nano ZS
- เครื่อง UV-visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis) รุ่น Shimadzu UV 2600i
- เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Frontier
- เครื่อง Transmission electron microscope (TEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM3100F
- เครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น TriStar II 3020
- เครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ยี่ห้อ Axis Ultra รุ่น DLD
- เครื่องไมโครเวฟ ยี่ห้อ Samsung รุ่น MS23F300EEK
- หลอดยิวี่ ยี่ห้อ EVE รุ่น BLB 18 W

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- บีกเกอร์ขนาด 50 100 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- ขวดปริมาตรขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
- ตะแกรงใส่หลอดทดลอง
- ปีเปตขนาด 1 3 5 และ 50 มิลลิลิตร

- แท่งแก้วคนสาร

- กระจกบอทดวง

- หลอดหยดสาร

- ไมโครปิเปต

- เครื่องกวนสาร

- ตู้อบแห้ง

- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

- ขวดแก้วสังเคราะห์สาร 100 มิลลิลิตร

- หลอดทดลอง

- เครื่องปั่นเหวี่ยง

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- Tin(II) chloride dihydrate ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (AR grade, Kemaus)

- Sodium hydroxide (NaOH) (AR grade, Kemaus)

- Methylene blue ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) (AR grade, Carlo Erba)

- 1,4 – Benzoquinone (Acros organic)

- Tert-butyl alcohol (t-butanol) (Fluka chemika)

- Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) (Fluka)

- เครื่องต้มยี่ห้อซี-วิท (C-Vitt) มีส่วนประกอบเป็นน้ำตาล 11 เปอร์เซ็นต์ น้ำมะนาว (จากน้ำมะนาวเข้มข้น) 6 เปอร์เซ็นต์ และวิตามินซี 0.06 เปอร์เซ็นต์

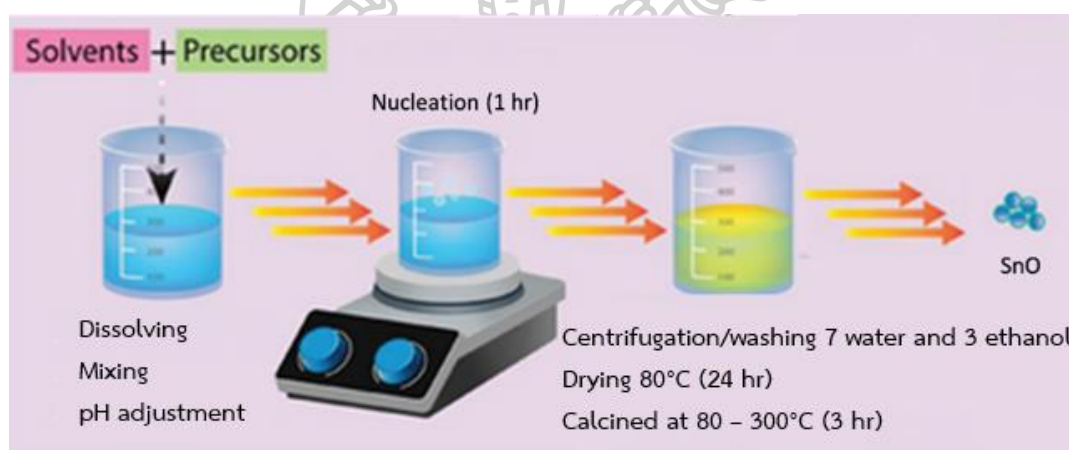
- Hydrogen peroxide (H_2O_2) 50 % (W/W) (Standard grade, Thai peroxide)

- น้ำกลั่น

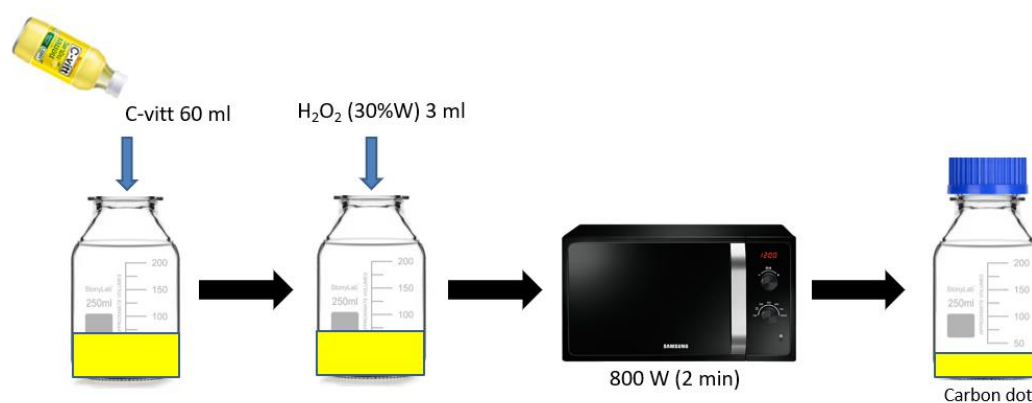
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การสังเคราะห์ทินออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน

การเตรียมทินออกไซด์ทำได้โดยชั่งทินคลอไรด์ไดไฮเดรต 2.256 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก 3 นาที แล้วหยดโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร จนได้ค่า pH เท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 ภายในเวลา 10 นาที จากนั้นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงให้ตกตะกอน แล้วนำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น 7 รอบ และเอทานอล 3 รอบ ก่อนที่จะนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำมาบดให้ละเอียด จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเพื่อหาเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ดีที่สุด นำทินออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด เพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิเผาเป็น 100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ SnO



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ CDs

3.4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

การสังเคราะห์คาร์บอนดอท (CDs) ทำได้โดยนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในเครื่องตีมีซี-วิท ปริมาตร 35 มิลลิลิตร แล้วใส่ในตู้ไมโครเวฟ ใช้กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที เมื่อปั่นเหวี่ยง 5 นาที แล้วแยกตะกอนออกจะได้สารละลายคาร์บอนดอท ดังแสดงในภาพที่ 3

3.4.3 การสังเคราะห์สารผสมระหว่างทินออกไซด์และคาร์บอนดอท

การสังเคราะห์สารผสมระหว่างทินออกไซด์และคาร์บอนดอททำได้โดยนำทินออกไซด์ 0.4 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร หยดสารละลายคาร์บอนดอทความเข้มข้น 63.84 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.063 0.16 และ 0.33 มิลลิลิตร หรือ 1 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ตามลำดับ จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก 2 ชั่วโมง แยกตะกอนออกโดยใช้เครื่องเหวี่ยง 5 นาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น 20 ชั่วโมง เมื่ออบให้ละเอียดจึงได้สารผสมคาร์บอนดอทในอัตรา 1 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล

3.5 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของทินออกไซด์

3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ

ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของทินออกไซด์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD, X-ray diffraction spectroscopy, Malvern Panalytical, Aeris model) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นทองแดง ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร ทดสอบที่มุม 20 – 80 องศา คำนวณขนาดผลึกด้วยสมการเชอร์เรอร์

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (14)$$

โดย	K	คือ	ค่าคงที่ของรูปร่างซึ่งใช้ค่าประมาณ 0.9
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดสอบ ประมาณ 0.154 นาโนเมตร
	β	คือ	ความกว้างของพีค ณ ความสูงครึ่งหนึ่ง (full width half maximum, FWHM) หน่วยองศาเรเดียน
	θ	คือ	มุมของแบร็ก หน่วยองศา

3.5.2 การตรวจสอบลักษณะรูปร่างและวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

ศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM, field emission scanning electron microscope, Tescan Mira 3 model) และเครื่อง TEM (Transmission electron microscope, JEOL/ JEM3100F) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray analysis)

3.5.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy, PerkinElmer, Frontier) และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่พื้นผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X – ray photoelectron spectroscopy, Axis Ultra DLD)

3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสง

ทดสอบดูดกลืนแสงในช่วงยูวีจนถึงแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectroscopy, Orion Aquamate 8000) ศึกษาช่องว่างระหว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องวัดการสะท้อนกระจายของแสงยูวีและแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ (UV-visible diffuse reflectance spectroscopy, Shimadzu UV-2600i) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่ทินออกไซด์ดูดกลืนคำนวณหาช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน [36] ตามสมการของพลังค์

$$E_g = \frac{hc}{e\lambda_{onset}} \approx \frac{1240}{\lambda_{onset}} \quad (15)$$

โดย	E_g	คือ	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์
	λ_{onset}	คือ	ความยาวคลื่นที่ทินออกไซด์ดูดกลืน หน่วยนาโนเมตร
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ ประมาณ 6.626×10^{-34} จูลวินาที
	c	คือ	ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที
	e	คือ	ประจุอิเล็กตรอน ประมาณ 1.6×10^{-19} คูลอมป์

3.5.5 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาค

ศึกษาการกระจายตัวของกลุ่มอนุภาคที่จับตัวกันของทินออกไซด์ด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering Nano-Particle Size Analyzer (DLS) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Nano ZS

3.5.6 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน

ตรวจสอบพื้นที่ผิวโดยการดูดซับก๊าซด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น TriStar II 3020

3.6 การย่อยสลายสีย้อม

3.6.1 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น 15 ส่วนในล้านส่วน หรือประมาณ 4.69×10^{-5} โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ทินออกไซด์จำนวน 0.05 กรัม แล้วกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กในที่มีด 60 นาที เพื่อให้ผิวของทินออกไซด์อิ่มตัวจากการดูดซับสีย้อม จากนั้นคำนวณค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม ($\%C/C_0$) ภายใต้แสงยูวีโดยการเก็บสารละลายตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร ทุก 10 นาที เพื่อหาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมจากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ที่วัดด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\%C/C_0 = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (16)$$

และค่าคงที่การย่อยสลายสีย้อม (k) คำนวณได้จากสมการ

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad (17)$$

โดยที่ C_0 และ C คือ ความเข้มข้นของสีย้อมก่อนเริ่มทำการทดลอง และความเข้มข้น ณ เวลา t ใด ๆ ในหน่วยนาที

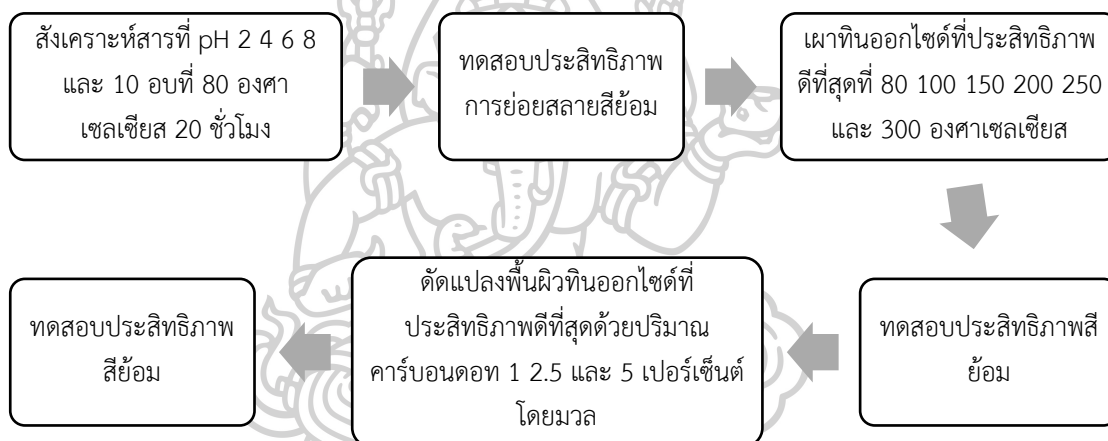
3.6.2 การทดสอบปริมาณอนุมูลที่เกิดขึ้น

การทดสอบปริมาณของอนุมูลในทินออกไซด์ทำได้โดย เตรียมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 4.69×10^{-5} โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วใส่ทินออกไซด์ 0.05 กรัม จำนวน 4 บีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่น เบนโซควิโนน บิวทานอล กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เพื่อเป็นการอ้างอิง และจับอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) อนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot OH$) และไฮล (h^+)

ตามลำดับ แล้วกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กในที่มีด 60 นาที หลังจากฉายแสงยูวี สุ่มเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 ถึง 5 มิลลิลิตร ทุก 10 นาที เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่ลดลงโดยพิจารณาที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.6.3 ประสิทธิภาพการใส่ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมซ้ำทำได้โดย นำทินออกไซด์ที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมแล้วมาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน จากนั้นอบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมซ้ำ ซึ่งแผนภาพขั้นตอนการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภาพขั้นตอนการทดลองทั้งหมด

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

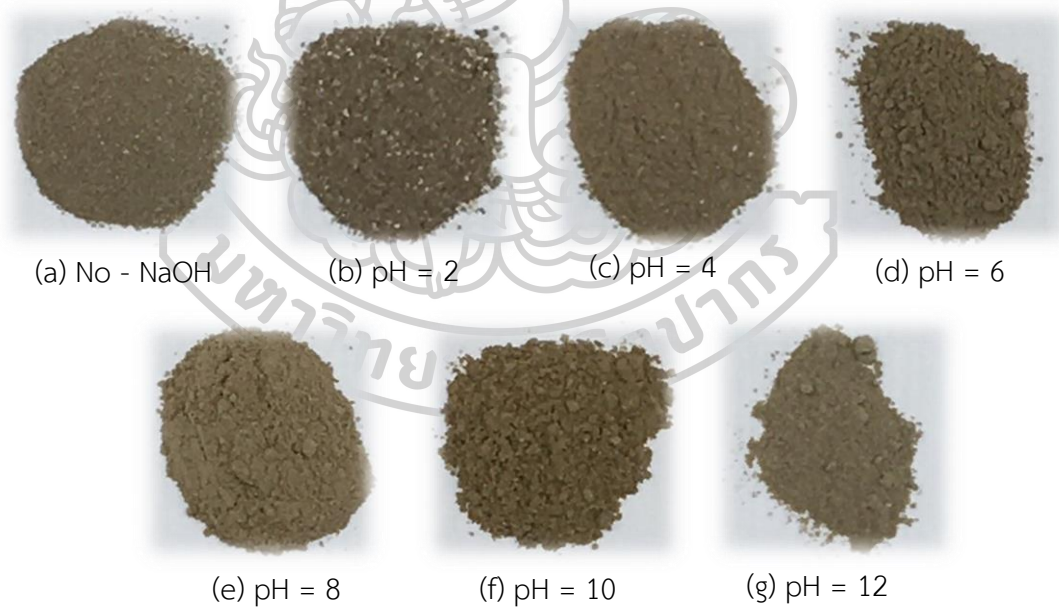
4.1 การสังเคราะห์ทินออกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน

การสังเคราะห์สารโดยปรับเปลี่ยนค่า pH ของสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ pH เท่ากับ 2 ถึง 12 พบลักษณะของทินออกไซด์แสดงในภาพที่ 5 และจากภาพที่ 5 พบว่าเมื่อไม่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยา พบว่าทินออกไซด์จะมีสีค่อนข้างขาวเนื่องจากเฟสขององค์ประกอบเป็นทินไฮดรตค่อนข้างมาก เพราะมีไฮดรอกไซด์ไอออนไม่มากพอในการทำปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน แต่เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จน pH เป็น 2 พบว่าสีของทินออกไซด์เป็นสีเทา และที่ pH เท่ากับ 4 ทินออกไซด์มีสีดำแสดงถึงเฟสหลักของทินออกไซด์ที่มีสีดำ ที่ pH สูงขึ้นทินออกไซด์จะมีเฟสของทินออกไซด์น้อยลงเนื่องจากสีจางลง [37] เหตุผลเพราะเมื่อหมู่ไฮดรอกไซด์จากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากเกินไปจะทำให้ทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นทินออกไซด์ได้เร็ว จึงเป็นทินไดออกไซด์ได้เร็วเช่นกัน และอีกเหตุผลหนึ่งคือหมู่ไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่มากทำให้ทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นทินออกไซด์ได้น้อย ทินออกไซด์ที่ pH ตั้งแต่ 6 ขึ้นไปจึงเริ่มมีสีออกขาวซึ่งเป็นสีของทินไดออกไซด์และทินไฮดรอกไซด์ ภาพที่ 6 แสดงลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์โดย (a) ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (b) pH เท่ากับ 2 (c) pH เท่ากับ 4 (d) pH เท่ากับ 6 (e) pH เท่ากับ 8 (f) pH เท่ากับ 10 และ (g) pH เท่ากับ 12 และเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าสีของทินออกไซด์ออกไปทางสีเทาดำทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของทินไฮดรตซึ่งมีสีขาว ไปเป็นเฟสของทินออกไซด์และทินไดออกไซด์เนื่องจากอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้น แต่ไม่สูงพอที่จะทำให้ทินออกไซด์เปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ได้ทั้งหมด ในภาพที่ 7 แสดงลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 โดย (a) ไม่เผา และเผาที่ (b) 100 (c) 150 (d) 200 (e) 250 และ (f) 300 องศาเซลเซียส พบทินออกไซด์มีสีเทาดำผสมกันแสดงถึงเฟสผสมกันของทินไฮดรตทินออกไซด์และทินไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของหินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผา



ภาพที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของหินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยผ่านการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส



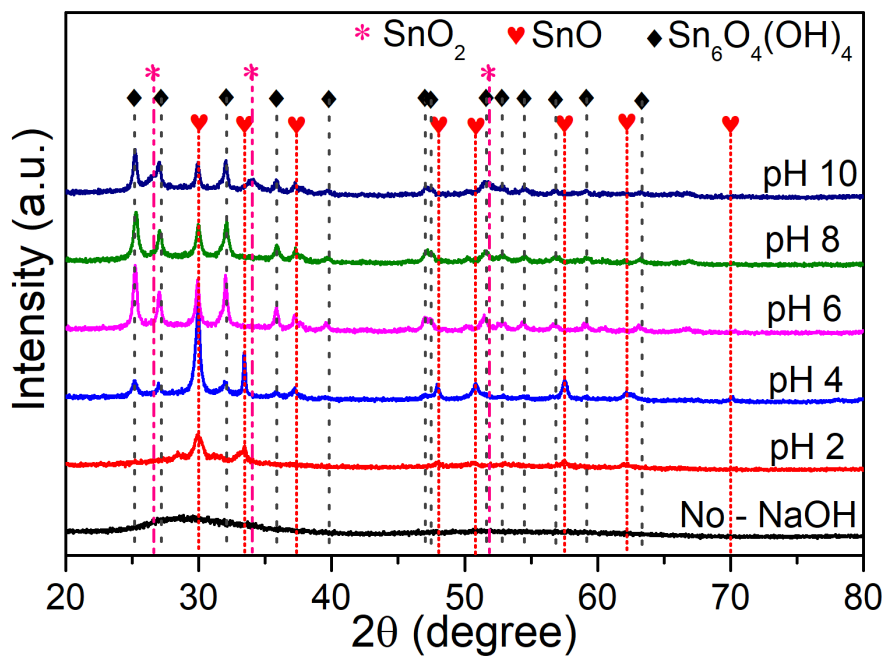
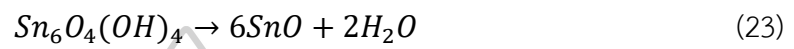
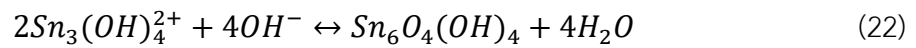
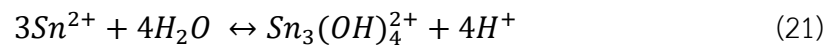
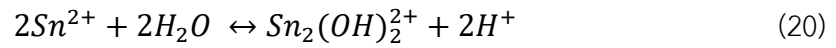
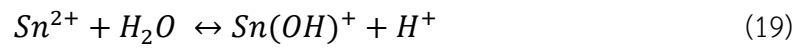
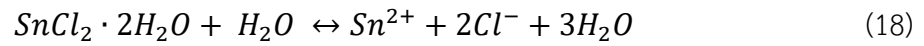
ภาพที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของหินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของหินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน

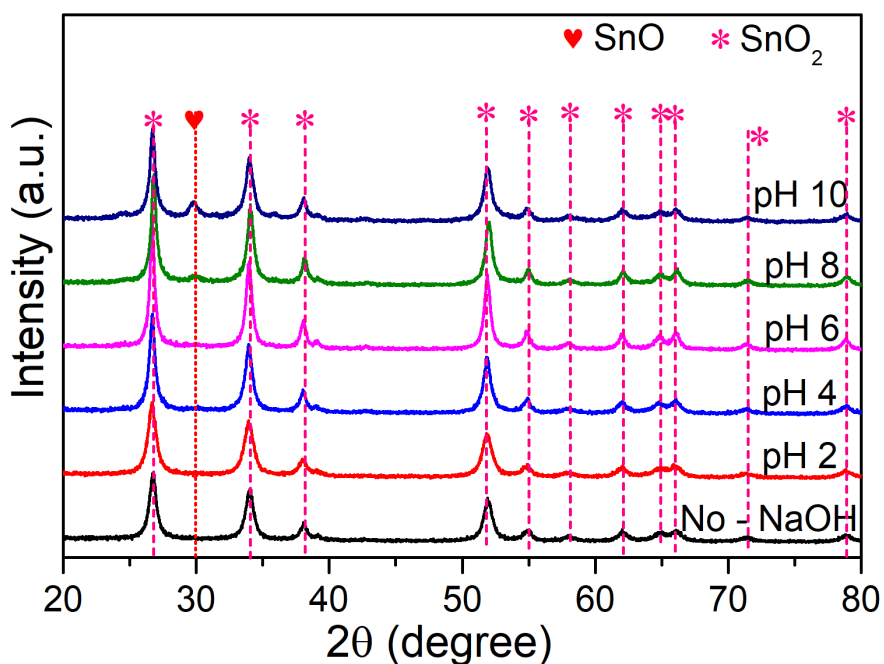
ผลการวิเคราะห์หินออกไซด์ในแต่ละ pH ด้วยเครื่อง XRD โดยไม่ผ่านการเผาแสดงในภาพที่ 8 พบว่าถ้าไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์หินออกไซด์ที่ได้มีลักษณะออสถฐาน เนื่องจากไม่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ในสารละลายมากพอในการเกิดหินออกไซด์ จึงคงเหลือไว้แต่เฟสของหินไฮดรต แต่เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จนสถานะของสารละลายมีค่า pH ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปพบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 2θ 29.86 33.29 31.13 47.79 50.72 57.38 62.03 และ 69.90 องศา แสดงถึงระนาบ (101) (110) (002) (200) (112) (211) (202) และ (220) ตามลำดับ ตรงกับ JCPDS 72 – 1012 [38] ระบุว่าเป็นหินออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล และที่มุม 25.18 26.97 31.97 35.79 39.57 46.98 47.43 51.51 52.93 54.41 56.80 59.10 และ 63.14 องศา แสดงถึงระนาบ (112) (211) (212) (310) (004) (313) (214) (420) (332) (314) (215) (501) และ (512) ตามลำดับ ระบุว่าเป็นหินไฮดรตที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ซึ่งตรงกับ JCPDS 46 – 1486 [39] ซึ่งผลเป็นไปตามสมการที่ (19) ถึง (22) [40] ส่งผลให้ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของเฟสหินออกไซด์โดยสมการเชอร์เรอร์เท่ากับ 22.01 19.08 และ 18.67 นาโนเมตร ซึ่งเล็กลงตามลำดับเนื่องจากสมมูลของปฏิกิริยาดังที่กล่าวมา ตั้งแต่ที่ pH เท่ากับ 8 และ 10 ขนาดอนุภาคจะเริ่มใหญ่ขึ้นเป็น 30.67 และ 35.77 นาโนเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกไซด์จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น เมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะเบส

จะมีเฟสของทินไฮดรอกไซด์มากขึ้น ทำให้เกิดเฟสของทินออกไซด์มากขึ้นตามไปด้วย และเฟสของทินออกไซด์บางส่วนจะเริ่มเปลี่ยนเป็นเฟสของทินไดออกไซด์ตามสมการที่ (23) ถึง (25) [41] โดยพิจารณาจากมุม 26.61 33.89 และ 51.78 แสดงถึงระนาบ (110) (101) และ (211) ตามลำดับ ตรงกับ JCPDS 41 – 1445 [42] ระบุว่าเป็นทินไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล

ภาพที่ 8 แสดง XRD ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยผ่านการเผาที่ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบเฟสของทินไดออกไซด์โครงสร้างผลึกเตตระโกนอลจาก JCPDS 41 – 1445 ในทุกเงื่อนไขการสังเคราะห์ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น [43] แต่ที่ pH เท่ากับ 8 และ 10 พบเฟสของทินออกไซด์ตาม JCPDS 72 – 1012 ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปในกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้มีเฟสของทินไฮดรอกไซด์อยู่มาก ทำให้พลังงานจากการเผาไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนเฟสทินออกไซด์เป็นทินไดออกไซด์ทั้งหมด จึงเหลือผลึกของเฟสทินออกไซด์อยู่เล็กน้อยที่ pH เท่ากับ 8 และมากขึ้นเมื่อ pH เป็น 10 ขนาดผลึกของเฟสทินไดออกไซด์ในเงื่อนไขทินออกไซด์ที่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามสมการเซอร์เรอร์เป็น 13.75 นาโนเมตร แต่ทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 มีขนาดผลึกเฉลี่ยเป็น 12.01 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเนื่องจากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของทินออกไซด์ในเฟสของทินออกไซด์แยกเป็นเกรนได้ชัดขึ้น จึงมีพื้นที่สัมผัสความร้อนจากการเผาได้มากขึ้น ทินไฮดรอกไซด์จึงเปลี่ยนเฟสเป็นทินออกไซด์และทินไดออกไซด์ได้ง่ายกว่าในเงื่อนไขที่ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 4 และ 6 จะมีขนาดผลึกของเฟสทินไดออกไซด์ใหญ่ขึ้น เป็น 16.71 และ 24.35 นาโนเมตร เนื่องจากในการสังเคราะห์มีปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่มากกว่า จึงเกิดหมู่ไฮดรอกไซด์จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากกว่า ทำให้ทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นทินออกไซด์มากและสมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นเฟสของทินออกไซด์จึงมีพื้นที่สัมผัสความร้อนมากตั้งแต่เริ่มเผา และความร้อนจากการเผาสามารถทำให้ผลึกโตขึ้นได้โดยไม่เสียพลังงานมากเท่ากับทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 และที่ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการเปลี่ยนเฟสทินไฮดรอกไซด์ที่เหลือเป็นทินออกไซด์ก่อนแล้วจึงเป็นทินไดออกไซด์ ส่วนทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 10 ขนาดผลึกจะเริ่มลดลงอยู่ที่ 19.38 และ 18.94 นาโนเมตร เนื่องจากหมู่ไฮดรอกไซด์จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่างปฏิกิริยาดกตะกอนร่วม ทำให้เกิดเฟสของทินไฮดรอกไซด์มากขึ้นตามสมการที่ (22) จึงส่งผลให้การเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ตามสมการที่ (23) ถึง (25) เป็นไปได้ช้าลง ทำให้ขนาดผลึกเฉลี่ยเล็กลง โดยในตารางที่ 1 แสดงขนาดผลึกโดยเฉลี่ยของทินออกไซด์แต่ละเงื่อนไข



ภาพที่ 8 XRD ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผา



ภาพที่ 9 XRD ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH ผ่านการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส

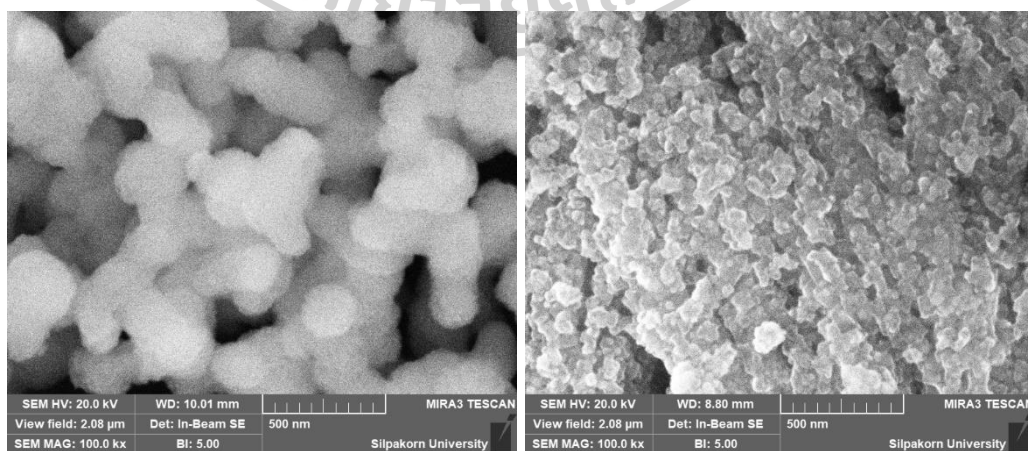
ตารางที่ 1 ขนาดผลึกโดยเฉลี่ยคำนวณจากสมการเชอร์เรอร์ของทินออกไซด์แต่ละเงื่อนไข

ทินออกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ	ขนาดผลึกที่คำนวณได้ (นาโนเมตร)	
	ไม่เผา	เผาที่ 400 องศาเซลเซียส
No - NaOH	อสังฐาน	13.75
pH = 2	22.01	12.01
pH = 4	19.08	16.71
pH = 6	18.67	24.35
pH = 8	30.67	19.38
pH = 10	35.77	18.94

4.1.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน

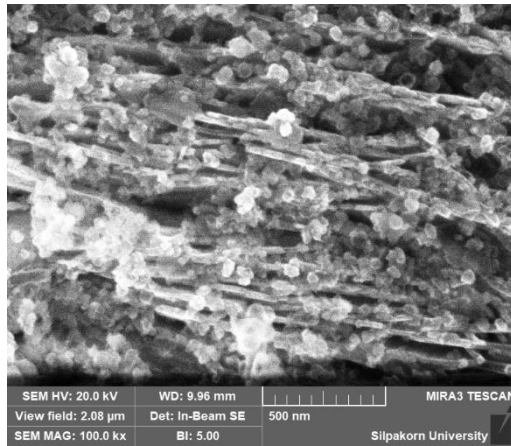
ภาพที่ 13 (a) แสดง SEM กำลังขยาย 100,000 เท่า จะสังเกตเห็นอนุภาคของทินไฮดรอกไซด์เด่น และภาพที่ 10 (b) แสดงเฟสของทินออกไซด์ที่มีลักษณะคล้ายแผ่นขนาดเฉลี่ยประมาณ 39.4 นาโนเมตร เกะกอนกัน โดยมีเฟสของทินไฮดรอกไซด์ปนอยู่น้อยที่สุด และมากขึ้นในทินออกไซด์ pH เท่ากับ 4 ดังแสดงในภาพที่ 10 (c) ซึ่งมีลักษณะของความพรุนตัวมากที่สุด จากภาพที่ 11 (a) แสดง SEM กำลังขยาย 100,000 เท่า ของทินออกไซด์ที่ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 องศา

เซลเซียส พบว่าทินออกไซด์มีลักษณะอนุภาคของทินไดออกไซด์ที่ผิวเชื่อมติดกันที่ผิว เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จนได้ pH เป็น 2 และ 4 ดังภาพที่ 11 (b) และ 11 (c) ตามลำดับ พบว่าลักษณะของทินออกไซด์มีความพรุนหลังการเผาค่อนข้างมาก เนื่องจากก่อนเผาทินออกไซด์มีเฟสของทินออกไซด์เป็นแผ่นเกาะกันเป็นทรงกลม เมื่อเผาแล้วส่วนที่สัมผัสกับความความร้อนจะเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคนาโนเมตรอัดกันแน่น จึงทำให้ทินออกไซด์มีลักษณะดังที่เห็น เมื่อทินออกไซด์มี pH เท่ากับ 6 ในภาพที่ 11 (d) จะเริ่มมีลักษณะแน่นขึ้นเนื่องจากก่อนการเผาทินออกไซด์มีลักษณะเป็นผลึกเล็ก ๆ ทำให้เมื่อทินออกไซด์สัมผัสกับความความร้อนแล้วเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ที่มีลักษณะแน่นขึ้น ส่วนภาพที่ 11 (e) และ 11 (f) มีลักษณะเป็นอนุภาคชัดเจนและมีเฟส ส่วนที่มีลักษณะเป็นแผ่นคือเฟสทินออกไซด์ตาม XRD เนื่องจากก่อนการเผามีเฟสของทินไฮดรอกไซด์ค่อนข้างมาก จึงทำให้เมื่อเผาแล้วไม่สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ได้ทั้งหมด เนื่องจากทินไฮดรอกไซด์ต้องเปลี่ยนเป็นทินออกไซด์ก่อน จึงเปลี่ยนเป็นทินไดออกไซด์ได้ เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่ไม่ผ่านการเผาจาก EDS ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าอัตราส่วนของ Sn : O จะน้อยลงตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในสารละลายสภาวะกรดหมู่ไฮดรอกไซด์ที่มาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากอนเดนเซชันกับทินไฮดรอกไซด์เกิดเป็นทินออกไซด์ และเมื่อไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้นจะเกิดเป็นทินไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในสารละลายสภาวะเบสสังเกตจากผลการทดลองที่ pH เท่ากับ 8 ขึ้นไปจะมีองค์ประกอบของออกซิเจนมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH เผาที่ 400 องศาเซลเซียส พบว่าออกซิเจนมากขึ้นในทุกเงื่อนไข pH เนื่องจากอุณหภูมิจากการเผาทำให้ทินออกไซด์เปลี่ยนเฟสจากทินไฮดรอกไซด์เป็นทินออกไซด์และเป็นทินไดออกไซด์ตามลำดับ

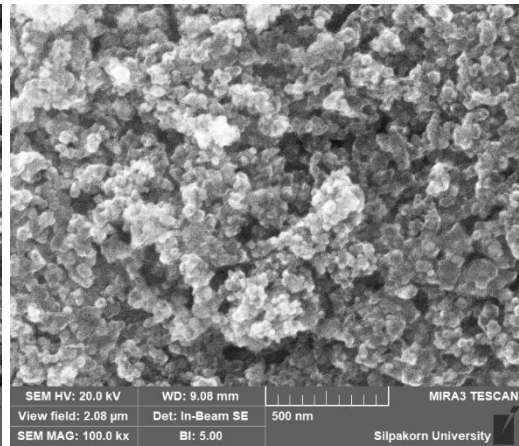


(a) ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

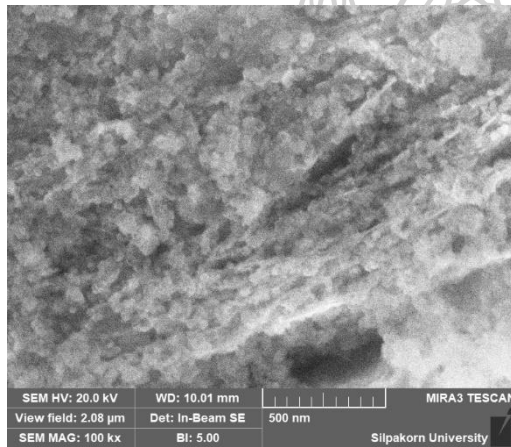
(d) pH 6



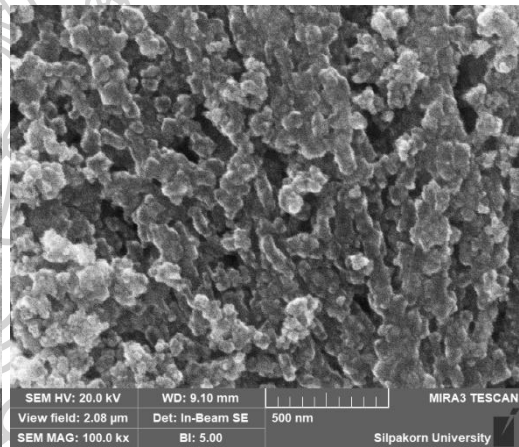
(b) pH 2



(e) pH 8

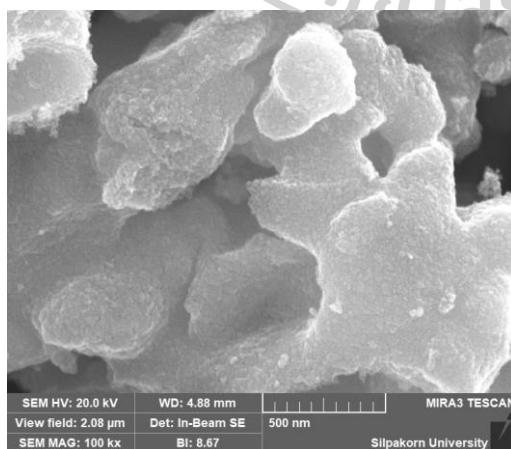


(c) pH 4

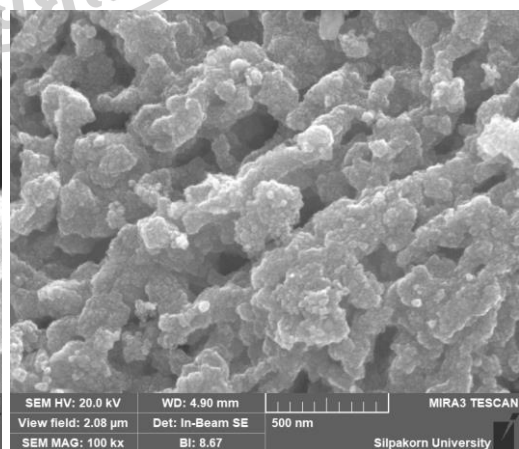


(f) pH 10

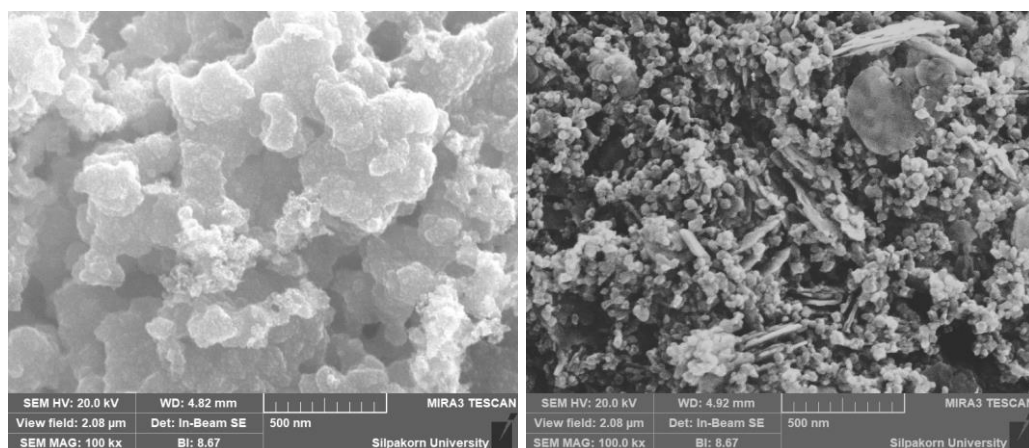
ภาพที่ 10 SEM ของตินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผากำลังขยาย 100,000 เท่า



(a) ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

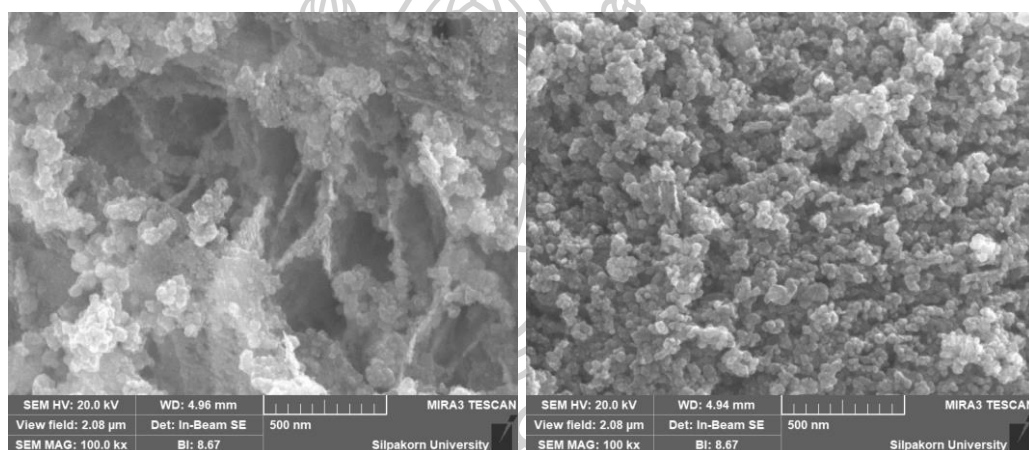


(d) pH 6



(b) pH 2

(e) pH 8



(c) pH 4

(f) pH 10

ภาพที่ 11 SEM กำลังขยาย 100,000 เท่า ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH เภาพที่ 400 องศาเซลเซียส ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่ผ่านการเผา

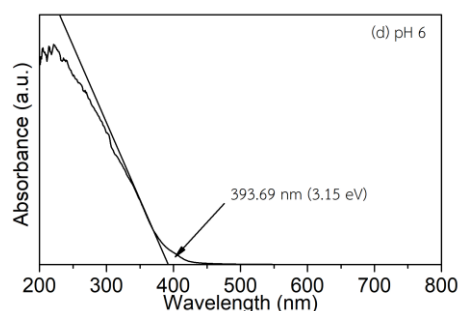
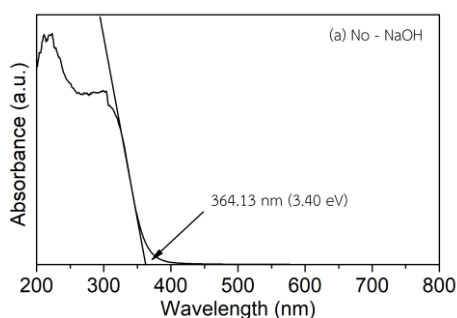
ทินออกไซด์ที่ สภาวะต่าง ๆ	น้ำหนักอะตอม (เปอร์เซ็นต์)					Sn : O
	Sn	O	C	Cl	อะตอมเจือปน	
No - NaOH	37.15	29.13	18.17	12.29	3.26	1 : 0.78
pH = 2	33.16	30.16	23.80	9.83	3.05	1 : 0.91
pH = 4	35.13	36.73	20.36	4.11	3.67	1 : 1.05
pH = 6	34.23	35.67	19.87	6.83	3.40	1 : 1.04
pH = 8	36.67	45.84	12.18	2.34	2.97	1 : 1.25
pH = 10	34.80	44.25	16.75	0.57	3.63	1 : 1.27

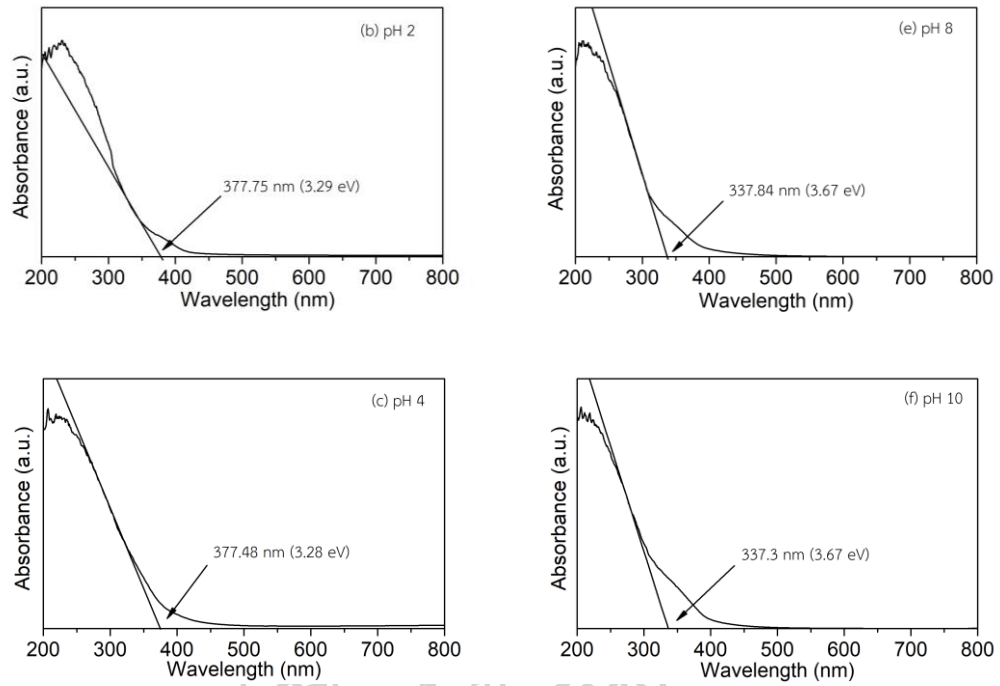
4.1.4 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน

ภาพที่ 12 แสดงความยาวคลื่นซึ่งถูกดูดกลืนโดยทินออกไซด์แต่ละ pH โดยไม่เผา พบว่าค่าความยาวคลื่นที่กระตุ้นอิเล็กตรอนได้มากที่สุด (λ_{onset}) คือที่ pH เท่ากับ 6 pH เท่ากับ 4 pH เท่ากับ 2 และไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีค่าเป็น 394 377 378 และ 364 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณด้วยสมการของพลังค์จะได้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ pH เท่ากับ 10 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานจะมากขึ้นเนื่องจากเกิดเฟสของทินไดออกไซด์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลของ XRD SEM และ EDS ในภาพที่ 13 แสดงการหา λ_{onset} ของทินออกไซด์แต่ละ pH เผาที่ 400 องศาเซลเซียส พบว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 3.55 – 3.64 อิเล็กตรอนโวลต์ [44] เนื่องจากเฟสของทินไดออกไซด์ที่เกิดจากอุณหภูมิเผาซึ่งสอดคล้องกับผล XRD SEM และ EDS เช่นเดียวกัน

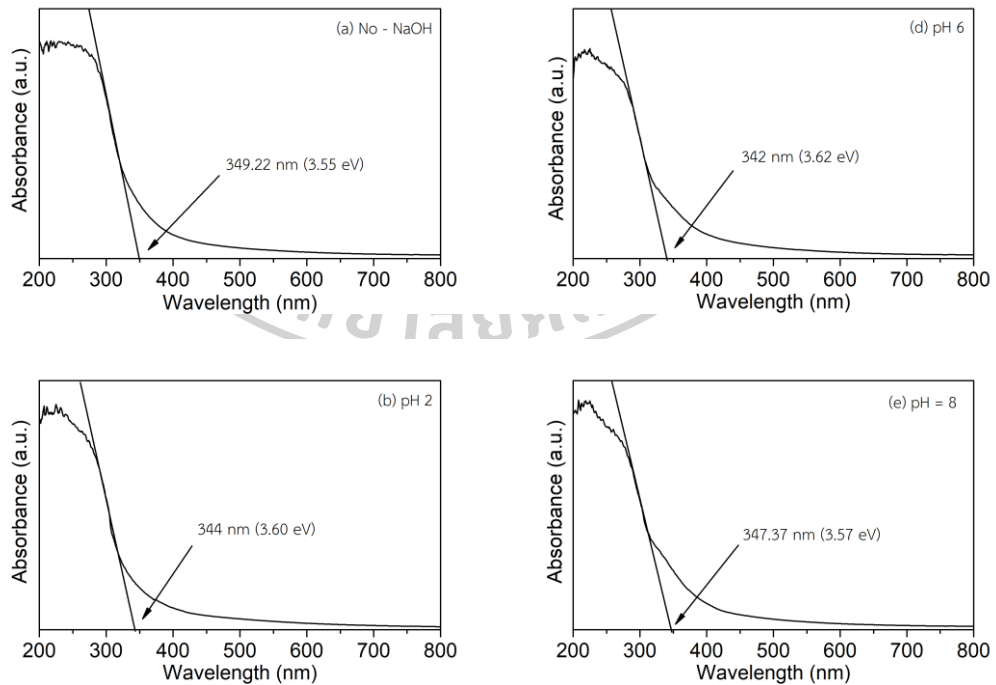
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH เผาที่ 400 องศาเซลเซียส

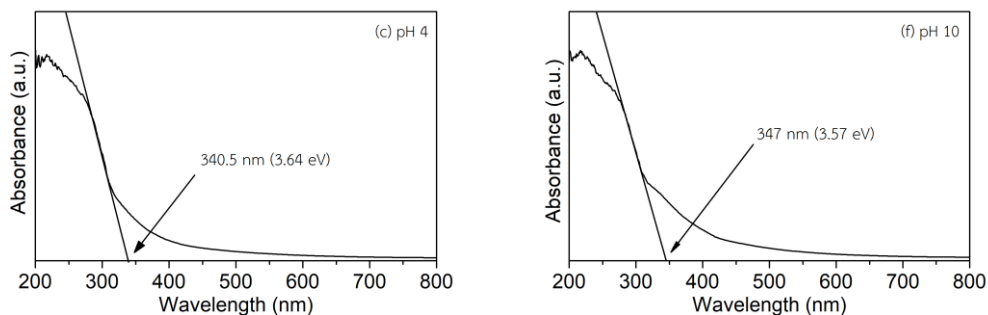
ทินออกไซด์ที่ สภาวะต่าง ๆ	น้ำหนักอะตอม (เปอร์เซ็นต์)					Sn : O
	Sn	O	C	Cl	อะตอมเจือปน	
No – NaOH	42.43	41.19	12.54	1.21	2.63	1 : 0.97
pH = 2	31.63	46.03	17.62	1.32	3.40	1 : 1.45
pH = 4	34.59	45.44	15.05	1.41	3.51	1 : 1.31
pH = 6	36.79	44.95	13.76	1.08	3.51	1 : 1.22
pH = 8	35.33	45.64	14.54	0.86	3.63	1 : 1.29
pH = 10	35.06	35.06	14.59	0.92	4.13	1 : 1.29





ภาพที่ 12 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา





ภาพที่ 13 การหา λ_{onset} ของทिनออกไซด์ที่แต่ละ pH ที่ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.1.5 พื้นที่ผิวของทिनออกไซด์ที่ pH ต่างกัน

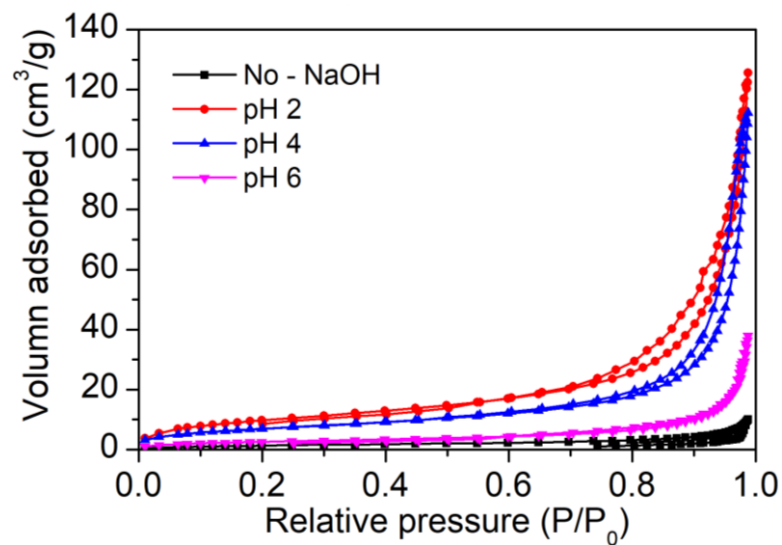
ภาพที่ 14 แสดงกราฟการดูดซับและคายก๊าซไนโตรเจนของทिनออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา ซึ่งเป็นกราฟไอโซเทอมชนิดที่ 4 (type IV) โดยพบว่าพื้นที่ผิวของทिनออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ pH เท่ากับ 4 และ pH เท่ากับ 6 ตามลำดับ รวมถึงขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5 เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ pH สูงขึ้น ในระบบจะมีหมู่ไฮดรอกไซด์ที่มากซึ่งมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันได้เร็วมากขึ้น ผลคือทिनออกไซด์จะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่ชัดเจนและใหญ่ขึ้นตามลำดับ จึงทำให้พื้นที่ผิวน้อยลงตามลำดับ ภาพที่ 15 แสดงการกระจายของขนาดรูพรุนของทिनออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ pH เท่ากับ 2 4 และ 6 พบว่ารูพรุนของทिनออกไซด์ทุกเงื่อนไขการสังเคราะห์มีรูพรุนทั้ง 3 ชนิดอยู่ด้วยกัน คือ รูพรุนขนาดเล็กมีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลางมีขนาด 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

ตารางที่ 4 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทिनออกไซด์ในแต่ละเงื่อนไข

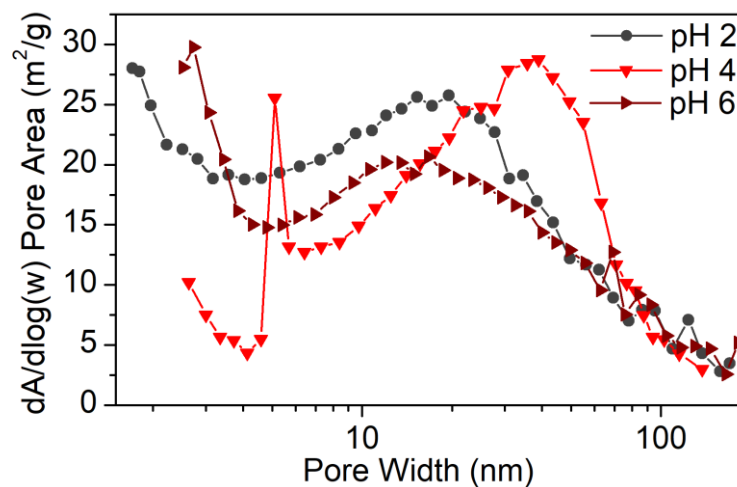
ทिनออกไซด์ที่สถานะต่าง ๆ	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (eV)	
	ไม่เผา	เผาที่ 400 องศาเซลเซียส
No - NaOH	3.40	3.55
pH = 2	3.29	3.60
pH = 4	3.28	3.64
pH = 6	3.15	3.62
pH = 8	3.67	3.57
pH = 10	3.67	3.57

ตารางที่ 5 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของทินออกไซด์

ทินออกไซด์ที่ สภาวะต่าง ๆ	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร ต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม)
pH = 2	36.37	21.4695	0.1908
pH = 4	25.72	27.9185	0.1703
pH = 6	9.62	26.6296	0.0573



ภาพที่ 14 การดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา



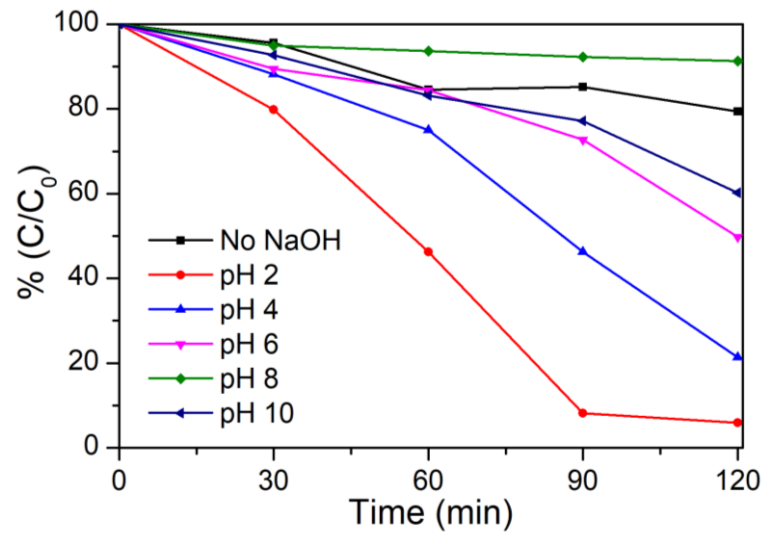
ภาพที่ 15 การกระจายขนาดรูพรุนในทินออกไซด์ที่ pH ต่าง ๆ

4.1.6 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ที่ pH ต่างกัน

ภาพที่ 16 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 150 ส่วนในล้านส่วน ของทินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา พบว่าประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุดรองลงมาคือ pH เท่ากับ 4 และ pH เท่ากับ 6 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ที่ pH 2 ไม่ได้น้อยที่สุด แต่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 และเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวเร่งในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูต่อไป โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่ 120 นาที และร้อยละการดูดซับสีย้อมของทินออกไซด์ในที่มีด 60 นาที แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมในที่มีดและประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมภายใต้แสงยูวีในเวลา 90 นาที

ทินออกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ	การดูดซับสีย้อมในที่มีด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม (เปอร์เซ็นต์)
No - NaOH	8.5	20.6
pH = 2	10.11	94.12
pH = 4	11.61	78.67
pH = 6	10.57	50.25
pH = 8	8.96	8.71
pH = 10	8.39	60.23



ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทัลไอออนของหินออกไซด์ที่แต่ละ pH โดยไม่เผา



ภาพที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของหินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ในแต่ละอุณหภูมิเผา

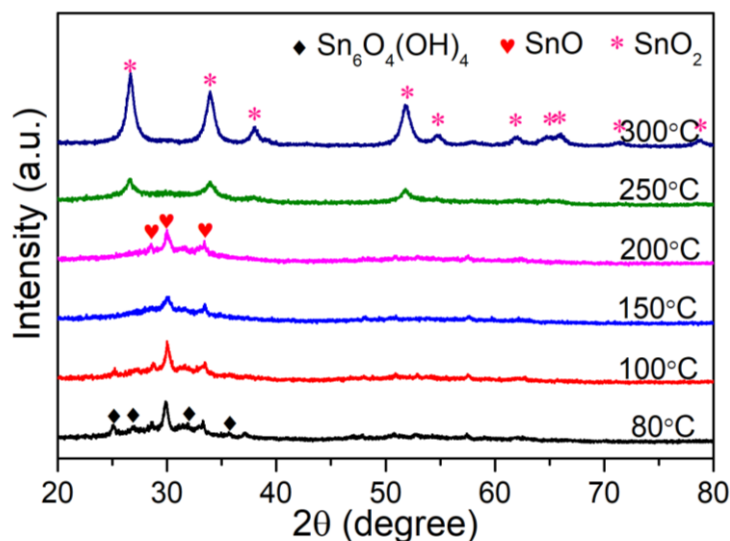
4.2 การสังเคราะห์ SnO ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

ภาพที่ 17 แสดงลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 โดยไม่ผ่านและผ่านการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส พบว่าสีของสารมีลักษณะเป็นสีเทา แสดงให้เห็นว่ามีเฟสของทินไฮดรอกไซด์และทินไดออกไซด์ซึ่งมีสีขาว และทินออกไซด์ที่มีสีดำผสมกันอยู่

4.2.2 โครงสร้างของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

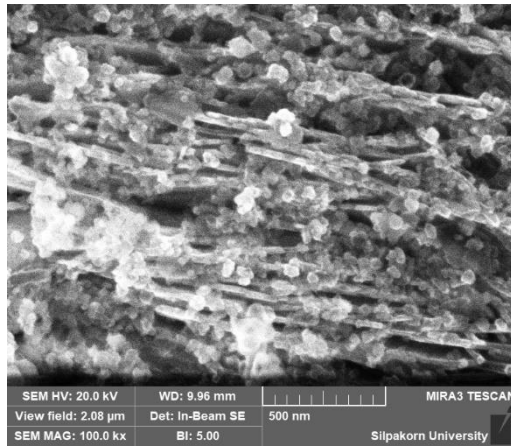
ภาพที่ 18 แสดงรูปแบบ XRD ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ในแต่ละอุณหภูมิเผา พบว่าเมื่อเผาทินออกไซด์ที่ 100 150 และ 200 องศาเซลเซียส เฟสของเตตระโกนอลทินไฮดรอกไซด์ตาม JCPDS 46 – 1486 [39] เปลี่ยนเป็นเฟสเตตระโกนอลทินออกไซด์ตาม JCPDS 72 – 1012 [38] และมากขึ้นตามอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้น เนื่องจากพลังงานความร้อนที่สูงขึ้นทำให้หมู่ไฮดรอกไซด์หลุดออกไปมากขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เฟสของทินออกไซด์มีความเป็นผลึกชัดเจนที่สุดเนื่องจากพลังงานความร้อนที่มากพอ และเมื่ออุณหภูมิเผาถึง 250 องศาเซลเซียส เฟสของทินออกไซด์เริ่มเปลี่ยนเป็นเตตระโกนอลทินไดออกไซด์บางส่วนตาม JCPDS 41 – 1445 [42] และที่ 300 องศาเซลเซียส เฟสของทินไดออกไซด์เป็นผลึกชัดเจนที่สุด ขนาดผลึกโดยเฉลี่ยของทินออกไซด์คำนวณจากสมการของเชอร์เรอร์จากทินออกไซด์ที่ไม่ถูกเผามีค่า 22.01 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับทินออกไซด์ที่เผา 100 องศาเซลเซียส คือ 22.60 นาโนเมตร เมื่อเผาทินออกไซด์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ขนาดผลึกของทินออกไซด์จะเล็กที่สุด คือ 12.27 นาโนเมตร เนื่องจากเฟสของทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นเฟสของทินออกไซด์แล้ว และผลึกของทินออกไซด์ใหญ่ขึ้นเป็น 19.51 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิเผาถึง 200 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ผลึกโตขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเผาถึง 250 องศาเซลเซียส จะเกิดเฟสของทินไดออกไซด์ขึ้นโดยมีขนาดผลึกเท่ากับ 11.68 นาโนเมตร และโตขึ้นเป็น 12.01 นาโนเมตร เมื่อเผาที่ 300 องศาเซลเซียส สาเหตุที่ผลึกทินไดออกไซด์เล็กกว่าทินออกไซด์เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสเกิดที่ผิวของทินออกไซด์



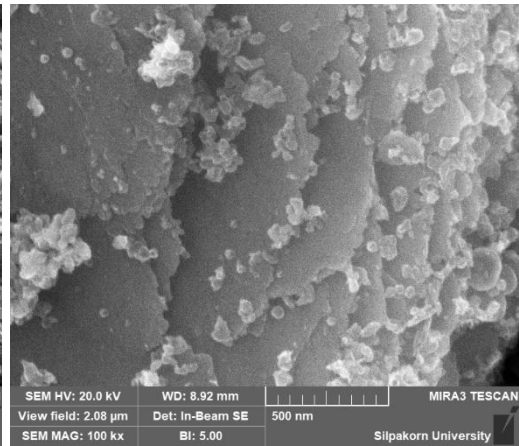
ภาพที่ 18 XRD ของทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

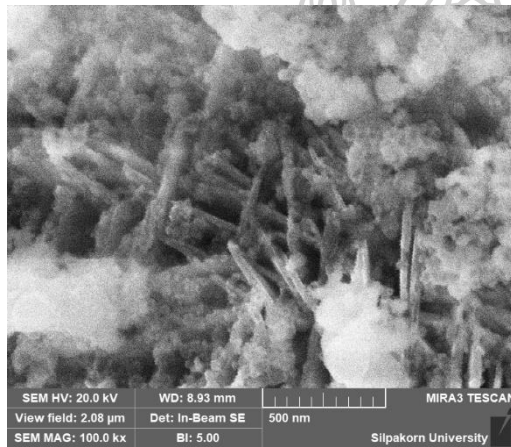
ภาพถ่าย SEM ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 กำลังขยาย 100,000 เท่า สังเกตเห็นเฟสของความพรุนตัวของอนุภาคทินออกไซด์อย่างชัดเจนในอุณหภูมิการเผา 100 และ 150 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 19 (b) และ 19 (c) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงพื้นที่ผิวที่มาก แต่เมื่อเผาที่ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 19 (d) 19(e) และ 19 (f) ผิวของทินออกไซด์จะมีลักษณะแน่น รูปพรุน และพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากอนุภาคของทินไดออกไซด์ [42] ที่มีลักษณะคล้ายทรงกลมและเกิดที่ผิวของทินออกไซด์ ผลการทดสอบ EDS พบว่าอัตราส่วนร้อยละของอะตอมออกซิเจนต่อทินของทินออกไซด์ที่ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกัน และมากขึ้นใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิเผา 150 และ 200 องศา แสดงถึงเฟสที่ใกล้เคียงกัน และการเปลี่ยนเฟสจากทินไฮดรอกไซด์เป็นทินออกไซด์ ที่อุณหภูมิเผา 250 และ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนออกซิเจนต่อทินสูงที่สุดและใกล้เคียงกัน แสดงถึงการเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์มากขึ้น ซึ่งข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 7 ในภาพที่ 20 แสดง TEM ของทินออกไซด์ที่ pH 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคของทินออกไซด์รูปแบบก้อนกลมขนาด 2.8 ถึง 8.8 ไมโครเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมออกซิเจนและทินโดยมีอัตราส่วน 1.89 ต่อ 1 แสดงถึงเฟสผสมระหว่างทินออกไซด์ที่มีอัตราส่วนเป็น 1 ต่อ 1 และทินไดออกไซด์ที่มีอัตราส่วนเป็น 2 ต่อ 1



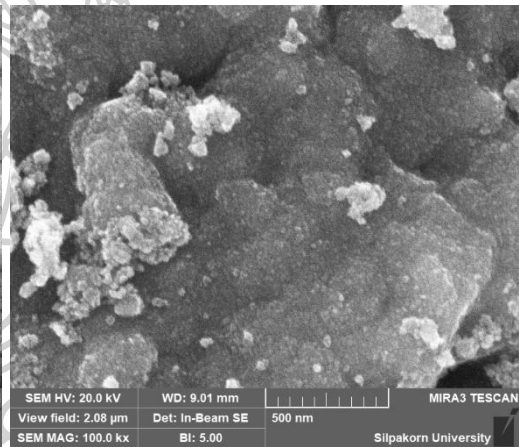
(a) 80 องศาเซลเซียส



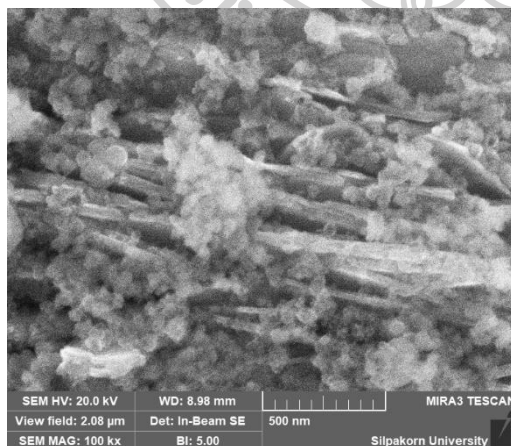
(d) 200 องศาเซลเซียส



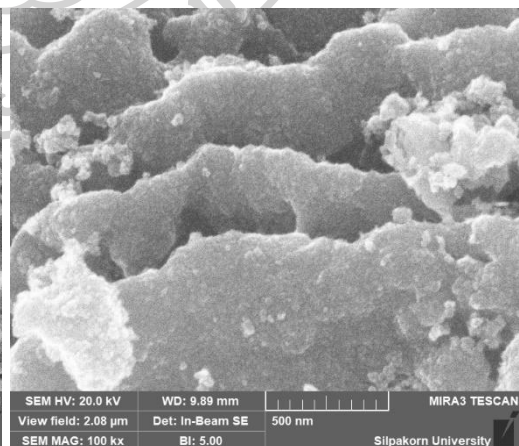
(b) 100 องศาเซลเซียส



(e) 250 องศาเซลเซียส

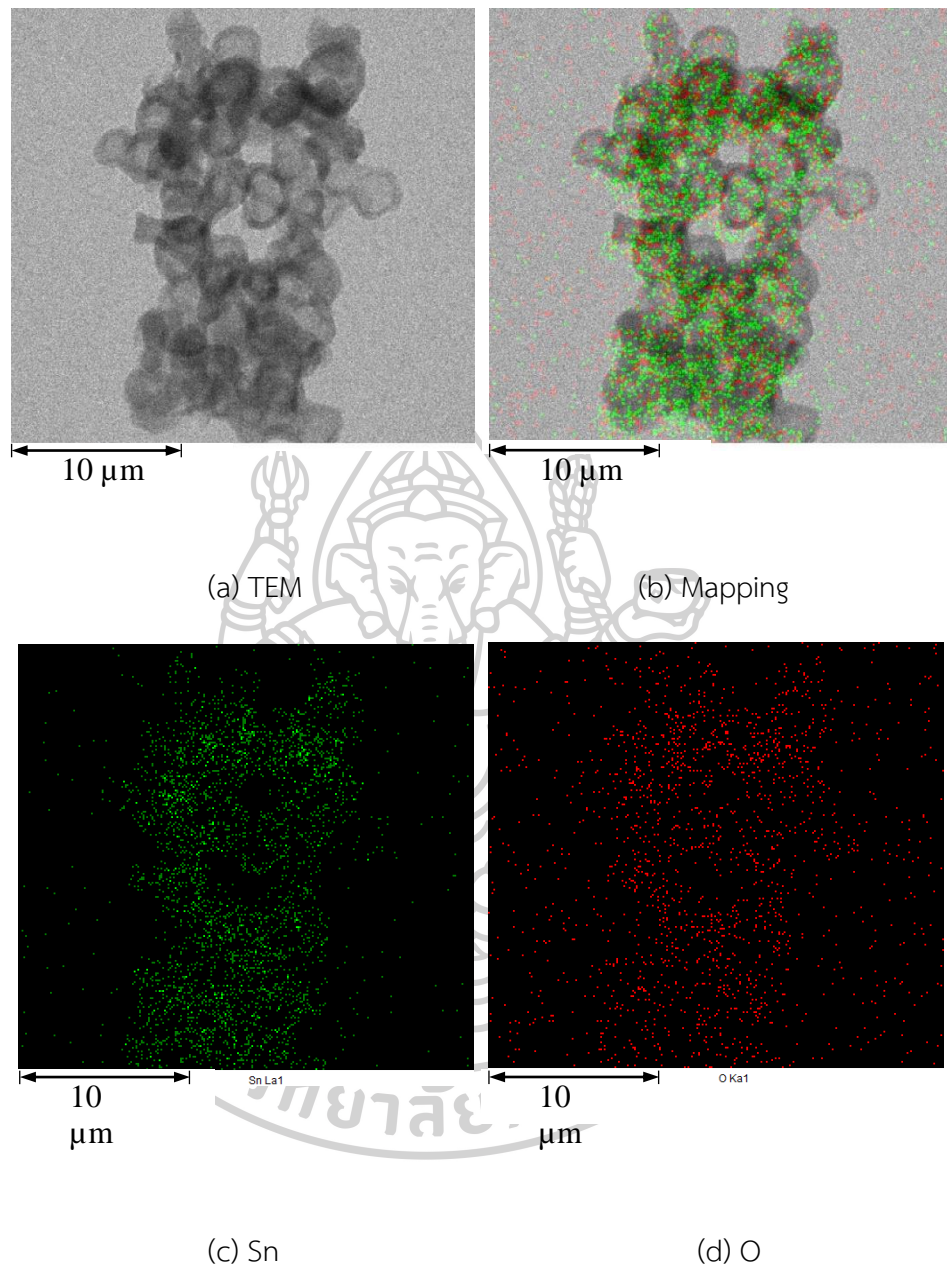


(c) 150 องศาเซลเซียส



(f) 300 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 19 SEM ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเฝ้ากำลังขยาย 100,000 เท่า



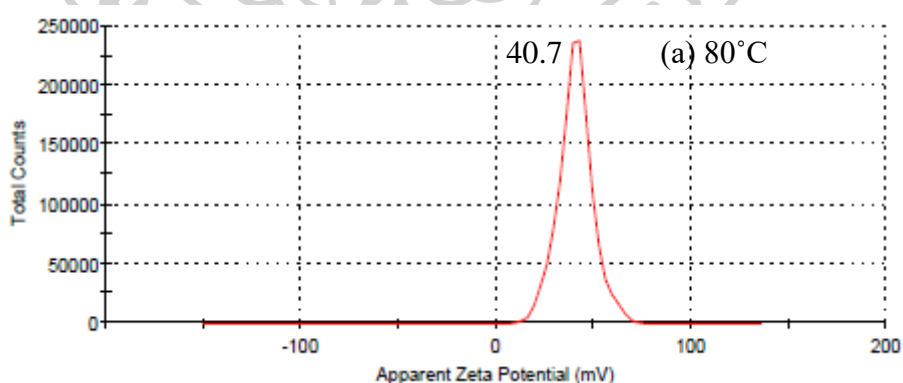
ภาพที่ 20 TEM ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

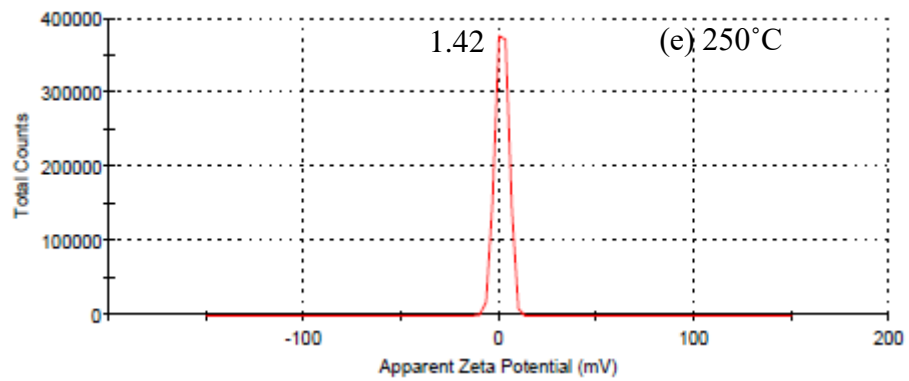
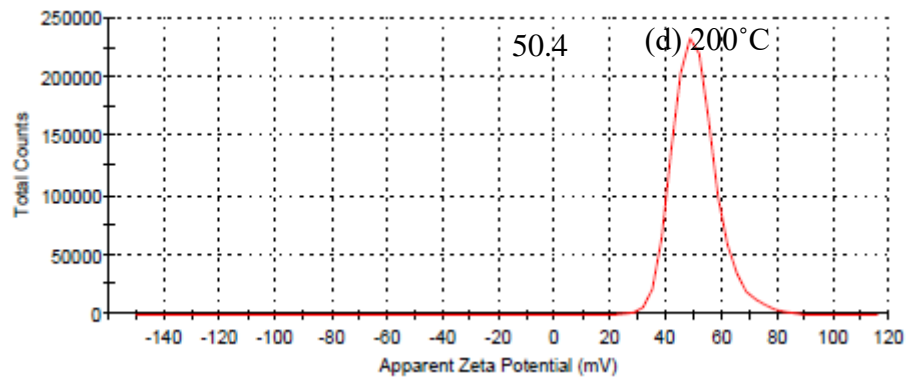
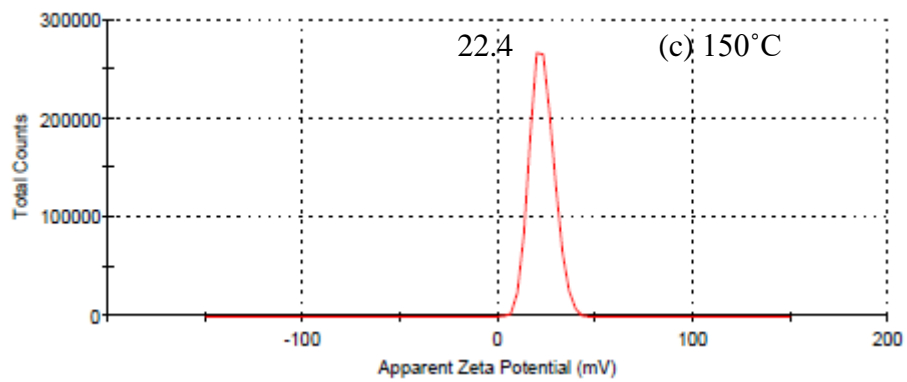
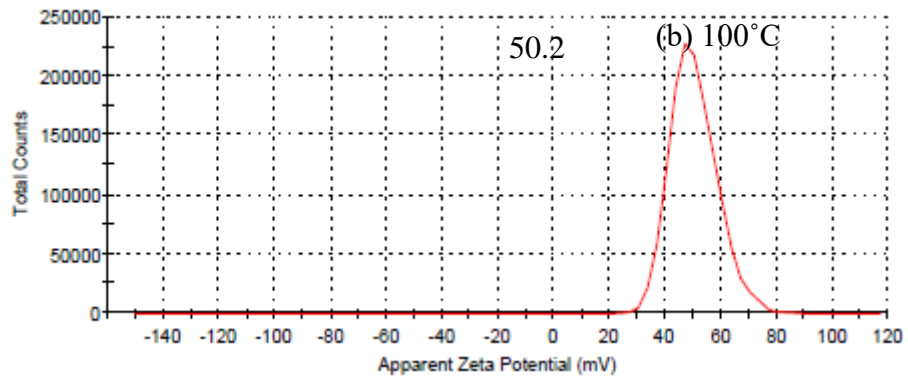
ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา

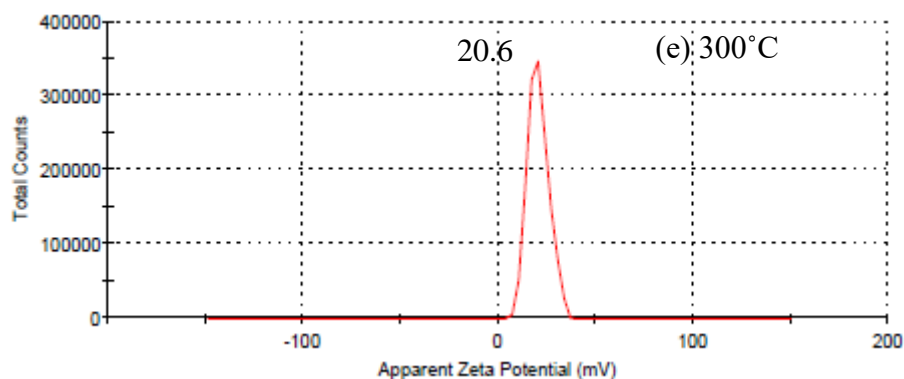
ทินออกไซด์ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักอะตอม (เปอร์เซ็นต์)		Sn : O
	Sn	O	
80	33.16	30.16	1 : 0.91
100	37.48	33.31	1 : 0.89
150	30.27	34.06	1 : 1.12
200	29.98	35.29	1 : 1.17
250	29.05	38.22	1 : 1.32
300	35.81	48.16	1 : 1.34

4.2.4 ประจุบนพื้นผิวและขนาดอนุภาคของทินออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน

ภาพที่ 21 แสดงค่าศักย์ซีตาของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา ซึ่งสรุปได้ในตารางที่ 8 พบว่าศักย์ซีตาในทุกเงื่อนไขของทินออกไซด์ที่ผ่านการเผาและไม่เผา มีค่าเป็นบวกทั้งหมด โดยทินออกไซด์ที่เผา 100 และ 200 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุดคือ 50.2 และ 50.4 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ แสดงถึงทินออกไซด์กระจายตัวได้ดีที่สุดในสีย้อม เนื่องจากการผลึกกันของประจุบนพื้นผิว รองลงมาคือทินออกไซด์ที่ไม่ผ่านการเผา มีค่า 40.7 มิลลิโวลต์ และค่าศักย์ซีตาน้อยลงเป็น 22.4 20.6 และ 1.42 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิการเผาทินออกไซด์ที่ 150 300 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ







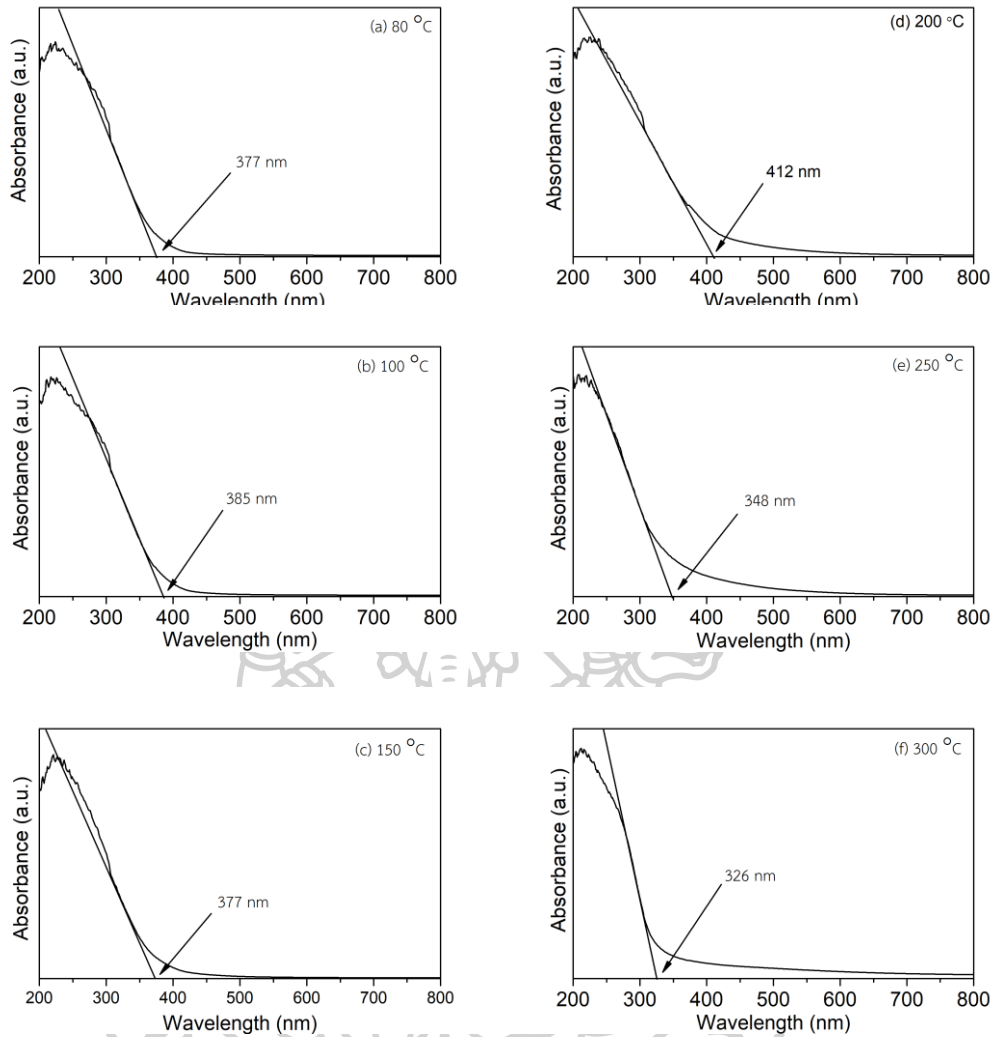
ภาพที่ 21 ศักย์ซีตาของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา

ตารางที่ 8 ศักย์ซีตาของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา

ทินออกไซด์ที่อุณหภูมิการเผาต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)	ศักย์ซีตา (มิลลิโวลต์)
80	40.7
100	50.2
150	22.4
200	50.4
250	1.42
300	20.6

4.2.5 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

ภาพที่ 22 แสดงการหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ที่ไม่ผ่านและผ่านการเผา พบว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานโดยสมการของพลังค์ที่อุณหภูมิการเผา 200 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยที่สุดคือ 3.00 อิเล็กตรอนโวลต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 3.21 ที่อุณหภูมิเผา 100 องศาเซลเซียส ส่วนทินออกไซด์ที่ไม่เผาและเผาที่ 150 องศาเซลเซียส มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเท่ากันที่ 3.29 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 250 และ 300 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมีค่ามากเป็น 3.56 และ 3.80 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึงการเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9



ภาพที่ 22 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา

ตารางที่ 9 ค่า λ_{onset} และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ที่แต่ละอุณหภูมิเผา

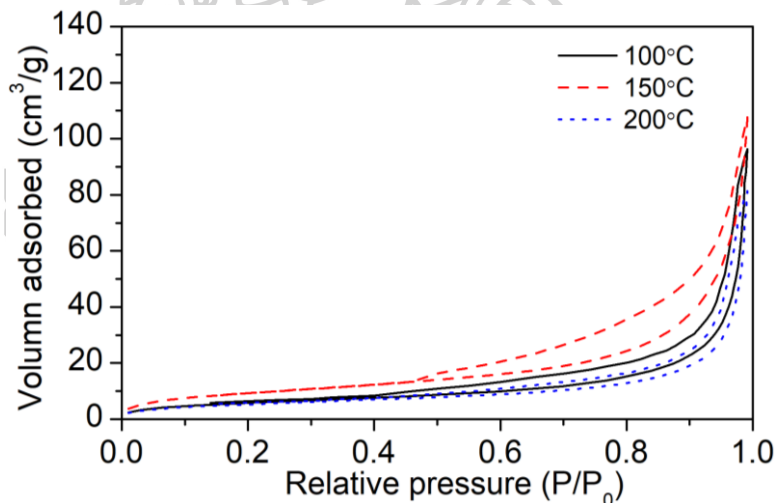
ทินออกไซด์ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)	λ_{onset} (นาโนเมตร)	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
ไม่เผา	377	3.29
100	385	3.21
150	377	3.29
200	412	3.00
250	348	3.56
300	326	3.80

4.2.6 พื้นที่ผิวของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

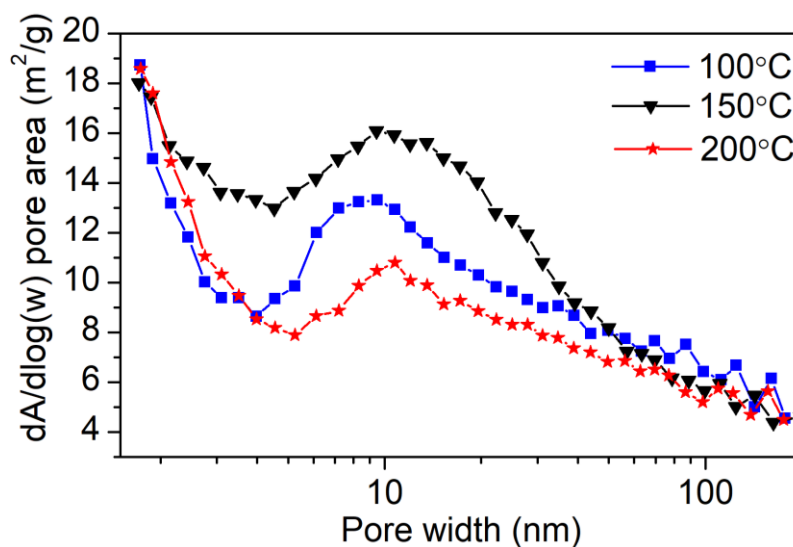
ภาพที่ 23 แสดงการดูดซับและคายซับก๊าซที่ผิวของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 100 150 และ 200 องศาเซลเซียส พบว่าทินออกไซด์มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนตามตารางที่ 10 โดยเป็นไอโซเทอมชนิดที่ 4 (type IV) โดยการเผาทินออกไซด์ที่ 150 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ 34.73 ตารางเมตรต่อกรัม ภาพที่ 24 แสดงกราฟการกระจายตัวของรูพรุนพบว่าทินออกไซด์ที่เผาทุกอุณหภูมิ มีขนาดรูพรุน 3 ชนิด เช่นเดียวกัน คือรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ขนาด 2 ถึง 50 นาโนเมตร และขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร

ตารางที่ 10 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของทินออกไซด์เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ทินออกไซด์ที่อุณหภูมิเผา ต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)	พื้นที่ผิว (ตาราง เมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม)
100	21.71	29.3002	0.1457
150	34.73	20.5967	0.1609
200	19.78	28.7941	0.1227



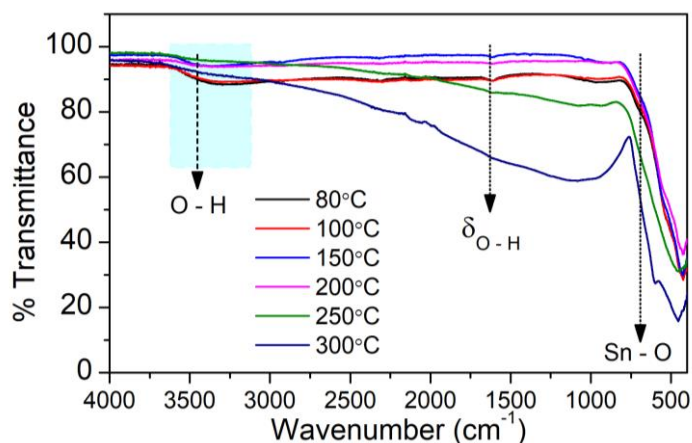
ภาพที่ 23 การดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนพื้นที่ผิวของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา



ภาพที่ 24 การกระจายขนาดรูพรุนในทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เมาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.2.7 ศึกษาการสั่นของพันธะด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

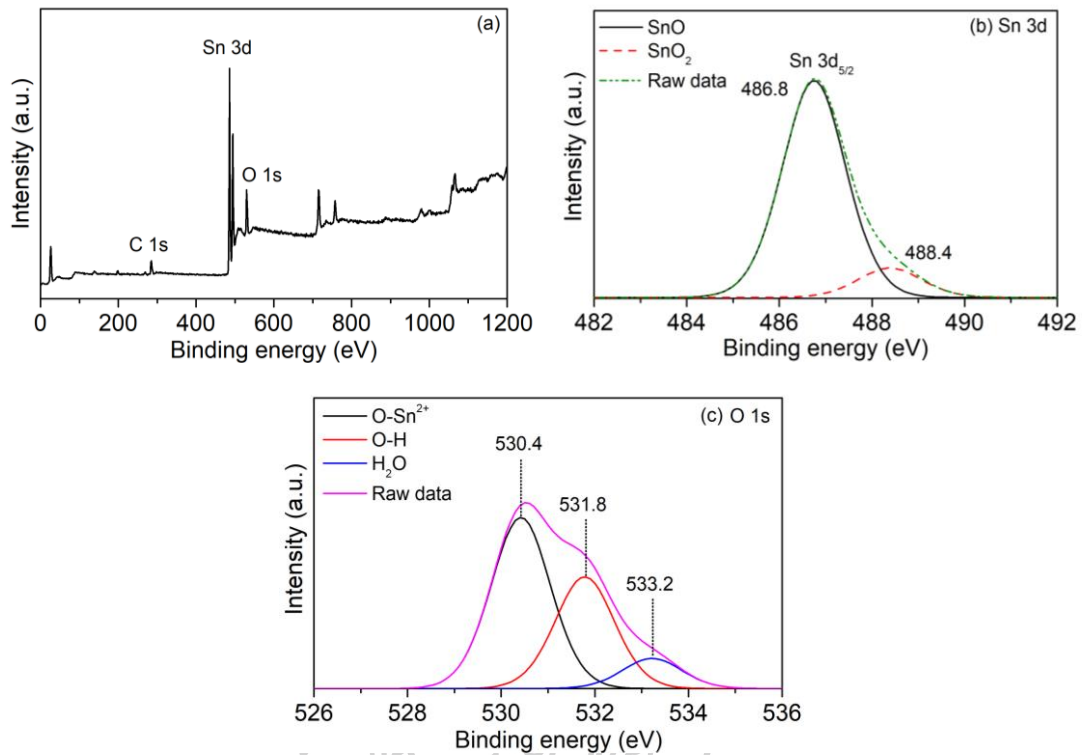
ภาพที่ 25 แสดงการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเมาพบว่าที่เลขคลื่น 3,700 ถึง 3,853 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะของหมู่ไฮดรอกไซด์ (O – H) [45] เนื่องจากความขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์และในบรรยากาศที่ผิวของทินออกไซด์ (Sn – O) [46] ที่เลขคลื่น 3,415 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นของแบบยืดหดของพันธะทินและหมู่ไฮดรอกไซด์ [47] ซึ่งจะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิการเผาทินออกไซด์สูงขึ้น แสดงถึงการหมดไปของเฟสทินไฮดรอกไซด์ สอดคล้องกับ XRD เลขคลื่น 3,400 ถึง 1,600 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดระหว่างโมเลกุลของน้ำโดยหมู่ของไฮดรอกไซด์และพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกไซด์เช่นกัน [48] เลขคลื่น 1,636 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบโค้งงอของอะตอมไฮโดรเจนและออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ (O – H) การสั่นของอะตอมทินและออกซิเจนแสดงที่เลขคลื่น 1,022 ต่อเซนติเมตร จากการสั่นของทินกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ยืนยันว่าเกิดพันธะของทินและออกซิเจน (Sn – O) และออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O – H) ในโมเลกุลของทินไดออกไซด์ [49, 50] ส่วนเฟสของทินไดออกไซด์แสดงโดยเลขคลื่น 606 ต่อเซนติเมตร [51] ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ว่าการเผาทินออกไซด์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส จะเกิดเฟสของทินไดออกไซด์มากขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 25 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา

4.2.8 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่พื้นผิวด้วยเทคนิค XPS

ภาพที่ 26 (a) และ 26 (b) แสดงสเปกตรัมแบบเซอเวย์และไฮเรโซลูชันของ Sn 3d พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 486.8 และ 495.2 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึง Sn 3d_{5/2} ของเฟสทินออกไซด์ [7] พลังงานยึดเหนี่ยวที่ 488.1 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึงเฟสทินไดออกไซด์ [52] ภาพที่ 26 (c) แสดงพลังงานยึดเหนี่ยวของออกซิเจนในทินออกไซด์ พบว่าที่พลังงานยึดเหนี่ยว 530.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ของ O 1s แสดงถึงเฟสของทินออกไซด์ [53] ที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 531.8 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึงพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจน [54] และที่พลังงานยึดเหนี่ยว 533.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ [55] ในส่วนของพลังงานยึดเหนี่ยวของคาร์บอน C 1s เกิดจากการปนเปื้อนของคาร์บอนในบรรยากาศที่ถูกผิวของทินออกไซด์ดูดซับไว้ [56] ซึ่งมีอยู่ 12.55 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล

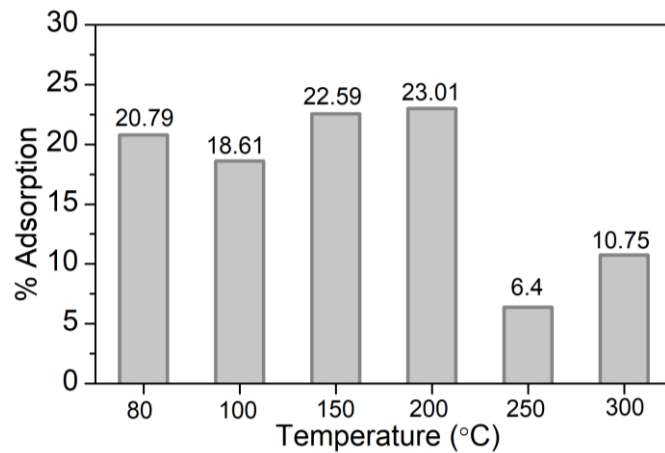


ภาพที่ 26 XPS spectra ของทินออกไซด์ที่เผาที่ 150 องศาเซลเซียส

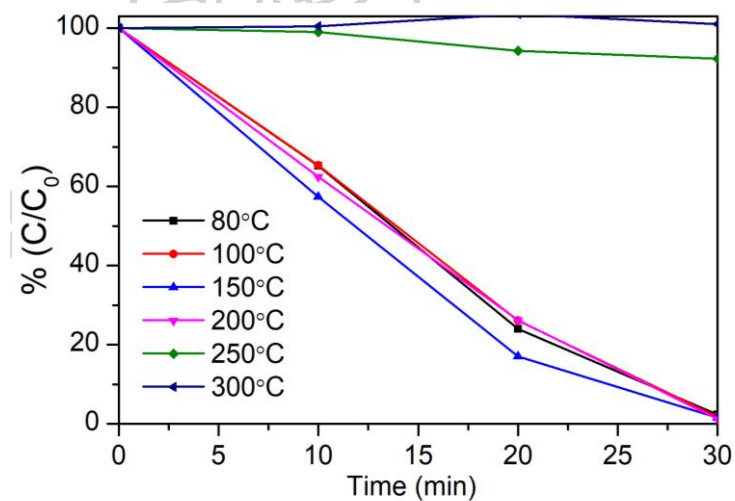
4.2.9 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของทินออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

จากภาพที่ 27 แสดงการดูดซับเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในที่มีดเป็นเวลา 60 นาที พบว่าทินออกไซด์ที่เผา 200 และ 150 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดและใกล้เคียงกันคือ 23.01 และ 22.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับภาพจาก SEM ส่วนทินออกไซด์ที่ไม่ผ่านและผ่านการเผาที่ 100 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 20.79 และ 18.61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากมีเฟสของทินไฮดรอกไซด์ค่อนข้างมากติดอยู่ที่ผิวด้านนอกส่งผลให้พื้นที่ผิวน้อยลง โดยสังเกตได้จากภาพ SEM ส่วนทินออกไซด์ที่เผา 250 และ 300 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับเมทิลีนบลูในที่มีดเป็น 6.4 และ 10.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยลงอย่างชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากแผ่นของทินออกไซด์ที่เป็นเกาะกลุ่มกันเป็นทินไดออกไซด์อัดกันแน่นที่ผิวภายนอกทำให้พื้นที่ผิวลดลง สอดคล้องกับผล SEM ในภาพที่ 28 แสดงผลทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 โดยไม่ผ่านและผ่านการเผา พบว่าเมื่อเผาทินออกไซด์ที่ 200 และ 150 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดใกล้เคียงกันคือ 98.78 และ 98.41 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 30 นาที ภายใต้แสงยูวี รองลงมาคือเผาที่ 100 องศาเซลเซียส และไม่ผ่านการเผา ทินออกไซด์จะมี

ประสิทธิภาพของการย่อยสลายเมทิลีนบลู 98.2 และ 97.63 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเฝ้าเป็น 250 และ 300 องศาเซลเซียส ทินออกไซด์จะไม่สามารถย่อยสลายสี้อมได้เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของทินออกไซด์เป็นทินไดออกไซด์ ซึ่งมีพลังงานกระตุ้นสูงกว่าพลังงานจากแหล่งกำเนิดซึ่งมีค่า 3.35 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสี้อมได้

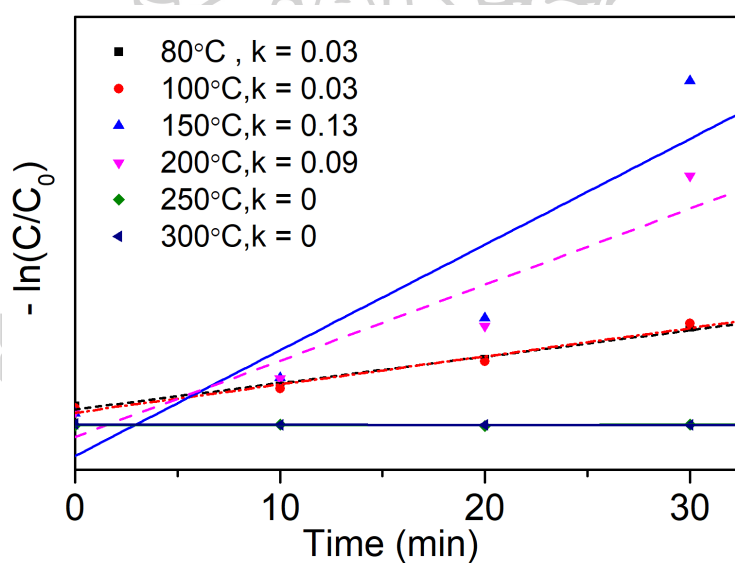


ภาพที่ 27 การดูดซับสี้อมในที่มีด 60 นาที ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเฝ้า

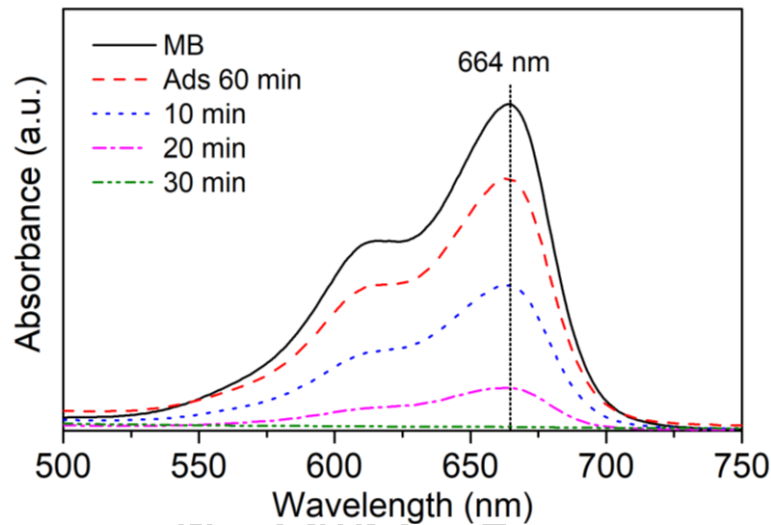


ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสี้อมของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเฝ้า

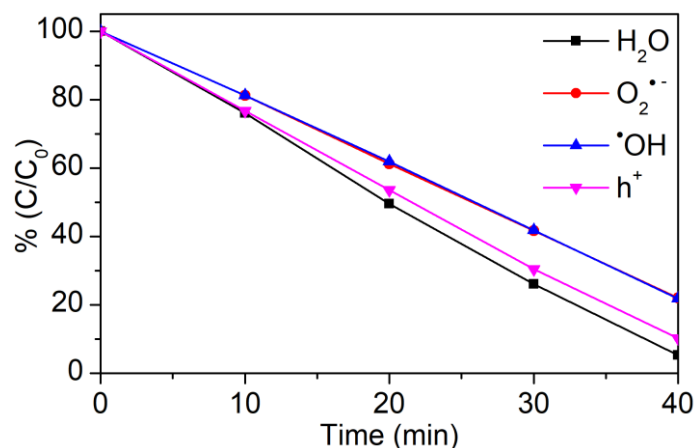
ภาพที่ 29 แสดงการหาค่าคงที่ของย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 แต่ละอุณหภูมิเผา พบว่าเมื่อเผาทินออกไซด์ที่ 150 200 100 องศาเซลเซียส และไม่ผ่านการเผา มีค่าคงที่การย่อยสลาย (k) เป็น 0.13 0.09 0.03 และ 0.03 ต่อนาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเผาทินออกไซด์ที่ 150 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้เร็วที่สุด หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีที่สุด ในส่วนของการเผาทินออกไซด์ที่ 250 และ 300 องศาเซลเซียส คำนวณค่าคงที่การย่อยสลายสีย้อมได้ใกล้เคียงศูนย์ แสดงว่าทินออกไซด์ดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของทินออกไซด์เป็นทินไดออกไซด์สอดคล้องกับผลทดสอบจาก XRD และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมีมากกว่าแสงยูวีที่ใช้ทดสอบซึ่งมีความยาวคลื่น 370 นาโนเมตร หรือมีพลังงานกระตุ้นเพียง 3.35 อิเล็กตรอนโวลต์ เท่านั้น ในภาพที่ 30 แสดงการดูดซับสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ของทินออกไซด์ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมและค่าคงที่การย่อยสลาย



ภาพที่ 29 การหาค่าคงที่การย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ



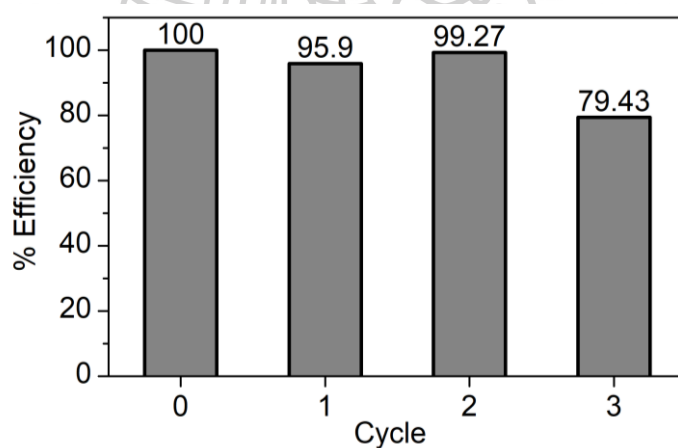
ภาพที่ 30 การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 644 นาโนเมตร ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เหนือที่ 150 องศาเซลเซียส



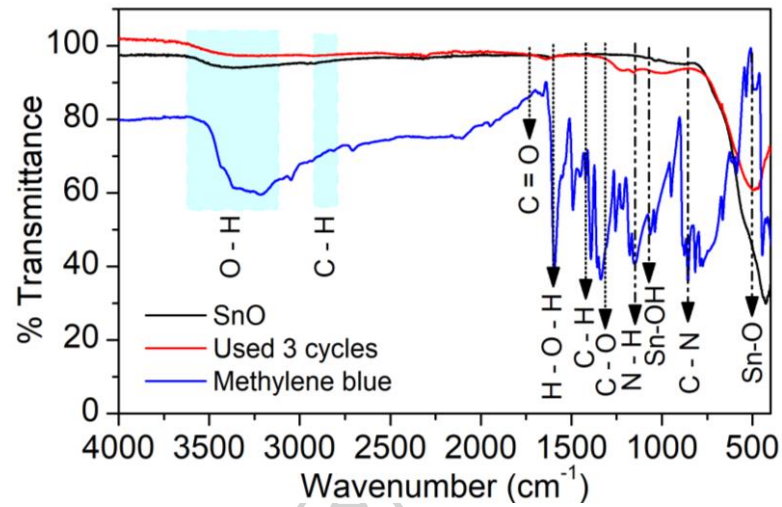
ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เหนือที่ 150 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 31 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ pH เท่ากับ 2 เหนือที่ 150 องศาเซลเซียส โดยใส่น้ำ สารละลายเบนโซควิโนน ที่บิวทานอล และอีดีทีเอ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เพื่อเป็นการทดลองอ้างอิง และจับอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ อนุมูลไฮดรอกซิล และโฮล ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของทินออกไซด์ที่สังเคราะห์เมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที ของทินออกไซด์ที่ใส่น้ำมีค่ามากที่สุดคือ 94.76 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือตัวอย่างที่ใส่อีดีทีเอ 89.87 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวอย่างที่ใส่เบนโซควิโนนและที่บิวทานอล มีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูใกล้เคียงกันคือ 77.97 และ 78.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอนุมูลหลักในปฏิกิริยาโฟโต

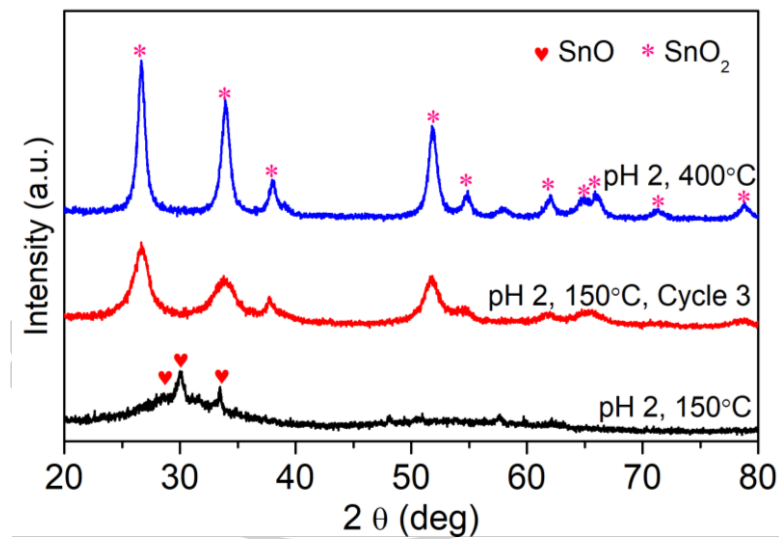
คะตะลิสต์คืออนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) อนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot OH$) และไฮล (H^+) ตามลำดับ ภาพที่ 32 แสดงประสิทธิภาพของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส ของการย่อยสลายเมทิลีนบลูซ้ำ 3 รอบ เมื่อเปรียบเทียบให้การย่อยสลายครั้งแรกเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวเร่งช้าลดลง 4.1 0.73 และ 20.57 เปอร์เซ็นต์ ในรอบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ นั่นคือทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถใช้ซ้ำได้อย่างน้อย 3 ครั้ง ภาพที่ 33 แสดงการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส ก่อนและหลังใช้เป็นตัวเร่งพบว่าเลขคลื่น 2,918 2,850 และ 1,424 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (CH_2 และ CH_3) และพันธะคู่ของคาร์บอนกับออกซิเจน ($C = O$) ที่เลขคลื่น 1,616 และ 1,729 ต่อเซนติเมตร พันธะคาร์บอนกับออกซิเจนแสดงที่เลขคลื่น 1,315 และพันธะระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน ($C - N$) ในช่วงเลขคลื่น 1,027 ถึง 1,157 ต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างทินออกไซด์และไนโตรเจนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพันธะโมเลกุลของเมทิลีนบลู [57] ในส่วนของเลขคลื่น 1,140 และ 854 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะระหว่างไนโตรเจนและไฮโดรเจน และพันธะระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนที่ติดอยู่กับโมเลกุลเมทิลีนบลู [58] ภาพที่ 34 แสดง XRD ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 และ 400 องศาเซลเซียส ที่ไม่ผ่านและผ่านการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 3 รอบ พบว่าเฟสของทินออกไซด์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นทินไดออกไซด์ แต่ยังเปลี่ยนไม่มากเท่ากับการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ขึ้นไป



ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพการย่อยสลายซ้ำในแต่ละรอบของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 33 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส หลังจากทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพที่ 34 XRD ของทินออกไซด์หลังจากใช้ย่อยสลายสีย้อม 3 รอบ ของทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส

4.3 การสังเคราะห์ทินออกไซด์ที่ตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพและสมบัติของคาร์บอนดอท

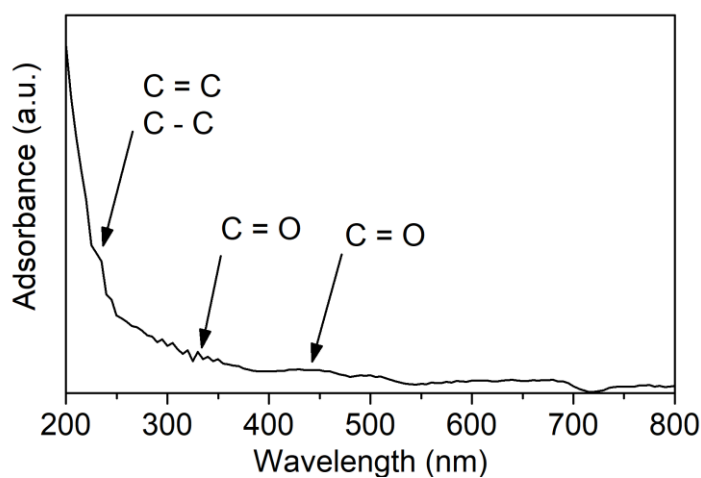
ภาพที่ 35 (a) และ 35 (b) แสดงลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องต้มซี-วิท ภายใต้แสงช่วงที่ตามองเห็นและแสงยูวี พบว่าเกิดการเรืองแสงขึ้นภายใต้แสงยูวีซึ่งเป็นคุณสมบัติของคาร์บอนดอท ภาพที่ 36 แสดงการดูดกลืนแสงของคาร์บอนดอท พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น π ไปยัง π^* ซึ่งแสดงพันธะ C = C ในวงแหวนโรมาติก การดูดกลืนแสงในช่วง 330 และ 400 นาโนเมตร แสดงถึงพันธะ C = O เกิดจากการเคลื่อนที่จากชั้น n ไปยัง π^* [59] และคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์นี้มีค่าศักย์ซีตาเป็นลบ 12.8 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 37



(a) แสงวิสิเบิล

(b) แสงยูวี

ภาพที่ 35 ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องต้มซี-วิท



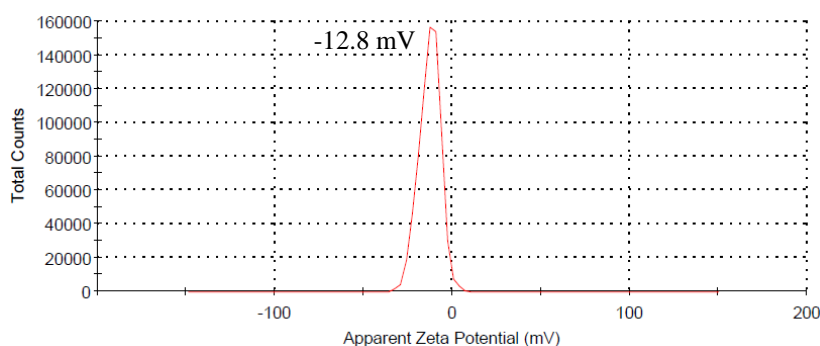
ภาพที่ 36 การดูดกลืนแสงของคาร์บอนดอท

4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคาร์บอนดอท

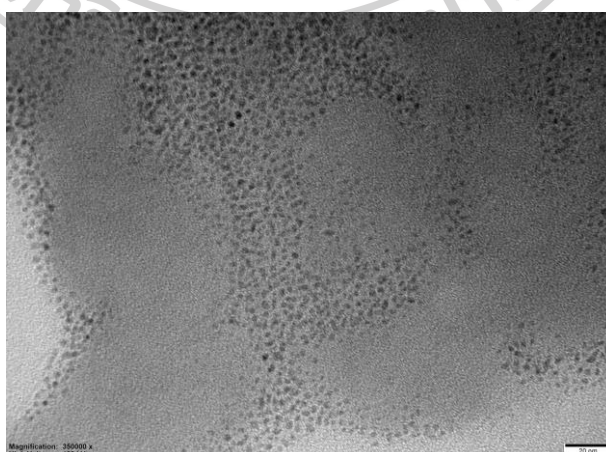
ภาพที่ 38 แสดง TEM ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ขึ้นจากเครื่องต้มซี-วิท พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคประมาณ 2 ถึง 3 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติในการเรืองแสงยูวีในภาพที่ 35 (b)

4.3.3 การศึกษาการเรืองแสงของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากการศึกษาการเรืองแสงของสารละลาย CDs ที่พลังงานกระตุ้น 355 นาโนเมตร ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ในภาพที่ 39 พบว่า CDs ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องต้มซี-วิทมีการปลดปล่อยพลังงานสูงสุดที่ความยาวคลื่น 444 นาโนเมตร เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่งผลทำให้อนุภาคของ CDs ที่มีขนาดระหว่าง 1 ถึง 10 นาโนเมตร เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของการเรืองแสงเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว



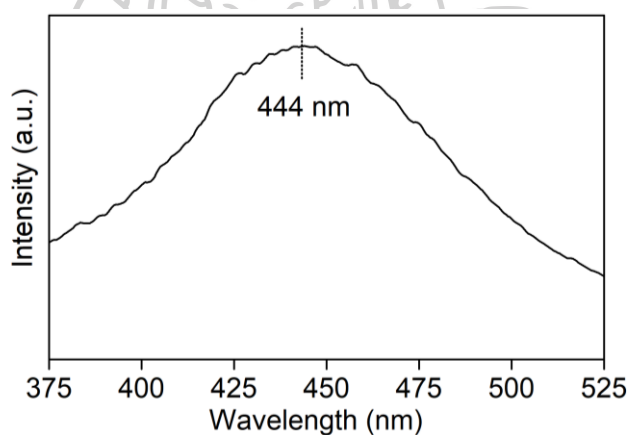
ภาพที่ 37 ศักย์ซีตาของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องต้มซี-วิท



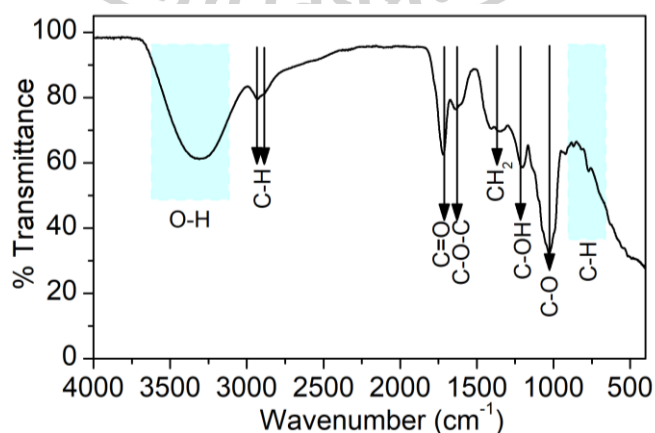
ภาพที่ 38 TEM ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องต้มซี-วิท

4.3.4 การสั่นของพันธะของคาร์บอนต่อทโดยการดูดกลืนแสงอินฟราเรด

ภาพที่ 40 แสดงการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของคาร์บอนต่อทที่สังเคราะห์จากเครื่องตีมิซี-วิท พบว่ามีพันธะระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O - H) ที่เลขคลื่นประมาณ 3,457 ส่วนที่เลขคลื่น 1,637 1,371 และ 1,023 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นของพันธะของคาร์บอนกับออกซิเจนกับคาร์บอน (C - O - C) และคาร์บอนกับไฮโดรเจนสองอะตอม (CH₂) และคาร์บอนกับออกซิเจน (C - O) [60, 61] การสั่นของพันธะคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C - H) ที่เลขคลื่น 2,938 และ 2,878 ต่อเซนติเมตร การสั่นของพันธะคาร์บอนกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (C - OH) ที่เลขคลื่น 1,200 ต่อเซนติเมตร [62] และการสั่นของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C = O) ที่เลขคลื่น 1,726 ต่อเซนติเมตร [62] ที่เลขคลื่น 900 - 675 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะในวงแหวนของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C - H) [63]



ภาพที่ 39 ความเข้มของการเรืองแสงของคาร์บอนต่อทที่พลังงานกระตุ้น 355 นาโนเมตร



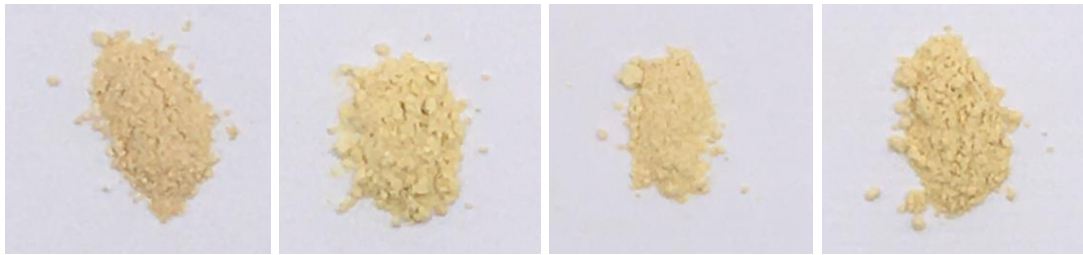
ภาพที่ 40 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของคาร์บอนต่อท

4.3.4 ลักษณะทางกายภาพของหินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

ภาพที่ 41 แสดงลักษณะทางกายภาพของหินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เผาที่ 150 องศาเซลเซียส ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องดีมีซี-วิท พบว่าหินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวและไม่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทมีลักษณะเป็นผงสีขาวเหลืองนวลคล้ายกัน เนื่องจากปริมาณคาร์บอนดอทที่ใช้ดัดแปลงพื้นผิวมีเพียงเล็กน้อย และสีของคาร์บอนดอทออกเหลือง ดังนั้นเมื่อดัดแปลงพื้นผิวของหินออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอทแล้วหินออกไซด์จึงเปลี่ยนสีไม่มากนัก

4.3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของหินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

ภาพที่ 42 (a) แสดง SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า ของหินออกไซด์ที่ผสมกับน้ำกลั่นแล้ว กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท พบว่าพื้นผิวของหินออกไซด์ซึ่งปกติจะมีเฟสหลักเป็นแผ่นหินออกไซด์ขนาดระดับนาโนเมตร เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดระดับไมโครเมตร ได้เปลี่ยนเฟสที่ผิวเป็นหินไดออกไซด์เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหินออกไซด์กับออกซิเจนในน้ำ ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะที่เป็นแผ่นของหินออกไซด์น้อยลง ในภาพที่ 42 (b) 42 (c) และ 42 (d) แสดง SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า ของหินออกไซด์ที่ผสมกับน้ำกลั่นแล้ว กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 1 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลตามลำดับ พบว่าผลของการดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในหินออกไซด์ทำให้พื้นผิวของหินออกไซด์มีลักษณะเป็นแฉกมากขึ้น แต่การดัดแปลงพื้นผิวคาร์บอนดอทด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน ไม่ได้ส่งผลแตกต่างอย่างชัดเจนในการศึกษาสัณฐานวิทยา ภาพที่ 43 (a) แสดง TEM ของหินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ และภาพที่ 43 (b) แสดงการกระจายของธาตุในพื้นผิวของภาพ 43 (a) และภาพที่ 43 (c) 43 (d) และ 43 (e) แสดงการกระจายของหินออกซิเจน และคาร์บอนตามลำดับ บ่งชี้ว่าคาร์บอนดอทที่ใช้ดัดแปลงพื้นผิวกระจายตัวและเกาะติดอยู่ที่ผิวของหินออกไซด์



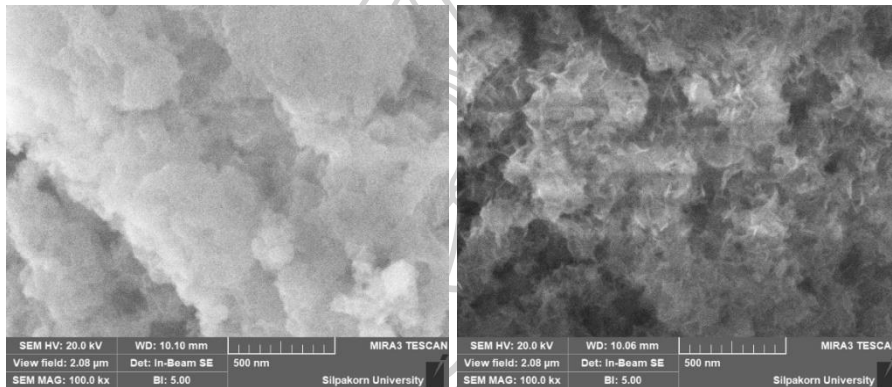
(a) 0%

(b) 1% CDs

(c) 2.5% CDs

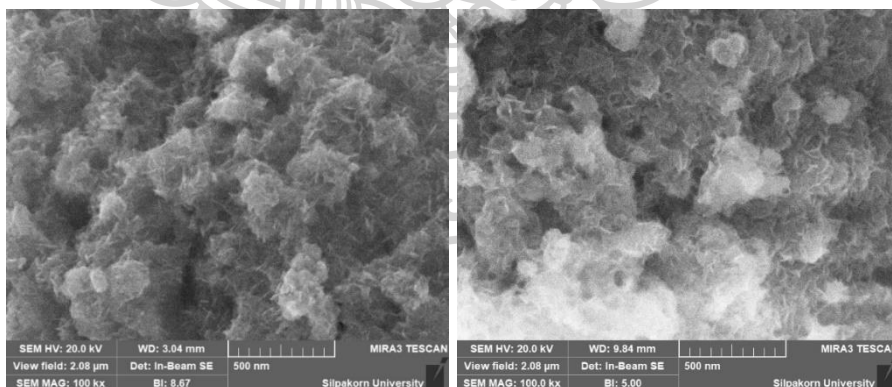
(d) 5% CDs

ภาพที่ 41 ลักษณะทางกายภาพของทินออกไซด์เผาที่ 150 องศาเซลเซียส แล้วตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในปริมาณต่าง ๆ



(a) 0%

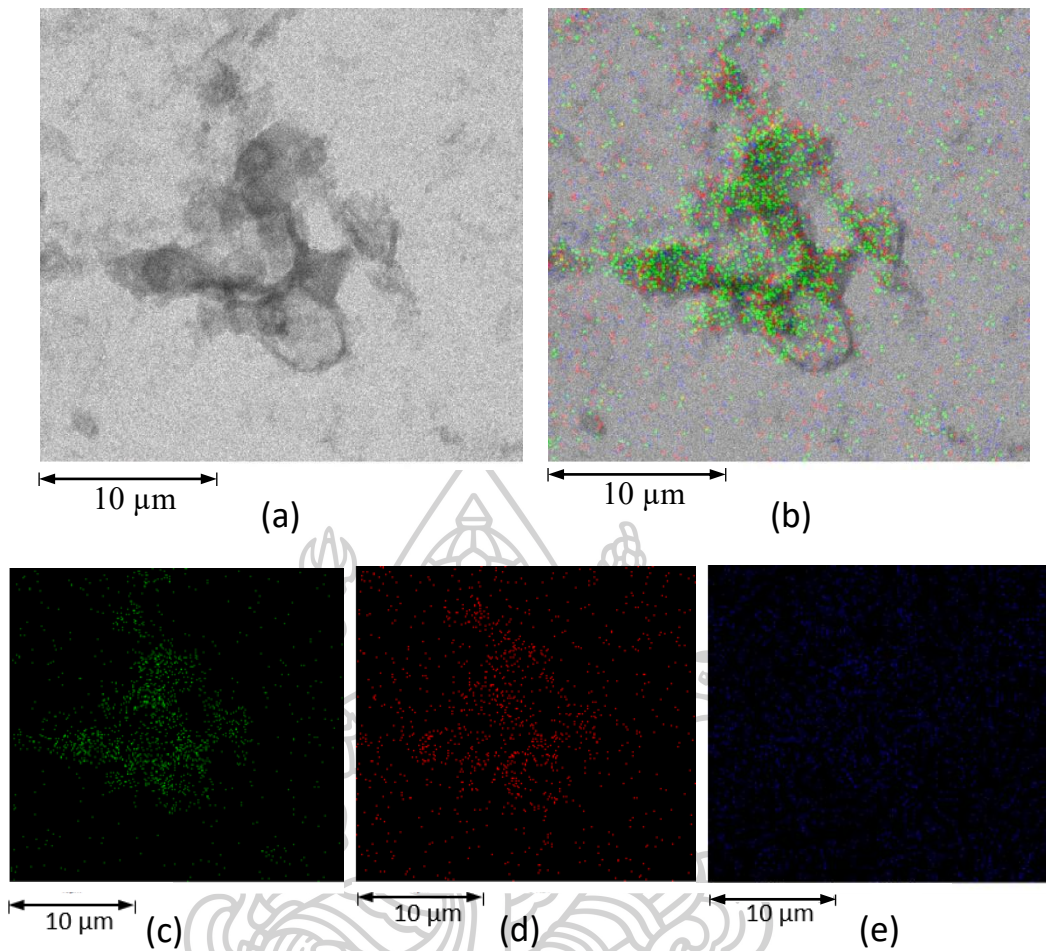
(b) 1% CDs



(c) 2.5% CDs

(d) 5% CDs

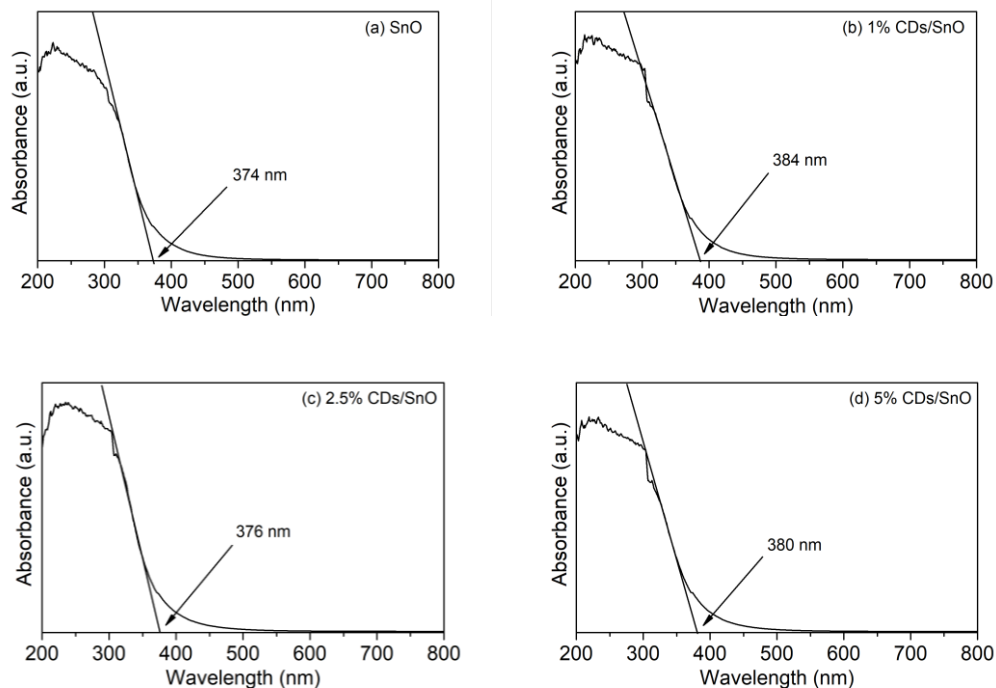
ภาพที่ 42 SEM ของทินออกไซด์ที่ตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทกำลังขยาย 100,000 เท่า



ภาพที่ 43 TEM ของทिनออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์

4.3.6 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทिनออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

ภาพที่ 44 (a) 44 (b) 44 (c) และ 44 (d) แสดงการดูดกลืนสเปกตรัมของทिनออกไซด์ที่ไม่ดัดแปลงพื้นผิวและดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 1 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลตามลำดับพบว่าทिनออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 1 เปอร์เซ็นต์ มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานต่ำสุดที่ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ และสูงขึ้นเป็น 3.27 และ 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ทุกเงื่อนไขที่ทिनออกไซด์ที่มีการดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่ต่ำกว่าทिनออกไซด์ที่ไม่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอททั้งหมด คือ 3.32 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งบ่งบอกให้รู้ว่าคาร์บอนดอทที่ดัดแปลงพื้นผิวนั้นมีผลทำให้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานโดยรวมลดลง ดังข้อมูลในตารางที่ 11



ภาพที่ 44 การหา λ_{onset} ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 11 λ_{onset} และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวทินออกไซด์ด้วยปริมาณคาร์บอนดอทต่าง ๆ

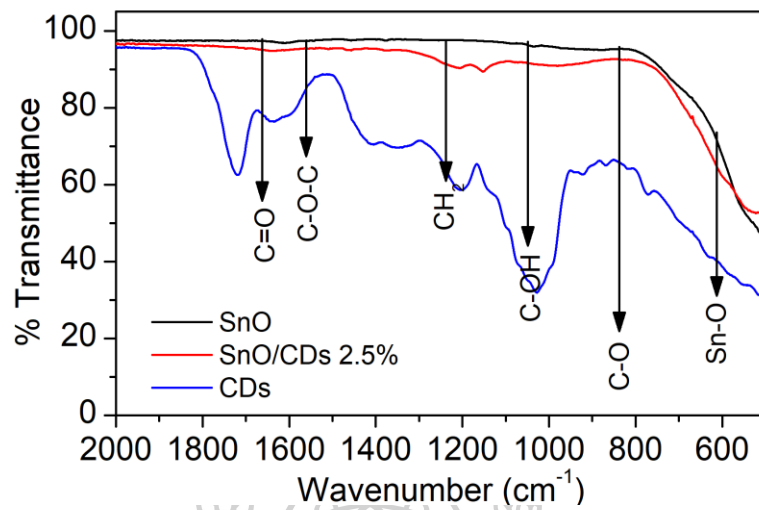
ปริมาณการดัดแปลงพื้นผิวทินออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอท (เปอร์เซ็นต์ โดยมวล)	λ_{onset} (นาโนเมตร)	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
0	374	3.32
1	384	3.22
2.5	376	3.30
5	380	3.27

4.3.7 การศึกษาการสั่นของพันธะของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

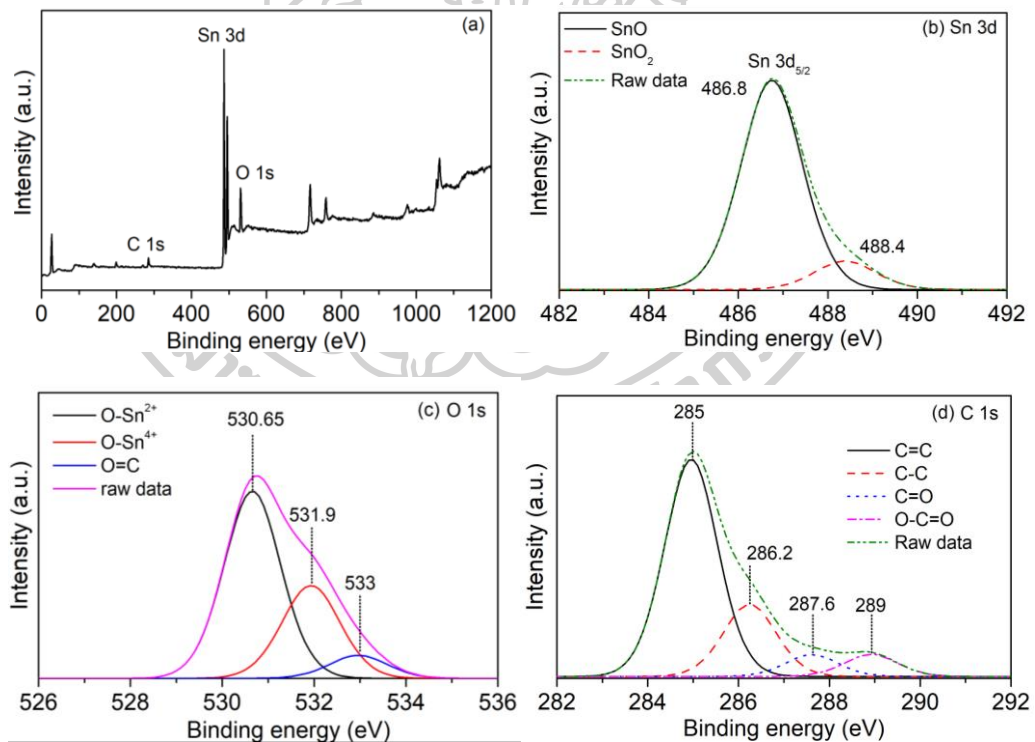
ภาพที่ 45 แสดงการดูดซับแสงอินฟราเรดของ SnO₂ ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท ปริมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล พบว่าที่เลขคลื่น 1,637 1,371 และ 1,023 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นของพันธะของคาร์บอนกับออกซิเจนกับคาร์บอน (C - O - C) และคาร์บอนกับไฮโดรเจนสองอะตอม (CH₂) [60] การสั่นของพันธะคาร์บอนกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (C - OH) ที่เลขคลื่น 1,200 ต่อเซนติเมตร [62] และการสั่นของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C = O) ที่เลขคลื่น 1,726 ต่อเซนติเมตร [62] และที่การสั่นของพันธะ Sn - O ที่เลขคลื่น 606 ต่อเซนติเมตร [51] แสดงให้เห็นว่าเมื่อดัดแปลงพื้นผิวของทินออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอทแล้ว มีคาร์บอนดอทติดอยู่เล็กน้อยเนื่องจากกราฟการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรดแสดงรูปแบบคล้ายคาร์บอนดอทเล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับข้อมูล XPS

4.3.8 การศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวของทินออกไซด์ที่มีการดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

ภาพที่ 46 (a) และ 46 (b) แสดง XPS ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอน 2.5 เปอร์เซ็นต์ แบบเซอเวย์และไฮเรโซลูชันตามลำดับ พบว่า Sn 3d_{5/2} มีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 486 และ 488.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงถึงทินออกไซด์และทินไดออกไซด์ตามลำดับ ภาพที่ 46 (c) แสดง XPS แบบไฮเรโซลูชันของ O 1S พบความเข้มของพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 530.65 531.9 และ 533 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งชี้ถึงทินออกไซด์ ทินไดออกไซด์ และพันธะคู่ของออกซิเจนกับคาร์บอน ตามลำดับ และภาพที่ 46 (d) แสดง XPS แบบไฮเรโซลูชันของ C 1S พบความเข้มของพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 285 และ 286.2 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึงพันธะ C=O และ C-C [64] พลังงานยึดเหนี่ยวที่ประมาณ 287.7 และ 289 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งชี้ว่าเป็นพันธะ C=O และ O-C=O [65] แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนดอทที่ดัดแปลงพื้นผิวลงไปไม่ได้ทำปฏิกิริยากับทินออกไซด์สอดคล้องกับการทดสอบการสั่นของพันธะโดยการดูดกลืนแสงอินฟราเรด



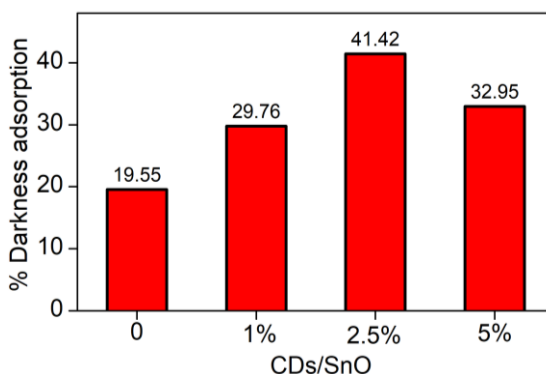
ภาพที่ 45 การดูดซับแสงอินฟราเรดของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์



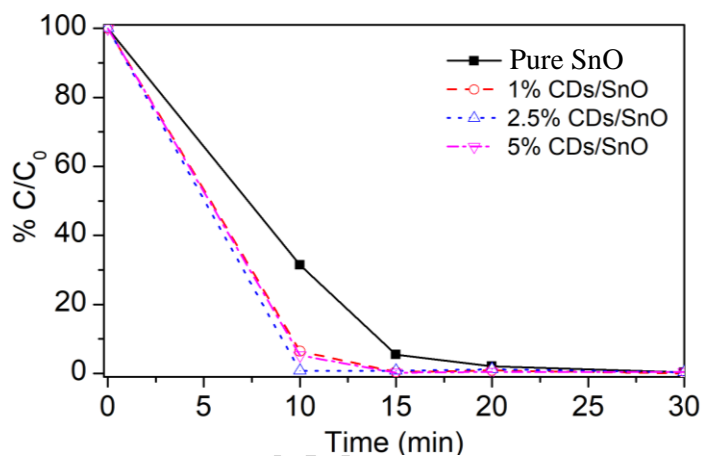
ภาพที่ 46 XPS Spectra ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์

4.3.9 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท

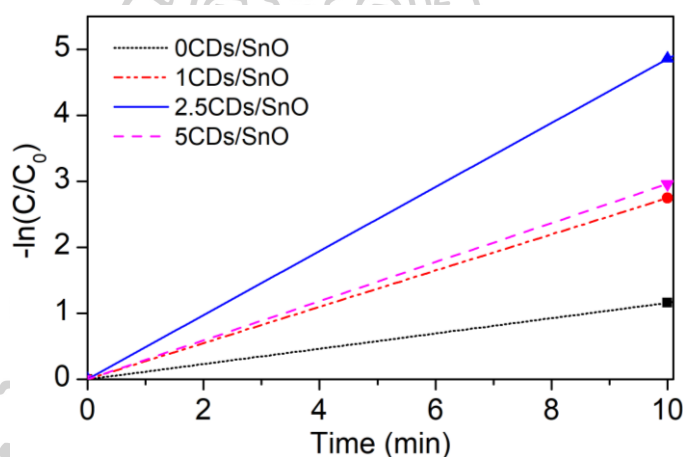
ภาพที่ 47 แสดงประสิทธิภาพของการดูดซับสีของเมทิลีนบลูในที่มีดเป็นเวลา 60 นาที ของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในปริมาณต่าง ๆ พบว่าการดัดแปลงพื้นผิวทินออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีการดูดซับสีของเมทิลีนบลูในที่มีดมากที่สุดคือ 41.42 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่การดัดแปลงพื้นผิวคาร์บอนดอท 5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถดูดซับสีของเมทิลีนบลูได้ 32.95 และ 29.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากคาร์บอนดอทมีประจุที่พื้นผิวหรือค่าศักย์ซีตาเป็นลบในขณะที่เมทิลีนบลูเป็นสีของประจุบวกจึงทำให้เกิดการจับตัวกันด้วยแรงทางไฟฟ้าส่งผลให้การดูดซับในที่มีดเกิดได้เร็วขึ้นมาก จากภาพที่ 48 พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 99.22 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็น 94.82 และ 93.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท จะดีกว่าทินออกไซด์ที่ไม่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทซึ่งมีประสิทธิภาพการย่อยสลายอยู่ที่ 68.60 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 10 นาที นอกจากเหตุผลด้านศักย์ซีตาแล้ว คาร์บอนดอทยังช่วยยับยั้งการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลหลังถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี ทำให้มีอิเล็กตรอนและโฮลมากขึ้นส่งผลให้การสร้างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์และอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น จึงเป็นอีกเหตุผลในการย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น ภาพที่ 49 แสดงการหาค่าคงที่ของการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู พบว่าทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าคงที่การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูมากที่สุดเป็น 0.49 ต่อนาที และรองลงมาคือการดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าคงที่การย่อยสลายเป็น 0.3 และ 0.27 ต่อนาที แสดงให้เห็นว่าทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีความเร็วมากที่สุดในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู



ภาพที่ 47 การดูดซับเมทิลีนบลูในที่มีดของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทในปริมาณที่ต่างกัน



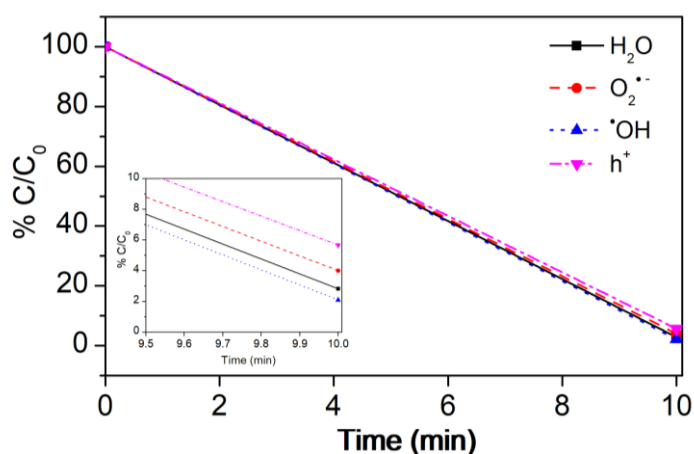
ภาพที่ 48 ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท ปริมาณต่างกัน



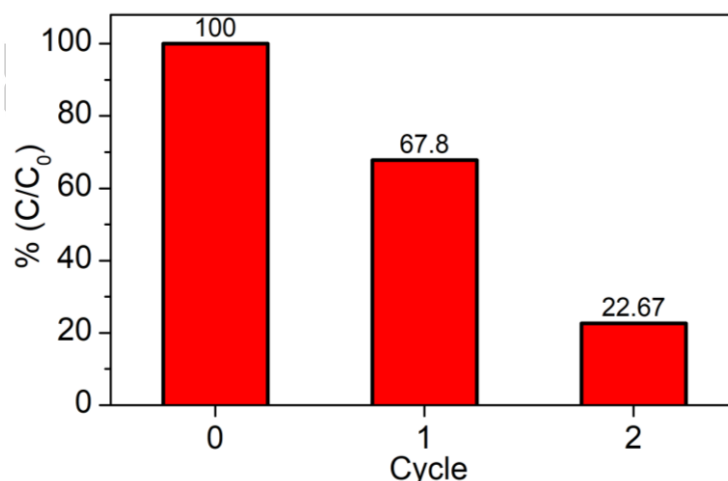
ภาพที่ 49 ค่าคงที่การย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 50 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของ CDs/SnO โดยใส่สารเบนโซควิโนน บิวทานอล และอีดีทีเอ เพื่อดักจับ $O_2^{\cdot -}$ $\cdot OH$ และ h^+ ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างที่ใส่อีดีทีเอมี ประสิทธิภาพลดลงเทียบกับตัวอย่างที่ใส่น้ำมากที่สุด รองลงมาคือเบนโซควิโนนและบิวทานอล แสดง ว่าอนุมูลที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมของ CDs/SnO มากที่สุดคือ h^+ รองลงมาคือ $O_2^{\cdot -}$ และ $\cdot OH$ ตามลำดับ ภาพที่ 51 แสดงประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมซ้ำโดยคำนวณให้การย่อยสลายสีย้อมครั้งแรกเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าการใช้ทินออกไซด์ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ ย่อยสลายสีย้อมซ้ำครั้งแรกได้ 67.8 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับการใช้งานครั้งแรก และเมื่อ พิจารณาจากการย่อยสลายสีย้อมครั้งที่สองจะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายอยู่ที่ 22.67 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้เนื่องจากการตัดแปลงพื้นผิวคาร์บอนดอททำให้พื้นที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนเฟสจากทินออกไซด์เป็นทินไดออกไซด์ก็มากขึ้นตามลำดับ ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับทินออกไซด์ที่ไม่ได้ตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นพบว่า มีข้อได้เปรียบคือใช้วิธีการสังเคราะห์ที่ง่ายกว่า และประสิทธิภาพดีกว่าดังแสดงในตารางที่ 12



ภาพที่ 50 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโดยใส่สารจับอนุภาคแต่ละชนิดของทินออกไซด์ที่ตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 51 ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ในแต่ละรอบ

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น พบว่าตัวเร่ง Sn/SiO₂ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลเจลใช้ปริมาณตัวเร่ง 1 มิลลิกรัมต่อปริมาตรเมทิลีนบลูความเข้มข้น 3.75×10⁻⁵ โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลู 99.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้คือ 99.22 เปอร์เซ็นต์ แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณตัวเร่งเท่ากันคือ 1 มิลลิกรัมต่อปริมาตรเมทิลีนบลูความเข้มข้น 4.69×10⁻⁵ โมลต่อลิตร ซึ่งสูงกว่า แต่ใช้เวลาย่อยสลายเพียง 10 นาที ซึ่งน้อยกว่างานวิจัยที่กล่าวมาในข้างต้นถึง 96 เท่า อีกทั้งวิธีการสังเคราะห์ง่าย และประหยัดต้นทุนมากกว่าด้วย

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมกับงานวิจัยอื่น

ประเภทของตัวเร่ง	วิธีการสังเคราะห์	ปริมาณตัวเร่ง (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (โมล/ลิตร)	แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบ	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม (เปอร์เซ็นต์)	อ้างอิง
CDs/SnO	ตกตะกอน	1	4.69×10 ⁻⁵	หลอดยูวี (370 nm)	10	99.22	งานนี้
Sn/SiO ₂	โซลเจล	1	3.75×10 ⁻⁵	หลอดยูวี (320 nm)	960	99.40	[66]
SnO	ไฮโดรเทอร์มอล	0.8	1×10 ⁻⁵	50W หลอดฮาโลเจน	60	50.00	[8]
SnO/TiO ₂	Atomic layer deposition	0.6	7.82×10 ⁻⁵	400W Metal halide lamp	40	46.00	[21]
SnO	ไฮโดรเทอร์มอล	2	3.13×10 ⁻⁵	25W หลอดฟลูออเรสเซนต์	6000	30.75	[67]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ค่าของ pH มีผลต่อทินออกไซด์โดยวิธีการตกตะกอน โดยพบว่าทินออกไซด์ที่สภาวะกรดจะมีเฟสทินออกไซด์เป็นแผ่นหนาประมาณ 30 นาโนเมตร เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนทรงกลมขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 10 ไมโครเมตร เมื่อสังเคราะห์สารที่สภาวะเบสจะมีเฟสของทินไดออกไซด์และทินไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 18.67 ถึง 35.77 นาโนเมตร โดยที่ pH เท่ากับ 6 ขนาดผลึกทินออกไซด์จะเล็กที่สุด และที่ pH เท่ากับ 10 ขนาดผลึกเฉลี่ยของทินออกไซด์จะใหญ่ที่สุด โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมีค่าตั้งแต่ 3.15 ถึง 3.67 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 6 มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานน้อยที่สุด เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าทินออกไซด์เปลี่ยนเป็นเฟสของทินไดออกไซด์เป็นหลัก แต่ที่ pH เท่ากับ 8 และ pH เท่ากับ 10 มีเฟสของทินออกไซด์ปนอยู่ เนื่องจากเฟสของทินไฮดรอกไซด์มีมากกว่าก่อนเผา จึงทำให้พลังงานความร้อนไม่มากพอที่จะเปลี่ยนเฟสเป็นทินไดออกไซด์ได้ทั้งหมด ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 12.01 ถึง 24.35 นาโนเมตร โดยทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 มีค่าน้อยที่สุด และ pH เท่ากับ 6 มีค่ามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเฟสก่อนเริ่มเผาเป็นผลึกทินออกไซด์ที่เล็กที่สุด จึงมีพื้นที่สัมผัสความร้อนมากที่สุด หลังจากเผาจึงเป็นผลึกทินไดออกไซด์ที่ใหญ่ที่สุด โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานใกล้เคียงกันตั้งแต่ 3.55 ถึง 3.64 อิเล็กตรอนโวลต์ ไม่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเนื่องจากพลังงานกระตุ้นที่ใช้ไม่มากพอ ทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 150 และ 250 องศาเซลเซียส ทินออกไซด์จะเปลี่ยนเฟสจากทินไฮดรอกไซด์เป็นเตตระโกนอลทินออกไซด์และเตตระโกนอลทินไดออกไซด์ตามลำดับ โดยขนาดผลึกเฉลี่ยของทินออกไซด์ที่อุณหภูมิเผา 150 องศาเซลเซียส เล็กที่สุดเท่ากับ 12.27 นาโนเมตร และใหญ่ขึ้นเป็น 19.51 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิเผา 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าศักย์ซีตอยู่ที่ 22.4 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเทียบกับเฟสของทินออกไซด์ ทำให้มีการเกาะก้อนกันมากที่สุด ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมีค่า 3.29 อิเล็กตรอนโวลต์ มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเผาที่ 150 องศาเซลเซียส เป็น 36.37 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิเผา 200 และ 150 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมสูงสุดเป็น 98.78 และ 98.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายในเวลา 40 นาที ภายใต้แสงยูวี แต่ที่อุณหภูมิเผา 150 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่การย่อยสลาย 0.13 ต่อนาที ซึ่งเร็วที่สุดเทียบกับการเผาที่อุณหภูมิอื่น โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในที่มีดเป็น 22.59 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของทินออกไซด์ที่เผาตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ไม่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ เนื่องจากแสงยูวีจากแหล่งกระตุ้นมีพลังงานไม่สูงพอ ทินออกไซด์ที่ไม่ผ่านการเผาจะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมดีที่สุดที่ pH

เท่ากับ 2 และทินออกไซด์ที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมดีที่สุดในอุณหภูมิเผา 150 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า 98.78 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 30 นาที ภายใต้แสงยูวี โดยประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำสองรอบลดลงเพียงแค่ 17.4 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ที่เป็นบริบทหลักในการทำปฏิกิริยา

คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเครื่องตีมิซี-วิท มีขนาดประมาณ 2 นาโนเมตร มีการคายสเปกตรัมมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 444 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยสเปกตรัม 355 นาโนเมตร เมื่อตัดแปลงผิวของทินออกไซด์ด้วยคาร์บอนดอท พบว่าถ้าใช้คาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าพื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะเป็นหยักมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวมากขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในที่มีดีสูงที่สุดเป็น 41.42 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 60 นาที โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.22 จนถึง 3.32 อิเล็กตรอนโวลต์ ถ้าใช้คาร์บอนดอท 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าที่น้อยที่สุด ส่วนทินออกไซด์ที่ใช้คาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมากที่สุดเป็น 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตาม ทินออกไซด์ที่ตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอทมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานน้อยกว่าทินออกไซด์ที่ไม่ตัดแปลงผิวด้วยคาร์บอนดอททุกเงื่อนไข ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูของทินออกไซด์ที่ตัดแปลงพื้นผิวด้วยคาร์บอนดอท 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่ามากที่สุดคือ 99.22 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 10 นาที ใต้แสงยูวี

ข้อเสนอแนะ

1. ทินออกไซด์มีขนาดผลึกระดับนาโนเมตรแต่เกาะกลุ่มกันในระดับไมโครเมตร ดังนั้นควรใช้สารชะลอการทำปฏิกิริยา (Capping agent) เพื่อให้ทินออกไซด์ไม่เกาะกลุ่มกัน จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาย่อยสลายสีย้อมได้ดีขึ้น

2. ทินออกไซด์ที่ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ทั้งหมด ดังนั้นควรเลือกเงื่อนไขของทินออกไซด์ที่ไม่เผาในการวิจัยพัฒนาเพิ่ม เนื่องจากเป็นเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ต้นทุนต่ำที่สุด และทำได้ง่ายที่สุด

รายการอ้างอิง

1. Lin, L., H. Yang, and X. Xu, *Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: a review*. *Frontiers in Environmental Science*, 2022: p. 975.
2. Rangabhashiyam, S. and P. Balasubramanian, *Adsorption behaviors of hazardous methylene blue and hexavalent chromium on novel materials derived from *Pterospermum acerifolium* shells*. *Journal of Molecular Liquids*, 2018. **254**: p. 433-445.
3. El-Sayed, G.O., *Removal of methylene blue and crystal violet from aqueous solutions by palm kernel fiber*. *Desalination*, 2011. **272**(1-3): p. 225-232.
4. Lellis, B., et al., *Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms*. *Biotechnology Research and Innovation*, 2019. **3**(2): p. 275-290.
5. Luque, P., et al., *Improved photocatalytic efficiency of SnO₂ nanoparticles through green synthesis*. *Optik*, 2020. **206**: p. 164299.
6. Cui, Y., et al., *Synthesis of novel 3D SnO flower-like hierarchical architectures self-assembled by nano-leaves and its photocatalysis*. *Materials Research Bulletin*, 2015. **70**: p. 784-788.
7. Liang, B., L. Zhang, and W. Zhang, *Preparation of Cl doped SnO powder with excellent photocatalytic property by mechanical alloying*. *Ceramics International*, 2019. **45**(7): p. 8908-8913.
8. Haspulat, B., M. Saribel, and H. Kaniş, *Surfactant assisted hydrothermal synthesis of SnO nanoparticles with enhanced photocatalytic activity*. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020. **13**(1): p. 96-108.
9. Giefers, H., F. Porsch, and G. Wortmann, *Kinetics of the disproportionation of SnO*. *Solid state ionics*, 2005. **176**(1-2): p. 199-207.
10. Smart, L.E. and E.A. Moore, *Solid state chemistry: an introduction*. 2012: CRC press.

11. Doyan, A., et al. *The effect of dopant material to optical properties: energy band gap Tin Oxide thin film*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. IOP Publishing.
12. Holleman, A., E. Wiberg, and N. Wiberg, *Inorganic Chemistry (Translated by Eagleson, M, Brewer, W)*. 2001.
13. ขาวสนิท, โ., การเตรียมคาร์บอนดอทที่ดัดแปลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง. 2022, มหาวิทยาลัยศิลปากร. p. 102.
14. Ozyurt, D., et al., *Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review*. Carbon Trends, 2023: p. 100276.
15. Luque, P., et al., *Efficient sunlight and UV photocatalytic degradation of Methyl Orange, Methylene Blue and Rhodamine B, using Citrusx paradisi synthesized SnO_2 semiconductor nanoparticles*. Ceramics International, 2021. **47**(17): p. 23861-23874.
16. Ulyankina, A.A., A.B. Kuriganova, and N.V. Smirnova, *Photocatalytic properties of SnO_2 - SnO nanocomposite prepared via pulse alternating current synthesis*. Mendeleev Communications, 2019. **29**(2): p. 215-217.
17. รงค์, ข.ภ.ภ.ท., ก.ล.พ. กิจ, and อ.ท. ปรีक्षा, การ ศึกษา ผล ของ การ ดูด ซ้ำ ของ วัสดุ เชิง ประกอบ เค ล ย ใน โครงสร้าง พอลิ เมอร์ และ สมบัติ กายภาพ. 2013, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
18. Lab, T.S.N. *XPS X-Ray Photoemission spectroscopy*. 12 March 2017; Available from: <https://www.slri.or.th/th/bl5-3-xps.html>.
19. Division, S.E.a.R. *Transmission electron microscope: TEM-Hitachi HT7700*. 2024; Available from: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/documents/Sampling_forTEM_Material.pdf.
20. Kaizra, S., et al., *Electrochemical growth of tin (II) oxide films: application in photocatalytic degradation of methylene blue*. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015. **30**: p. 554-560.
21. Lee, J.K., et al., *SnO -decorated TiO_2 nanoparticle with enhanced photocatalytic performance for methylene blue degradation*. Applied Surface Science, 2019. **480**: p. 1089-1092.

22. Liang, B., et al., *Effect of annealing temperature on structure and photocatalytic efficiency of SnO microspheres synthesized by ultrasonic reaction method*. Ceramics International, 2018. **44**(18): p. 23334-23338.
23. Chen, Y., et al., *Facile fabrication of N-doped carbon quantum dots modified SnO₂ composites for improved visible light photocatalytic activity*. Vacuum, 2021. **191**: p. 110371.
24. Garrafa-Galvez, H., et al., *Green synthesis of SnO₂ nanoparticle using Lycopersicon esculentum peel extract*. Journal of Molecular Structure, 2019. **1197**: p. 354-360.
25. Singh, J., et al., *Green synthesis of SnO₂ NPs for solar light induced photocatalytic applications*. Materials Research Express, 2019. **6**(11): p. 115007.
26. González, E.Q., et al., *A Study of the Optical and Structural Properties of SnO₂ Nanoparticles Synthesized with Tilia cordata Applied in Methylene Blue Degradation*. Symmetry, 2022. **14**(11): p. 2231.
27. Honarmand, M., M. Golmohammadi, and A. Naeimi, *Biosynthesis of tin oxide (SnO₂) nanoparticles using jujube fruit for photocatalytic degradation of organic dyes*. Advanced Powder Technology, 2019. **30**(8): p. 1551-1557.
28. Chinchillas-Chinchillas, M.J., et al., *Comparative Study of SnO₂ and ZnO Semiconductor Nanoparticles (Synthesized Using Randia echinocarpa) in the Photocatalytic Degradation of Organic Dyes*. Symmetry, 2022. **14**(10): p. 1970.
29. Gomathi, E., M. Jayapriya, and M. Arulmozhi, *Environmental benign synthesis of tin oxide (SnO₂) nanoparticles using Actinidia deliciosa (Kiwi) peel extract with enhanced catalytic properties*. Inorganic Chemistry Communications, 2021. **130**: p. 108670.
30. Fatimah, I., et al., *One-pot biosynthesis of SnO₂ quantum dots mediated by Clitoria ternatea flower extract for photocatalytic degradation of rhodamine B*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020. **8**(4): p. 103879.
31. Buniyamin, I., et al., *Bio-synthesized Tin Oxide Nanoparticles (SnO₂ NPs) as a Photocatalyst Model*. Malaysia Journal of Invention and Innovation, 2023. **2**(3): p. 1-5.

32. Wicaksono, W.P., et al., *Biofabricated SnO₂ nanoparticles using Red Spinach (Amaranthus tricolor L.) extract and the study on photocatalytic and electrochemical sensing activity*. Materials Research Express, 2020. **7**(7): p. 075009.
33. Liu, W., et al., *One-step synthesis of SnO hierarchical architectures under room temperature and their photocatalytic properties*. Nanotechnology, 2018. **29**(28): p. 284002.
34. Zhang, H., et al., *Carbon dots decorated graphitic carbon nitride as an efficient metal-free photocatalyst for phenol degradation*. Applied Catalysis B: Environmental, 2016. **180**: p. 656-662.
35. Xie, Z., et al., *Construction of carbon dots modified MoO₃/g-C₃N₄ Z-scheme photocatalyst with enhanced visible-light photocatalytic activity for the degradation of tetracycline*. Applied Catalysis B: Environmental, 2018. **229**: p. 96-104.
36. Wallace, A.M., et al., *Accurate determination of the onset wavelength (λ_{onset}) in optical spectroscopy*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2021. **265**: p. 107544.
37. Wang, J., et al., *Controlled synthesis of Sn-based oxides via a hydrothermal method and their visible light photocatalytic performances*. RSC advances, 2017. **7**(43): p. 27024-27032.
38. Bhatnagar, M., et al., *Structural and photoluminescence properties of tin oxide and tin oxide: C core-shell and alloy nanoparticles synthesised using gas phase technique*. AIP Advances, 2016. **6**(9).
39. Jaśkaniec, S., et al., *Solvent engineered synthesis of layered SnO for high-performance anodes*. npj 2D Materials and Applications, 2021. **5**(1): p. 27.
40. Ibarguen, C.A., et al., *Synthesis of SnO₂ nanoparticles through the controlled precipitation route*. Materials Chemistry and Physics, 2007. **101**(2-3): p. 433-440.
41. Mahana, S., et al., *Structural and electronic phase evolution of Tin dioxide*. arXiv preprint arXiv:1606.08137, 2016.

42. Rahaman, M.M., et al., *Structure, morphology and opto-electrical properties of nanostructured indium doped SnO₂ thin films deposited by thermal evaporation*. European Scientific Journal, ESJ, 2016. **12**.
43. Sarker, P. and M.N. Huda, *Understanding the thermodynamic pathways of SnO₂-to-SnO phase transition*. Computational Materials Science, 2016. **111**: p. 359-365.
44. Drake, C. and S. Seal, *Band gap energy modifications observed in trivalent In substituted nanocrystalline SnO₂*. Applied physics letters, 2007. **90**(23).
45. SE, A., et al., *Preparation and characterization of activated carbon from palm kernel shell by chemical activation*. Res. J. Chem. Sci, 2013. **2231**: p. 606X.
46. Zima, T. and I. Bataev, *Morphology and phase transformations of tin oxide nanostructures synthesized by the hydrothermal method in the presence of dicarboxylic acids*. Journal of Solid State Chemistry, 2016. **243**: p. 282-289.
47. Campo, C.M., J.E. Rodríguez, and A.E. Ramírez, *Thermal behaviour of romarchite phase SnO in different atmospheres: a hypothesis about the phase transformation*. Heliyon, 2016. **2**(5).
48. Meybodi, S.M., et al., *Synthesis of wide band gap nanocrystalline NiO powder via a sonochemical method*. Ultrasonics sonochemistry, 2012. **19**(4): p. 841-845.
49. Petrov, T., et al., *SEM AND FT-IR SPECTROSCOPY STUDY OF Cu, Sn AND Cu-Sn NANOPARTICLES*. Journal of the University of Chemical Technology & Metallurgy, 2012. **47**(2).
50. Malik, R., et al., *One-pot hydrothermal synthesis of porous SnO₂ nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutants*. Energy and Environment Focus, 2015. **4**(4): p. 340-345.
51. Haridas, D., et al., *Effect of thickness of platinum catalyst clusters on response of SnO₂ thin film sensor for LPG*. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011. **153**(1): p. 89-95.
52. Li, G., et al., *Ionic liquid stabilizing high efficiency tin halide perovskite solar cells*. Advanced Energy Materials, 2021. **11**(32): p. 2101539.

53. Kwoka, M. and M. Krzywiecki, *Impact of air exposure and annealing on the chemical and electronic properties of the surface of SnO₂ nanolayers deposited by rheotaxial growth and vacuum oxidation*. Beilstein journal of nanotechnology, 2017. **8**(1): p. 514-521.
54. Idriss, H., *On the wrong assignment of the XPS O1s signal at 531–532 eV attributed to oxygen vacancies in photo-and electro-catalysts for water splitting and other materials applications*. Surface science, 2021. **712**: p. 121894.
55. McNulty, D., et al., *Long cycle life, highly ordered SnO₂/GeO₂ nanocomposite inverse opal anode materials for Li-ion batteries*. Advanced Functional Materials, 2020. **30**(51): p. 2005073.
56. Kwoka, M., et al., *Surface properties of SnO₂ nanowires deposited on Si substrate covered by Au catalyst studies by XPS, TDS and SEM*. Nanomaterials, 2018. **8**(9): p. 738.
57. Abdelkarim, S., H. Mohammed, and B. Nouredine, *Sorption of methylene blue dye from aqueous solution using an agricultural waste*. Trends Green Chem, 2017. **3**(1): p. 1-7.
58. Xia, Y., et al., *Comparative adsorption of methylene blue by magnetic baker's yeast and EDTAD-modified magnetic baker's yeast: equilibrium and kinetic study*. Arabian Journal of Chemistry, 2019. **12**(8): p. 2448-2456.
59. Liu, M., *Optical properties of carbon dots: a review*. Nanoarchitectonics, 2020: p. 1-12.
60. Andrade, P.F., G. Nakazato, and N. Durán. *Additive interaction of carbon dots extracted from soluble coffee and biogenic silver nanoparticles against bacteria*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. IOP Publishing.
61. De, B., B. Voit, and N. Karak, *Carbon dot reduced Cu₂O nanohybrid/hyperbranched epoxy nanocomposite: mechanical, thermal and photocatalytic activity*. RSC advances, 2014. **4**(102): p. 58453-58459.
62. Shaikh, A.F., et al., *Bioinspired carbon quantum dots: an antibiofilm agents*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019. **19**(4): p. 2339-2345.

63. Gogoi, N. and D. Chowdhury, *Novel carbon dot coated alginate beads with superior stability, swelling and pH responsive drug delivery*. Journal of Materials Chemistry B, 2014. **2**(26): p. 4089-4099.
64. Piriya, V.A., et al., *Synergistic role of electrolyte and binder for enhanced electrochemical storage for sodium-ion battery*. ACS omega, 2018. **3**(8): p. 9945-9955.
65. Morais, A., et al., *Enhanced photovoltaic performance of inverted hybrid bulk-heterojunction solar cells using TiO₂/reduced graphene oxide films as electron transport layers*. Journal of Photonics for Energy, 2015. **5**(1): p. 057408-057408.
66. Adam, F., et al., *Utilization of tin and titanium incorporated rice husk silica nanocomposite as photocatalyst and adsorbent for the removal of methylene blue in aqueous medium*. Applied Surface Science, 2013. **264**: p. 718-726.
67. Zhang, R., et al., *Morphology modulation of SnO photocatalyst: From microplate to hierarchical architectures self-assembled with thickness controllable nanosheets*. CrystEngComm, 2018. **20**(32): p. 4651-4665.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรเชษฐ สมบูรณ์นะ
วุฒิการศึกษา	14 พฤศจิกายน 2526
ผลงานตีพิมพ์	นครปฐม

