การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์ เจือสังกะสีโดยวิธีโซล-เจล เพื่อสมบัติต้านแบคทีเรีย

SYNTHESIS OF V-DOPED TiO_2 AND Zn-DOPED TiO_2 VIA SOL-GEL FOR ENHANCING ANTIBACTERIAL PROPERTY

สิริพร ทองอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสีโดยวิธีโซล-เจล เพื่อสมบัติต้านแบคทีเรีย

สิริพร ทองอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี โดยวิธีโซล-เจลเพื่อสมบัติต้านแบคทีเรีย Synthesis of V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 via Sol-gel Enhancing Antibacterial Property
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวสิริพร ทองอ่อน
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันท์ทิพ สกุลเขมฤทัย, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์, Ph.D.)

.... กรรมการ
(อาจารย์กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล, ปร.ด.)

.... กรรมการ
(อาจารย์สุมนมาลย์ เนียมหลาง, ปร.ด.)

.... กรรมการ
(อาจารย์ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, Ph.D.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันท์ทิพ สกุลเขมฤทัย, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี โดยวิธีโซล-เจลเพื่อสมบัติต้านแบคทีเรีย
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสิริพร ทองอ่อน
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันท์ทิพ สกุลเขมฤทัย, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

สืบเนื่องจากโรคติดเชื้อในมนุษย์มีสาเหตุจากจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรค เช่น แบคทีเรีย ไวรัส เป็นต้น ซึ่งจุลชีพเหล่านี้พบอยู่รอบๆ ตัวมนุษย์ บนบรรจุภัณฑ์อาหารและในการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติหรือพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียเพื่อต้านเชื้อแบคทีเรียและจุลชีพอื่นๆ ขึ้น เพื่อให้เกิดการปรับปรุงสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของพื้นผิวยางธรรมชาติ จึงได้ทำการเตรียมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม (V-doped TiO_2) และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี (Zn-doped TiO_2) ที่มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกแอคติวิตีและสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียสูงและประยุกต์ใช้กับพื้นผิวผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้ V-doped TiO_2และ Zn-doped TiO_2 เตรียมจากสารตั้งต้น ไทเทเนียม(IV)เอ็น-บิวท็อกไซด์เอทานอล โดยวิธีโซล-เจลภายใต้สภาวะคลื่นไมโครเวฟ ผงที่เตรียมได้นำมาตรวจสอบคุณลักษณะโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) การดูดซับ-คายซับของไนโตรเจน การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโคปี (FT-IR) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis) ไฟเบอร์ออพติคสเปกโทรเมตรี ส่วนสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียทดสอบโดย Time kill assay ผล XRD ของ V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 พบว่า ผงตัวอย่างประกอบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส สเปกตราการดูดกลืนแสงของ V-doped TiO_2และ Zn-doped TiO_2 แสดงการเกิดการเคลื่อนไปทางย่านแสงวิสิเบิล (เรดชิพ) พลังงานช่องว่างแถบพลังงานสำหรับ V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 มีค่า 2.1-2.2 และ 2.9-3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ การศึกษาโฟโตคะตะไลติกแอคติวิตี พบว่าวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีเมทิลีนบลู ประสิทธิภาพในการกำจัดของ V-doped TiO_2 และ

Zn-doped TiO_2 สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารเจือและวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ P-25 สมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มสเปรย์บนผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* ATCC 25922 (*E. coli*) และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (*S. aureus*) ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนผิวผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติแสดงสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียอย่างสูงต่อเชื้อแบคทีเรียทั้ง *E. coli* และ *S. aureus* ด้วยเปอร์เซ็นต์การทำให้เชื้อลดลง 100% สมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (เปอร์เซ็นต์การทำให้เชื้อลดลง 20%) หลังจากตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การเติมสารเจือวาเนเดียมหรือสังกะสียังไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงโฟโตคะตะไลติกแอคติวิตีและสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของพื้นผิวผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ ด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสารเจือวาเนเดียมและสารเจือสังกะสีสำหรับการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

คำสำคัญ: โซล-เจล ไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคนาโน สมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย พลังงานช่องว่างแถบพลังงาน

Thesis Title	Synthesis of V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 via Sol-gel for Enhancing Antibacterial Property
Name – Surname	Miss Siriporn Tong-on
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Chuntip Sakulkhaemaruethai, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Miss Siriporn Larpkiattaworn, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

Infectious diseases in humans are caused by pathogenic microorganisms like bacteria and viruses, which exist in the environment and are found on food packaging. In biomedical applications, natural rubbers or polymers, with antibacterial properties, have been developed to destroy bacteria and other microorganisms. To improve the antibacterial properties of natural rubber surfaces, V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 with high photocatalytic activity and antibacterial activity were prepared and applied on the surfaces of natural rubber products.

In this research, V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 nanoparticles were prepared from titanium (IV) n-butoxide and ethanol using the sol-gel method under microwave radiation. The synthesized powders were characterized by the X-ray diffraction (XRD) technique, N_2 adsorption-desorption measurement, particle size analysis, Fourier Transform Infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), UV-vis spectrophotometry, and fiber optic spectrometry. For the antibacterial property characterization, the time kill assay was used. The XRD patterns of V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 showed that the sample was composed of anatase TiO_2 nanoparticles. The absorption spectra of V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 showed an obvious shift to visible light region (red shift). The band gap energy for the V-doped TiO_2 and Zn-doped TiO_2 values were around 2.1-2.2 eV and 2.9-3.0 eV, respectively. The photocatalytic activity results showed that the synthesized TiO_2

nanoparticles were efficient for the degradation of methylene blue solution. The degradation efficiencies of V-doped $TiO_2$and Zn-doped TiO_2 were higher than those of undoped TiO_2 and P-25 TiO_2 nanoparticles. The antibacterial activity of the sprayed films on natural rubber products was tested against Gram-negative (*Escherichia coli* ATCC 25922, *E. coli*) and Gram-positive (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *S. aureus*) bacteria. The thin film TiO_2 coated natural rubber products presented strong antibacterial property against both *E. coli* and *S. aureus* with the reduction percentage of 100%. The antibacterial property of the thin film containing TiO_2 was significantly decreased (the reduction percentage 20%) after being left at room temperature for 7 days.

The results revealed that the V-doping and Zn-doping to TiO_2 was an effective method in improving the photocatalytic activity and antibacterial property of the natural rubber products. The optimal conditions for V dopant and Zn dopant for the synthesized TiO_2 nanoparticles were 0.2wt% and 1wt%, respectively.

Keywords: sol-gel, titanium dioxide, nanoparticle, antibacterial property, band gap energy

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันท์ทิพ สกุลเขมฤทัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิงห์โต สกุลเขมฤทัย เป็นอย่างสูงที่ให้ทั้งคำแนะนำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สุมลมาลย์ เนียมหลาง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.ศิริพร ลาภเกียรติถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โครงการภาคีบัณฑิตที่สนับสนุนสถานที่ทำวิจัย พร้อมทุนวิจัย เครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัยและวิเคราะห์ทดสอบ   รวมถึงพี่ๆ น้องๆ จากวว. คุณชุมพล บุษบก, คุณปณิตา ทวีถาวร, คุณอริสา ใจอยู่, คุณปิยลักษณ์ เงินชูกลิ่น, คุณพัชฐิฌี สมวงษา, คุณวาสนา ฆ้องวงศ์, คุณลักษณา หวังหมู่กลาง, คุณวรรณงาม, คุณภาสกร, คุณอาจินต์ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ และขอบคุณดร. ภูษิตา วรรนิสสร ฝ่ายวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ที่ช่วยเหลือด้านการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนกำลังใจและกำลังทรัพย์ ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิริพร ทองอ่อน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…………………………….……………………………………… (3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. (5)
กิตติกรรมประกาศ…………………………………………………………………… (7)
สารบัญ…………………………………………………………………………….. (8)
สารบัญตาราง…………………………………………………………………… (10)
สารบัญรูป……………………………………………………………………………. (11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ……………………………………………………….. (14)
บทที่ 1 บทนำ…………………………………………………………………… 15
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา………………………………………………. 15
1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย……………………………………………………… 16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย………………………………………………………….. 17
1.4 ขั้นตอนการวิจัย………………….. …………………………………….. 18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ…………………………………………………… 19
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……………………………………………... 20
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์……………………………………………………… 20
2.2 ปรากฏการณ์โฟโตคะตะไลติก………………………………………………… 23
2.3 กระบวนการ โซล-เจล………………………………………………………. 25
2.4 ตัวอย่างกระบวนการการเคลือบผิววัสดุที่นิยมใช้…………………………………… 27
2.5 แบคทีเรีย………………………………………………………………………. 28
2.6 วาเนเดียมออกไซด์และซิงออกไซด์………………………………………………… 31
2.7 ยางพารา………………………………………………………………………….. 33
2.8 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบที่เกี่ยวข้อง………………………………………… 36
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง………………………………………………………………. 46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย……………………………………………………………………. 55

3.1 วิธีที่ใช้ศึกษา ค้นคว้าและวิจัย……………………………………………………….. 55

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง…………………………………………………….. 56

3.3 วิธีการทดลอง…………………………………………………………………….. 57

3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้…………….. 60

3.5 การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์แบบสเปรย์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ…………………………………………………………………………….. 63

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง………………………………………….. 66

4.1 การเตรียม V-doped TiO_2 โดยกระบวนการโซล-เจล และการวิเคราะห์คุณลักษณะ 66

4.2 การเตรียม Zn-doped TiO_2 โดยกระบวนการโซล-เจล และการวิเคราะห์คุณลักษณะ 74

4.3 การศึกษาโฟโตคะตะลิติก แอคติวิตีของ TiO_2 ที่เตรียมได้……………………… 78

4.4 การศึกษาแอบซอร์พแบนซ์โดยใช้เครื่อง Fiber Optic Spectrometer…………... 79

4.5 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี Time kill assay……………………... 83

4.6 ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่สเปรย์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้…… 86

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง…………………………………………………………………. 102

5.1 วิเคราะห์สมบัติของสารที่สังเคราะห์ได้……………………………………….. 102

5.2 วิเคราะห์สมบัติเมื่อสเปรย์บนผลิตภัณฑ์ยางพารา……………………………... 103

บรรณานุกรม…………………………………………………………………………….. 104

ภาคผนวก……………………………………………………………………………… 111

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนงานวิจัย………………………………………………………………………. 18

ตารางที่ 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมที่มีประสิทธิภาพต้านเชื้อแบคทีเรียต่างๆ……………………………………………………………………… 29

ตารางที่ 2.2 สมบัติวาเนเดียมเพนทอกไซด์……………………………………………………... 30

ตารางที่ 2.3 สมบัติสังกะสีออกไซด์………………………………………………………………. 31

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเปรียบเทียบค่า Visible light (Band gap ennergy) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้……………………………………………………………… 47

ตารางที่ 4.1 ค่าแลททิซพารามิเตอร์ของ V-doped TiO_2………………………………………… 68

ตารางที่ 4.2 ค่าแลททิซพารามิเตอร์ของ Zn-doped TiO_2……………………………………… 74

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบ (Band Gap Energy) ของตัวอย่าง TiO_2 ที่เตรียมได้.. 81

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Particle size(nm) และ BET(m^2/g)………………………………………. 82

ตารางที่ 4.5 ธาตุเชิงปริมาณโดยเครื่อง EDX…………………………………………………….. 94

ตารางที่ 4.6 จำนวนครั้งในการเช็ดออก ตรวจสอบปริมาณที่พบสารประกอบที่พื้นผิวด้วย EDX... 95

ตารางที่ 4.7 จำนวนครั้งเช็ดของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์สารละลาย แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน………………………………………………………………………………. 97

ตารางที่ 4.8 การทดสอบด้วยวิธี Disk diffusion assay ที่ 1วัน และ 7 วัน……………………….. 99

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์……………………………………………… 22

รูปที่ 2.2 การทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์……………….. 24

รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาสำคัญในกระบวนการโซล-เจล ของไทเทเนียมไดออกไซด์……………….. 26

รูปที่ 2.4 กระบวนการโซล-เจลและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์……………………………. 27

รูปที่ 2.5 กระบวนการจุ่มเคลือบ……………………………………………………………… 27

รูปที่ 2.6 กระบวนการอิเล็กโทรเดพอสิท…………………………………………………….. 28

รูปที่ 2.7 (a) *Escherichia coli*. และ (b) *Staphylococcus aureus*……………………………… 29

รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของวาเนเดียมเพนทอกไซด์……………………………………... 31

รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของสังกะสีออกไซด์……………………………………………. 33

รูปที่ 2.10 ต้นยางพารา……………………………………………………………………... 34

รูปที่ 2.11 น้ำยางธรรมชาติ…………………………………………………………………… 35

รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก………………………………………………… 36

รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของ SEM………………………………………………………. 37

รูปที่ 2.14 เครื่อง SEM และ EDX………………………………………………………….. 39

รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของเครื่อง Particle size Analyzer…………………………………. 40

รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ UV-VIS Spectrophotometer…………………………………. 42

รูปที่ 2.17 หลักการทำงานของ FT-IR……………………………………………………… 44

รูปที่ 2.18 กราฟระหว่างความเข้มแสงและความยาวคลื่นจากเครื่อง Fiber optic spectrometer... 46

รูปที่ 2.19 เฟส XRD ของ a) TiO2/SBA-15, b) 1% TiO2/SBA-15, c) 5% TiO2/SBA-15,
d) 10% TiO2/SBA-15 และ e) SBA-15…………………………………………….... 46

รูปที่ 2.20 ภาพถ่าย TEM และ เฟสของ EDX ของตัวอย่าง 5% TiO_2/SBA-15……………..... 47

รูปที่ 2.21 แสดงภาพถ่าย SEM (แถวA) และภาพถ่ายจาก TEM (แถวB) กำลังขยายต่างๆ…….. 49

รูปที่ 2.22 ภาพถ่าย TEM ของ สัดส่วนระหว่าง ไทเทเนียมคลอไรด์ : กรดโอเลอิก :
สารละลายเอทานอล a) 1:4:20, b) 1:5:20, c) 1:6:20 และ d) 1:8:20………………… 50

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.23 ภาพถ่าย SEM ของ a) VO_2, b) V_2O_3 และ c) V_2O_5………………………………. 51

รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างของ a) น้ำยางธรรมชาติแบบตีโฟม
b) น้ำยางธรรมชาติแบบตีโฟมเจือซิลเวอร์นาโน…………………………………. 51

รูปที่ 2.25 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางด้วยเครื่อง SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นผสม ในยางธรรมชาติ (a) ไม่ผสม (b) 1phr (c) 3phr (d) 5phr (e) 10phr (f) 20phr…. 53

รูปที่ 2.26 ทดสอบการต้านแบคทีเรีย a) E. coil และ b) S. aureus ภายใต้รังสียูวี นาน 24 ชม… 54

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการโซล-เจล. 57

รูปที่ 3.2 ลักษณะของสารผสมหลังจากกวนให้เข้ากันและปรับพีเอชด้วยสารละลายกรด……… 58

รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม……………. 59

รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี………………. 60

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (a) undoped TiO_2 (b) V-doped TiO_2 และ (c) P-25 TiO_2….. 67

รูปที่ 4.2 XRD Patterns ของ (a) P-25 TiO_2 และ (b) undoped TiO_2…………………….. ……. 68

รูปที่ 4.3 XRD Patterns ของ (a) V0.2wt%/TiO_2 (b) V0.4wt%/TiO_2 (c) V0.8wt%/TiO_2 และ
(d) undoped TiO_2………………………………………………………………... 69

รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) undoped TiO_2 และ (b) P-25 TiO_2………………………… 70

รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) V0.2wt%/TiO_2 (b) V0.4wt%/TiO_2 และ (c) V0.8wt%/TiO_2 71

รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของ (a) undoped TiO_2 และ (b) P-25 TiO_2………………………………. 72

รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของ (a) V0.2wt%/TiO_2 (b) V0.4wt%/TiO_2 และ (c) V0.8wt%/TiO_2…….. 73

รูปที่ 4.8 สังกะสีออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้………………………………………………………… 74

รูปที่ 4.9 XRD Patterns ของ (a) Zn1wt%/TiO_2 (b) Zn2wt%/TiO_2 (c) Zn4wt%/TiO_2 และ
(d) undoped TiO_2……………………………………………………………….. 75

รูปที่ 4.10 FT-IR patterns ของ a) Zn1wt%/TiO_2 b) Zn2wt%/TiO_2 c) Zn4wt%/TiO_2………….. 76

รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของ (a) Zn1wt%/TiO_2 (b) Zn2wt%/TiO_2 และ (c) Zn4wt%/TiO_2………. 77

รูปที่ 4.12 โฟโตคะตะลิติกแอคติวิตีของ TiO_2 ที่เตรียมได้ โดยศึกษาจากการลดความเข้มข้นของเมทิลีนบลู a) P-25 กับ undoped TiO_2 b) V-doped TiO_2 และ c) Zn-doped TiO_2……… 79

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 ค่าแอบซอร์พแบนซ์ของตัวอย่าง TiO_2 เตรียมที่สภาวะต่าง ๆ……………………… 80
รูปที่ 4.14 แสดงการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay……………………………….. 85
รูปที่ 4.15 ผลิตภัณฑ์หมอนยางพาราที่นำมาตัดเพื่อการทดลอง………………………………… 87
รูปที่ 4.16 ก่อนสเปรย์และหลังสเปรย์บนผลิตภัณฑ์ยางพารา……………………………….. 88
รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่ไม่ได้ทำการสเปรย์………………………… 89
รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ undoped TiO_2 (a) 1วัน และ (b) 7วัน 90
รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ Zn1wt%/TiO_2 (a) 1วัน และ (b) 7วัน 91
รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ V0.2wt%/TiO_2 (a) 1วัน และ (b) 7วัน 92
รูปที่ 4.21 กราฟ EDX ของ non Spay…………………………………………………………. 93
รูปที่ 4.22 กราฟ EDX ของ undoped TiO_2 a) 1วัน และ b) 7วัน…………………………….. 93
รูปที่ 4.23 กราฟ EDX ของ Zn1wt%/TiO_2 a) 1วัน และ b) 7วัน……………………………. 94
รูปที่ 4.24 กราฟ EDX ของ V0.2wt%/TiO_2 a) 1วัน และ b) 7 วัน………………………….. 94
รูปที่ 4.25 กราฟ EDX ตามจำนวนครั้งที่เช็ด undoped TiO_2 a) 0 ครั้ง b) 1ครั้ง c) 2 ครั้ง d) 3 ครั้ง 96
รูปที่ 4.26 กราฟ EDX ตามจำนวนครั้งที่เช็ด Zn1wt%/TiO_2 a) 0 ครั้ง b) 1 ครั้ง c) 2 ครั้ง d) 3 ครั้ง e) 4 ครั้ง……………………………………………………………………………. 97
รูปที่ 4.27 กราฟ EDX ตามจำนวนครั้งที่เช็ด V0.2wt%/TiO_2 a) 0 ครั้ง b) 1ครั้ง c) 2 ครั้ง d) 3 ครั้ง 98
รูปที่ 4.28 แสดงการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay เชื้อแบคทีเรีย a) *E.coli* และ b) *S.aureus*…………………………………………………………………………….. 101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์
V	วาเนเดียมออกไซด์
Zn, ZnO	สังกะสีออกไซด์
eV	อิเล็กตรอนโวลท์
μm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
SEM	Scanning Electron Microscopy
XRD	X-rayDiffraction
BET	The Brunauer-Emmett-Teller
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
P-25	อนุภาคนาโนไทเทเนียม P-25
m^2/g	ตารางเมตรต่อกรัม
TTIP	Titanium Tetra Isopropoxide
HCl	กรดไฮโดรคลอลิก
ml	มิลลิลิตร
h	ชั่วโมง
M	โมลาร์
H_2O	น้ำ
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
kV	กิโลโวลต์
E. coil	แบคทีเรียชนิด *Escherichia coli.*
S. aureus	แบคทีเรียชนิด *Staphylococcus aureus*
λ	ความยาวคลื่น
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
cm	เซนติเมตร
N	ไนโตรเจน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประชาชนส่วนใหญ่ปัจจุบันให้ความสนใจต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยมากขึ้น เนื่องจากเกิดโรคภัยไข้เจ็บได้ง่ายจากการติดเชื้อที่ดำรงอยู่ในสภาพแวดล้อมหรือตามพื้นผิวของใช้ในชีวิตประจำวันโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์จากยางพารา ซึ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น หมอนยางพารา ที่นอนยางพารา พื้นรองเท้า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้งานผลิตภัณฑ์จากยางพารามีความเสี่ยงต่อสุขอนามัยของมนุษย์จากการเป็นแหล่งสะสมเชื้อต่าง ๆ โดยเฉพาะแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดโรค ทั้งชนิดที่แสดงออกทันทีหรือชนิดที่สะสมในร่างกาย ทำให้ร่างกายมีภูมิคุ้มกันต่ำลง ด้วยเหตุนี้ การป้องกันแบคทีเรียโดยทำให้ผลิตภัณฑ์จากยางพาราข้างต้นมีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียหรือเป็นผลิตภัณฑ์ปลอดเชื้อ จึงเป็นสิ่งที่ควรศึกษาและเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขอนามัยของมนุษย์ต่อไป

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นวัสดุประเภทออกไซด์ที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของสี ด้วยคุณสมบัติเป็นสารสีขาว สามารถดูดกลืนและหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสงและความร้อน นิยมใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้วและกระจก อุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง การผลิตสุขภัณฑ์ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะและเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ใช้ในส่วนผสมในเครื่องสำอาง ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผงละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว

ปัจจุบัน ได้มีการนำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างในระดับนาโนมาประยุกต์ใช้ในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งในน้ำและอากาศ เนื่องจากมีสมบัติที่พื้นผิวในการสลายสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บางชนิดที่ก่อให้เกิดมลภาวะในน้ำ อากาศ หรือในดินได้ ตลอดจน

สามารถต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต [1, 2] การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการตอบสนองต่อแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต ซึ่งมีในสัดส่วนปริมาณน้อยในแสงอาทิตย์หรือแสงธรรมชาติ ดังนั้น หากพัฒนาให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ตอบสนองต่อแสงในย่านวิสิเบิลหรือแสงในย่านที่มองเห็นได้ด้วยตามนุษย์ จะทำให้การประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางขึ้น

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดปริมาณการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมสารเจือแล้วมีผลทำให้ประสิทธิภาพการต้านแบคทีเรียของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น [3] แม้จะใช้ในปริมาณน้อยลงมากก็ตาม ในงานวิจัยนี้สนใจสารเจือประเภทวาเนเดียม เพราะเป็นตัวคะตะลิสต์ที่ดี และมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเป็นสารเจือแม้ใช้ในปริมาณน้อย [4-7] และสารเจือประเภทสังกะสี เพราะสารประกอบของสังกะสี เช่น ซิงค์ออกไซด์ นิยมใช้เป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพในยางพารา [8-9]

จากความต้องการในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ และด้วยประสิทธิภาพในการต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการทำให้พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ มีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียโดยใช้วิธีทำเป็นสารแขวนลอย แล้วฉีดพ่นลงบนผิวผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ เพื่อศึกษาการต้านแบคทีเรียเทียบกับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ไม่ได้ฉีดพ่น องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยดังกล่าวและต้นแบบผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีพื้นผิวในการต้านเชื้อแบคทีเรียจะช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตสำหรับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวานาเดียมกับสังกะสีด้วยวิธีโซล-เจลที่อุณหภูมิต่ำ

1.2.2 ศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส สมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารเจือ

1.2.3 ศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโดยกระบวนการโซล-เจล ที่อุณหภูมิต่ำ ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือที่เตรียมได้ โดย

- เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis, XRD)
- เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface Area Analyzer, BET)
- ขนาดอนุภาค (Particle size Analyzer)
- โฟโตคะตะลิติกแอคทิวิตี โดยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis spectrophotometry)
- ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย

1.3.2 ศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

1.3.3 การประยุกต์ใช้วิธีการและสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ศึกษาจากข้อ 1- 3 ในการทำชิ้นงานยางธรรมชาติเพื่อต้านเชื้อแบคทีเรีย

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนงานวิจัย

หัวข้อ	ต.ค.-ธ.ค. 2558	ม.ค.-มี.ค. 2559	เม.ย.-มิ.ย. 2559	ก.ค.-ก.ย. 2559	ต.ค. –ธ.ค. 2559	ม.ค.-ก.พ. 2560	ก.พ.-เม.ย. 2560	เม.ย.-พ.ค. 2560
1. ตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	↔							
2. วางแผนทดลองและเตรียมอุปกรณ์การทดลอง	↔							
3. สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี, วาเนเดียม		↔	↔	↔	↔			
4. ทดสอบสมบัติของสารที่เตรียมได้			↔	↔	↔			
5. ทดสอบสมบัติโฟโตแคตะลิสและการต้านแบคทีเรียของสารที่เตรียมได้				↔	↔	↔	↔	
6. นำสารสังเคราะห์ที่ได้มาทดสอบการต้านแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ					↔	↔	↔	
7. วิเคราะห์ สรุป							↔	
8. เขียนเล่ม รายงานวิจัย								↔

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่ต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียด้วยสารสังเคราะห์จากไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการโซล-เจล

1.5.2 ได้ผลงานวิชาการที่สามารถเผยแพร่ในวาสารการวิจัยระดับชาติหรือนานาชาติ อย่างน้อย 1 เรื่อง และ/หรือสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์อย่างน้อย 1 เรื่อง

1.5.3 มีผู้นำผลที่ได้จากการทำงานวิจัยนี้ไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำประเภทเซรามิกออกไซด์ชนิดหนึ่งที่สามารถเตรียมให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ และได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษสูง ราคาไม่แพงมาก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [10] ใช้เปลี่ยนพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) [11-12] ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรหรือนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Nano-titanium dioxide) เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้พลังงานแสงซึ่งเป็นพลังงานสะอาดกระตุ้นผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โดยฉายแสงยูวีไปยังสารกึ่งตัวนำในน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

สมบัติเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ [13]

- มวลโมเลกุล 79.9 กรัม/โมล
- ความหนาแน่น 3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส
- จุดหลอมเหลว 1,850 องศาเซลเซียส
- ไม่ละลายน้ำ

สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไทเทเนียมไดออกไซด์

– สถานะภาพเป็นของแข็งสีขาว
– พื้นที่ผิว 50 ตารางเมตร/กรัม
– ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร
– ความหนาแน่น 130 กรัม/ลิตร
– ความถ่วงจำเพาะ 0.7 กรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร
– Modulus of Rupture 140 MPa
– กำลังแรงกด 680 MPa

– Poisson’s Ratio 0.27

– Fracture Toughness 3.2 Mpa.m-1/2

– Shear Modulus 90 GPa

– Modulus of Elasticity 230 GPa

– Microhardness (HV0.5) 880

– Dielectric Constant (1MHz) 85

– Dissipation factor (1MHz) 5×10^{-4}

– Dielectric strength 4 $kVmm^{-1}$

– Thermal expansion (RT-1000°C) 9×10^{-6}

– Thermal Conductivity (25°C) 11.7 WmK^{-1}

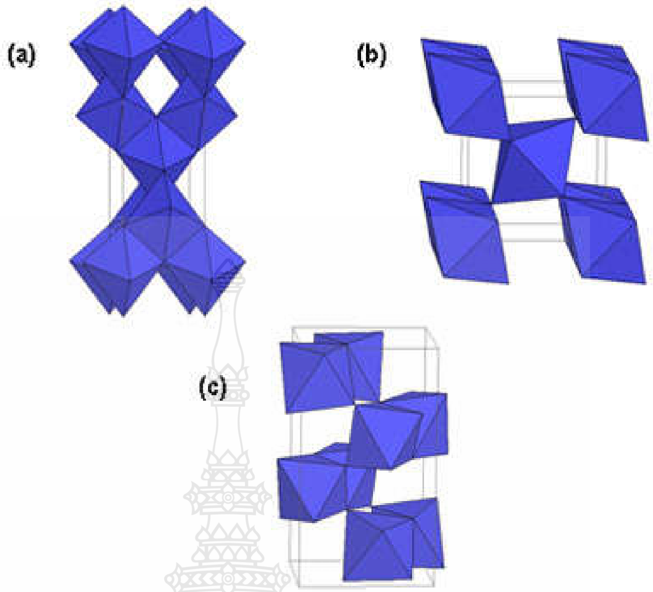
โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ตามธรรมชาติมี 3 โครงสร้างหลัก ๆ คือ

1. อนาเทส (Anatase) เป็นโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) แสดงดังรูปที่ 2.1(a) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

2. รูไทล์ (Rutile) เป็นโครงสร้างแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) แสดงดังรูปที่ 2.1(b) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง

3. บรูคไคท์ (Brookite) เป็นโครงสร้างผลึกแบบออร์โทรอมบิก (Orthorhombic) แสดงดังรูปที่ 2.1(c) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

ซึ่งทั้งสามโครงสร้างผลึกที่แสดงในรูปของ TiO_2^{6-} ที่เป็นออกตะฮีดรอล (Octahedral) มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดจากการเรียงต่อกันโดยทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล โครงสร้างและสมบัติของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ [13] (a) อนาเทส (Anatase) (b) รูไทล์ (Rutile) และ (c) บรูคไคท์ (Brookite)

ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์ [13]

การนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆ ได้แก่

1. ใช้เป็นสารให้สี ในอุตสาหกรรมสี ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารสีขาวในส่วนผสมสีทาบ้าน สามารถดูดกลืนและหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ พลาสติก แก้ว กระจก กระเบื้อง สุขภัณฑ์ เซรามิก เคลือบผิวโลหะ เคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะและเคลือบติดผิวได้ง่าย ทนทานต่อการกัดกร่อน การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ช่วยลดต้นทุนการผลิตและลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้

3. ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

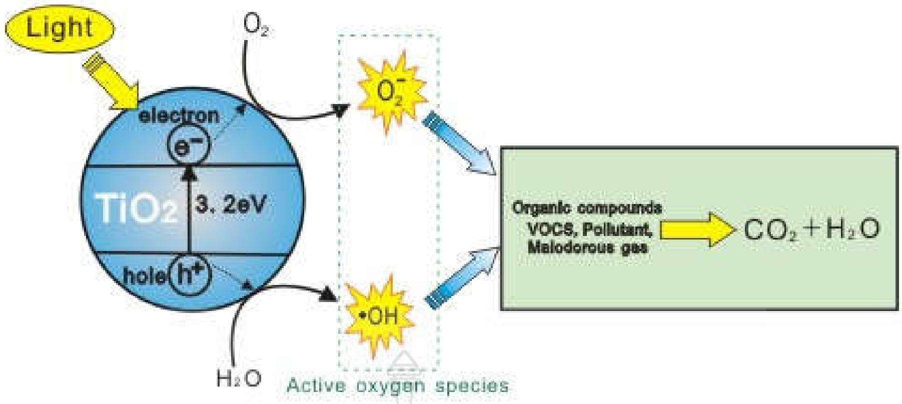
4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาทับ เป็นต้น ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสม สามารถสะท้อนและหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว

6. ใช้ในการบำบัดมลพิษ เช่น มลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารดูดซับมลพิษ เมื่อได้รับแสงและความร้อน จะแตกตัวให้สารและรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัด และต้านเชื้อจุลินทรีย์

2.2 ปรากฏการณ์โฟโตคะตะไลติก

ปรากฏการณ์โฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic effect) แสดงดังรูปที่ 2.2 เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อแสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) เช่น แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) หรือแสงยูวี (UV) ตกกระทบยังผิววัสดุ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการดูดกลืนแสง ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ถูกกระตุ้นและอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ (Conduction band) เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals ($OH^{\cdot}$)) และซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันดังกล่าว จะทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile organic compounds: VOCs) และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์กลายเป็นน้ำ ส่วนซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.2 การทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ [15]

ด้วยสมบัติพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส [16] ที่ช่วยฟอกอากาศ ต้านเชื้อแบคทีเรียและการป้องกันคราบยึดเกาะพื้นผิว อีกทั้งไม่เสื่อมสภาพหลังการใช้งาน ทำความสะอาดง่าย ไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทำให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถูกนำไปใช้ในสินค้าต่างๆ ทั้งสินค้าสุขภาพ เครื่องสำอาง เสื้อผ้า อาหารและเครื่องดื่ม ตลอดจนสินค้าเกี่ยวกับบ้านและสวน

กลไกการต้านเชื้อแบคทีเรียของไทเทเนียมไดออกไซด์

การต้านเชื้อแบคทีเรีย เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^+) และซุปเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) ออกมาสู่อากาศ และอะตอมดังกล่าวจะเข้าดึงอะตอมไฮโดรเจน และคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่น ทำให้เชื้อแบคทีเรีย และสารมลพิษต่างๆสลายตัวไป

การบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC_s) ด้วยการผ่านแสงอุลตร้าไวโอเลตในช่วงคลื่น 300-400 นาโนเมตร จะทำให้เกิดปลดปล่อยไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^+) และซุปเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) เข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็นกรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง

บำบัดมลพิษในน้ำ ด้วยการให้แสงแก่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยปลดปล่อยไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^+) และซุปเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.3 กระบวนการโซล-เจล

กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process) เป็นกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์ออกไซด์ของสารอนินทรีย์ โดย “โซล (sol)” หมายถึง อนุภาคของแข็งที่เป็นคอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในของเหลวอย่างมีเสถียรภาพ ส่วน “เจล (gel)” หมายถึง ของแข็งที่มีโครงสร้างร่างแหใน 3 มิติ และเต็มไปด้วยรูพรุน [17]

ในกระบวนการโซล-เจลนั้น เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ในโซลเกิดพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) จะได้เจลซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งที่มีรูพรุน กระบวนการโซล-เจลนี้สามารถใช้เคลือบผิววัสดุต่าง ๆ เช่น แก้ว ไม้ พลาสติก กระดาษ โลหะ สิ่งทอ ฯลฯ ได้โดยอาศัยเทคนิคการเคลือบผิวทั่วไป

ข้อดีของกระบวนการโซล-เจล คือ ทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ และปรับปรุงโครงสร้างได้หลากหลาย สามารถควบคุมอนุภาคหรือชั้นของออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดระดับนาโนเมตรได้ ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ สารเติมแต่ง และสภาวะที่ทำการทดลอง สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เช่น อัลคอกไซด์ของโลหะหรือกึ่งโลหะ ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น M(OR)x เมื่อ M คือโลหะหรือกึ่งโลหะ R คือ alkyl group และ x, z เป็นเวเลนซ์ของโลหะหรือกึ่งโลหะ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

$$M(OR)_x + xH_2O \longrightarrow (HO)x - M(OR)_{z-x} + xROH \; ; 0 < x < z$$

$$M(OR)_z + zH_2O \longrightarrow M(OH)_z + zROH$$

ปฏิกิริยาควบแน่น

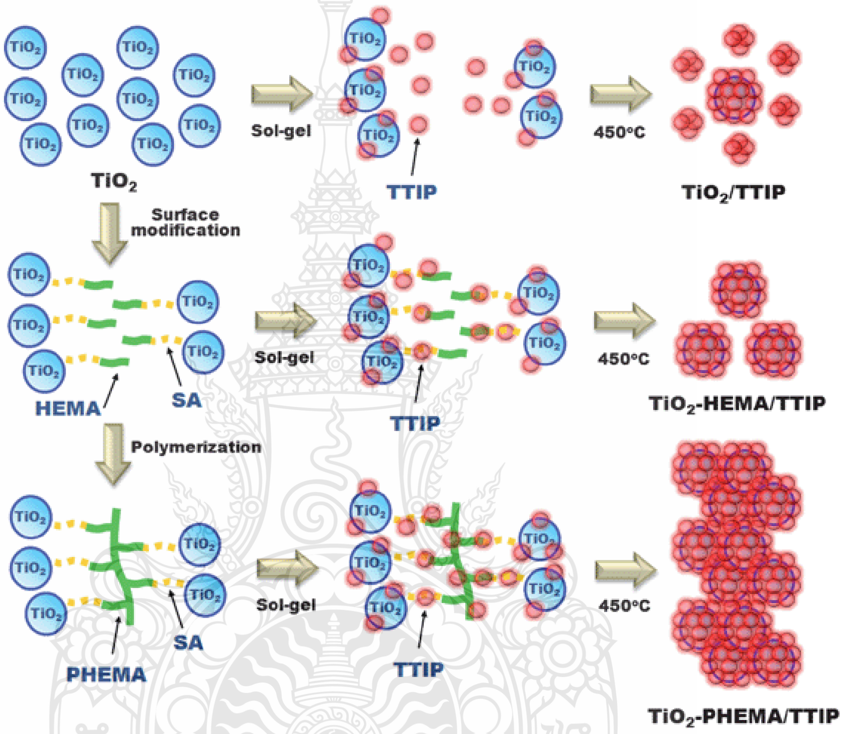
$$(RO)_{z-1}M\text{-}OH + HO\text{-}M(RO)_{z-1} \rightarrow (RO)_{z-1}M\text{-}O\text{-}M(OR)_{z-1} + H_2O$$

$$(RO)_{z-1}M\text{-}OH + HO\text{-}M(RO)_{z-1} \rightarrow (RO)_{z-1}M\text{-}O\text{-}M(OR)_{z-1} + ROH$$

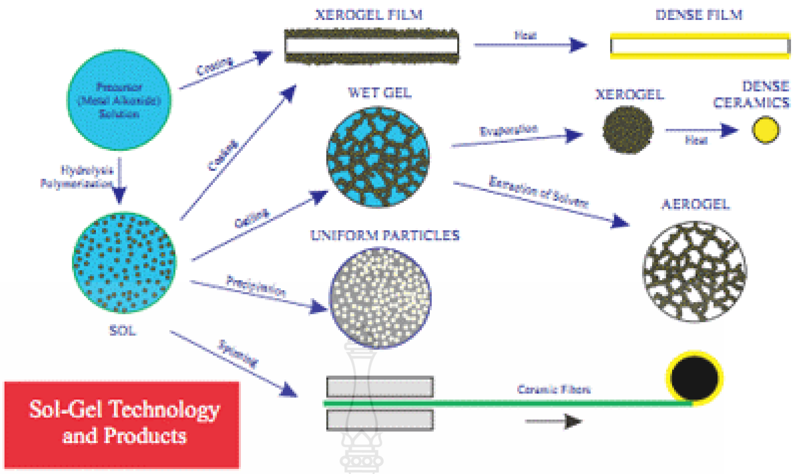
ผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้คือแอลกอฮอล์ ROH ที่สามารถระเหยออกไปได้

สารตั้งต้นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สารประกอบที่มีพันธะ M-O-R โดย M คือโลหะหรือกึ่งโลหะ และ -R เป็นหมู่อัลคิล เช่น Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) หรือ Tetraethyl orthosilicate ($Si(OC_2H_5)_4$) หรือ TEOS เป็นสารที่ศึกษามากที่สุด เนื่องจากควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายและมีราคาถูก

ปฏิกิริยาสำคัญในกระบวนการโซล-เจล ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นของสารอัลคอกซีไซเลน กระบวนการโซล-เจลของสารอัลคอกซีไซเลนสามารถใช้กรดหรือเบสเพื่อเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ แต่ในระบบจะต้องมีน้ำซึ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการไฮโดรไลซิส และอาจผสมแอลกอฮอล์เพื่อช่วยในการละลายสารตั้งต้น ในกระบวนการโซล-เจลที่เร่งปฏิกิริยาด้วยกรดจะได้เจลที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่พอลิเมอร์เส้นตรงยาวพันกัน ขณะที่การเร่งปฏิกิริยาด้วยเบสจะได้โครงสร้างเจลที่มีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ระหว่างอนุภาคที่ยึดติดกัน กระบวนการโซล-เจลและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาสำคัญในกระบวนการโซล-เจลของไทเทเนียมไดออกไซด์ [17]

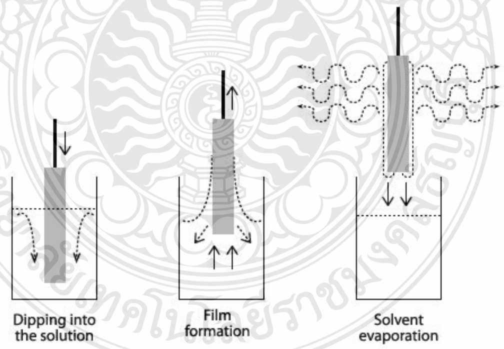


รูปที่ 2.4 กระบวนการโซล-เจลและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ [18]

2.4 ตัวอย่างกระบวนการการเคลือบผิววัสดุที่นิยมใช้อื่นๆ

1) กระบวนการจุ่มเคลือบ

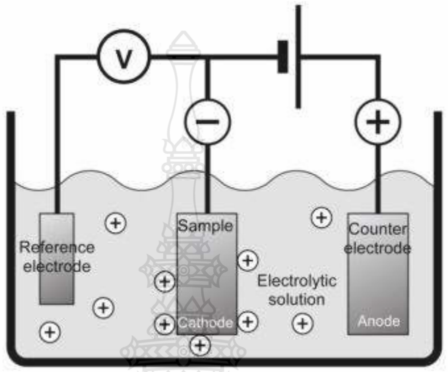
กระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating process) เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการนำสารละลายที่เตรียมได้จากกระบวนการมาทำการจุ่มเคลือบตัวกลางที่ต้องการ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคบนพื้นผิวของตัวกลางที่ต้องการจึงเกิดเป็นฟิล์มบางขนาดนาโนขึ้น จากนั้นฟิล์มบางนาโนที่ได้ไปให้ความร้อน เพื่อทำให้ฟิล์มสามารถยึดติดบนผิวของแผ่นรองรับได้ดี [19]



รูปที่ 2.5 กระบวนการจุ่มเคลือบ [19]

2) กระบวนการอิเล็กโทรเดพอสิท

กระบวนการอิเล็กโทรเดพอสิท (Electrodeposition process) เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการทำให้โลหะไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า ทำให้โลหะไอออนที่อยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยโลหะไอออนจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบของอิเล็กโทรดและเปลี่ยนสภาพเป็นโลหะที่เป็นของแข็งเกาะอยู่ที่ขั้ว นิยมใช้ในการเตรียมท่อนาโน ฟิล์มบางนาโน



รูปที่ 2.6 กระบวนการอิเล็กโทรเดพอสิท [20]

2.5 แบคทีเรีย

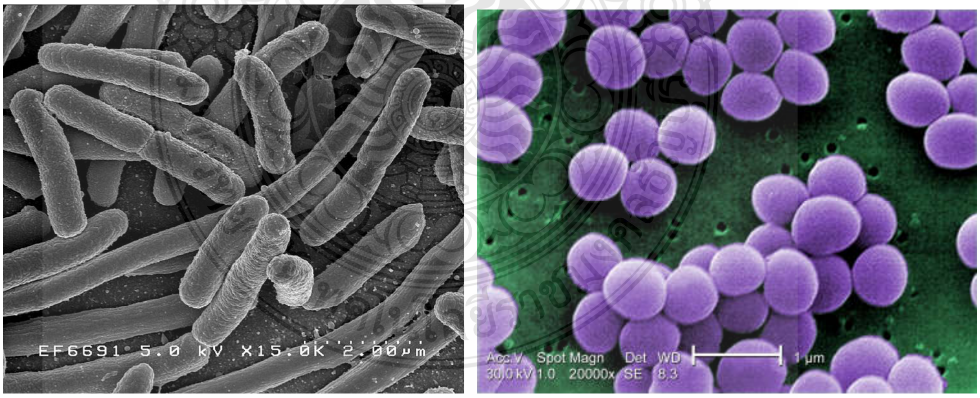
แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น (Microorganism) มีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม แบคทีเรียบางชนิดสามารถทำให้เกิดโรคในมนุษย์ได้ แบคทีเรียบางชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง แบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถอยู่เป็นอิสระนอกร่างกายมนุษย์ได้ มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่จำเป็นจะต้องอาศัยอยู่ในเซลล์ของมนุษย์เพื่อการดำรงชีวิตการจะมองเห็นตัวแบคทีเรียนั้นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงอย่างน้อย 400 ถึง 1,000 เท่า รูปร่างของแบคทีเรียที่มองเห็นได้นั้นมีหลายรูปร่าง เช่น รูปร่างกลมซึ่งเรียกว่า คอคคัส (Coccus) และ รูปร่างเป็นแท่งเรียกว่า บาซิลลัส (Bacillus) มีได้ทั้งเป็นแท่งสั้นและเป็นแท่งยาว อยู่รวมเป็นกลุ่ม อยู่เดี่ยวๆ หรือเรียงตัวต่อกันเป็นสายคล้ายสายสร้อย เป็นต้น ซึ่งรูปร่างของแบคทีเรียเหล่านี้เป็นสิ่งที่ใช้บอกชนิดของแบคทีเรียเบื้องต้นได้ นอกจากนั้น การที่จะมองเห็นตัวเชื้อแบคทีเรียได้ยังจำเป็นต้องย้อมสีแบคทีเรียเสียก่อน

วิธีย้อมสีแบคทีเรียทางการแพทย์เรียกว่าการย้อมสีแกรม (Gram stain) ซึ่งเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดจะติดสีแกรมแตกต่างกันไป ถ้าติดสีน้ำเงินเรียกว่าติดสีแกรมบวก (Gram positive) ถ้าย้อมแล้ว

แบคทีเรียติดสีแดงเรียกว่าติดสีแกรมลบ (Gram negative) การติดสีบนแกรมที่แตกต่างกันนี้สามารถนำมาใช้บอกชนิดของแบคทีเรียเบื้องต้นได้เช่นกัน แบคทีเรียที่มักพบบ่อยได้แก่

- *Escherichia coli* หรือ *E. coli* (อี. โคไล) เป็นแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม เป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria) รูปร่างเป็นแท่ง (rod shape) แสดงดังรูปที่ 2.7(a) เจริญได้ทั้งที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน อยู่ในวงศ์ Enterobacteriaceae และเป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์ม (coliform) ประเภท fecal colilorm เป็นตัวชี้การปนเปื้อนของอุจจาระในน้ำ พบตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์ แบคทีเรียชนิดนี้ทำให้เกิดอาการท้องเสีย ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลวหรือเป็นน้ำทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ แต่อาการมักไม่รุนแรง เพราะทั้งเด็กและผู้ใหญ่มักมีภูมิต้านทานอยู่บ้างแล้ว เนื่องจากได้รับเชื้อนี้เข้าไปทีละน้อยอยู่เรื่อยๆ เชื้อนี้มักปนเปื้อนมากับอาหาร น้ำ หรือมือของผู้ประกอบอาหาร ปกติเชื้อเหล่านี้อาจพบในอุจจาระได้อยู่แล้วแม้จะไม่มีอาการ มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น พม่า ไทย ลาว กัมพูชา อินโดนีเซีย

- *Staphylococcus aureus* หรือ *S. aureus* (เอส. ออเรียส) เป็นแบคทีเรียก่อโรคที่สำคัญในอาหาร แบคทีเรียชนิดนี้ย้อมติดสีแกรมบวก (Gram positive bacteria) มีรูปร่างเป็นทรงกลม (coccus) อยู่รวมกันเป็นพวงคล้ายพวงองุ่น แสดงดังรูปที่ 2.7 (b) ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming bacteria) ไม่เคลื่อนไหว ส่วนใหญ่ไม่มีแคปซูล ให้ผลบวกในการทดสอบ catalase และในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะสลายน้ำตาลกลูโคสให้กรดอินทรีย์ จัดอยู่ในกลุ่ม facultative anaerobe คือ เจริญได้ในที่มีอากาศและไม่มีอากาศ แต่เจริญได้ดีกว่าในสภาวะที่มีอากาศ *S. aureus* สร้างสารพิษ (toxin) ชนิดเอนทีโรทอกซิน (enterotoxin) สารพิษที่สร้างมีสมบัติพิเศษ คือ ทนความร้อน [21]



(a) (b)

รูปที่ 2.7 แบคทีเรีย (a) *Escherichia coli.* และ (b) *Staphylococcus aureus* [21]

การศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมที่มีประสิทธิภาพต้านเชื้อแบคทีเรียต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	เชื้อแบคทีเรีย	อ้างอิง
TiO_2–Sn^{4+} (thin film)	*Escherichia coli, Staphylococcus aureus*	Sayılkan *et al*. (2009) [22]
TiO_2, ZnO (suspension)	*Staphylococcus aureus*	Palominos *et al*. (2009) [14]
TiO_2, ZnO	*Staphylococcus aureus*	Yuzheng *et al*. (2014) [23]
ZnO	*Escherichia coli*	Yunhong *et al*. (2016) [24]
Ag/TiO_2	*Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Pseudomonas aeruginosa*	Li *et al*. (2011) [16]
TiO_2	*Escherichia coli*	Caballero *et al*. (2009) [1]
N-TiO_2	*Bacillus subtillis varniger*	Ming-Fang *et al*. (2006) [25]
TiO_2, V	*Escherichia coli, Staphylococcus aureus*	Sue-min *et al*. (2010) [4]
TiO_2, V	*Escherichia coli*	Ranjith *et al*. (2012) [26]

2.6 วาเนเดียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์

2.6.1 วาเนเดียมออกไซด์ [5-6]

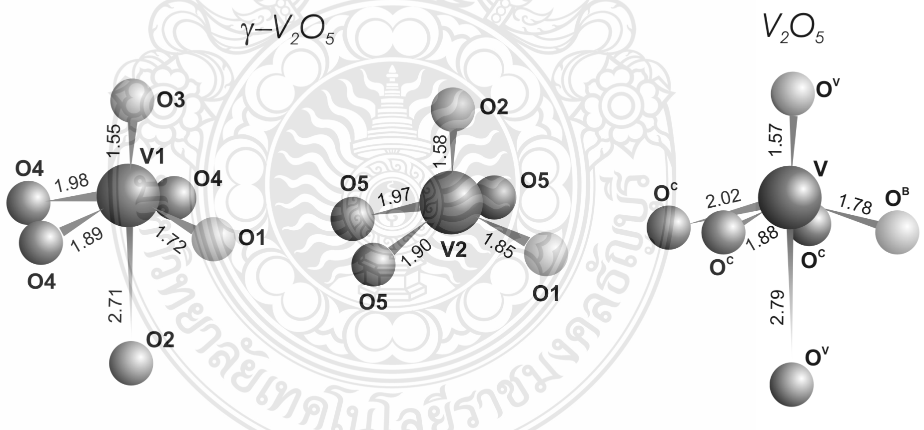
วาเนเดียมออกไซด์ มีโครงสร้างต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้ประโยชน์ [7] อุตสาหกรรมที่นำวาเนเดียมออกไซด์มาใช้ เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก ส่วนมากใช้ผสมเหล็กเป็นโลหะเจือ เพื่อเพิ่มสมบัติในการดึงเป็นเส้นได้ดีขึ้น สมบัติของวาเนเดียมออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.2

80 % ของวาเนเดียมที่ผลิตขึ้นใช้ทำ ferrovanadium และวาเนเดียมคาร์ไบด์ (VC) เพื่อใช้เติมกับเหล็กกล้า 11 % ใช้ทำโลหะเจือกับอะลูมินัม (V-Al)

วาเนเดียมในรูปวาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) วาเนเดียมเพนทอกไซด์ใช้ในปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเตรียมกรดซัลฟิวริก ส่วน $VOCl_3$ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเพื่อเตรียมยางเอทีลีน-โพรพิลีน

ตารางที่ 2.2 สมบัติวาเนเดียมเพนทอกไซด์ [5]

ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	วาเนเดียม, V, 23
อนุกรมเคมี	โลหะแทรนซิชัน
หมู่ คาบ บล็อก	5, 4, d
ลักษณะ	สีเหลือง ส้ม
มวลอะตอม	50.9415 กรัม/โมล
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่นที่ใกล้จุดหลอมเหลว	5.5 กรัม/ ซม.^{3}
จุดเดือด/จุดหลอมเหลว	3680 K(3407 °C)/ 2183 K (1910 °C)
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.89 J/(mol·K)
การละลายในน้ำ	0.1 กรัม/ 100 มิลลิลิตร



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของวาเนเดียมเพนทอกไซด์ [5]

2.6.2 สังกะสีออกไซด์ (ZnO)

สังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมี ZnO มีลักษณะเป็นผงที่ไม่ละลายในน้ำและใช้ผสมในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว น้ำมันเครื่อง สีทาผนัง สารยึดเกาะ อาหาร แบตเตอรี และอื่น ๆ ในธรรมชาติพบในรูปซินไซต์ แต่ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ สมบัติของสังกะสีออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.3

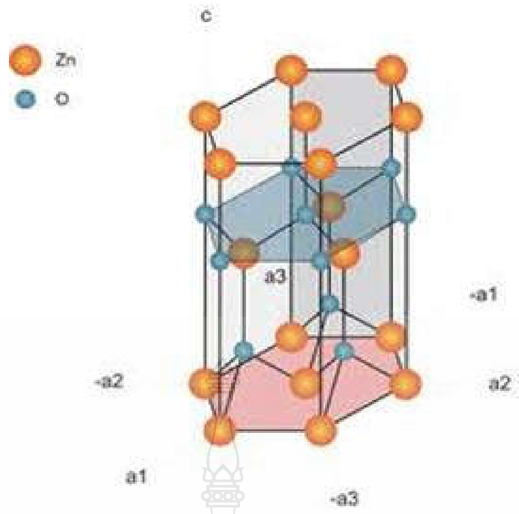
ในสมัยโบราณเรียกฝุ่นจีน หญิงจีนและญี่ปุ่นใช้เป็นแป้งผัดหน้า ใช้ผสมในยาแก้ฝีหนอง โรคผิวหนัง ปัจจุบันใช้ผสมในเครื่องสำอาง

สังกะสีออกไซด์ เป็นสารที่ใช้ต้านแบคทีเรีย (Antibacterial agent) ตามธรรมชาติและไม่มีความเป็นพิษ นอกจากต้านแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและต้านแบคทีเรียในระยะเริ่มแรกลดโอกาสการเปลี่ยนรูปของแบคทีเรีย เนื่องจากเหตุผลนี้ สังกะสีออกไซด์จึงเป็นสารที่สำคัญสารหนึ่งในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย ยิ่งไปกว่านั้นจากการศึกษาพบว่าเมื่อผ่านกระบวนการที่ทำให้สังกะสีออกไซด์มีอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนเมตร จะทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรียได้อย่างดีมากโดยไม่จำเป็น ต้องใช้แสงอัลตราไวโอเลต (UV) ในการเร่งปฏิกิริยา [8]

สังกะสีออกไซด์ระดับอนุภาคนาโนถูกใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว ช่วยในการยืดอายุการใช้งานของยางและใช้ในการผลิตยางที่สามารถป้องกันรอยขูดขีด [8]

ตารางที่ 2.3 สมบัติสังกะสีออกไซด์ [8]

ชื่อ, สัญลักษณ์	สังกะสี, Zn
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชั่น
หมู่, คาบ, บล็อก	5, 4, d
ลักษณะ	สีขาว
มวลอะตอม	81.38 กรัม/โมล
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่นที่ใกล้จุดหลอมเหลว	5.6 กรัม/ ซม.^{3}
จุดเดือด/จุดหลอมเหลว	2633 K(2360 °C)/ 2248 K (1975 °C)
ความร้อนจำเพาะ	(25°C) 24.89 J/(mol·K)
การละลายในน้ำ	ไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของสังกะสีออกไซด์ [8]

2.7 ยางพารา

ยางพาราเป็นไม้ยืนต้น ลักษณะต้นยางพารา มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำแอมะซอน ประเทศบราซิลและประเทศเปรู ทวีปอเมริกาใต้ โดยชาวพื้นเมืองเรียกว่า "เกาชู" (cao tchu) แปลว่า ต้นไม้ร้องไห้ จนถึงปี พ.ศ. 2313 (ค.ศ. 1770) โจเซฟ พรีสต์ลีย์ พบว่ายางสามารถนำมาลบรอยดำของดินสอได้ จึงเรียกว่ายางลบหรือตัวลบ (rubber) ซึ่งเป็นศัพท์ใช้ในประเทศอังกฤษและประเทศเนเธอร์แลนด์เท่านั้น ศูนย์กลางของการเพาะปลูกและซื้อขายยางในอเมริกาใต้แต่ดั้งเดิมอยู่ที่รัฐปารา (Para) ของประเทศบราซิล ยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า ยางพารา [27]

รูปที่ 2.10 ต้นยางพารา [27]

ยางพาราเป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ มีอายุยืนยาวหลายสิบปีเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ

ลักษณะของราก - เป็นระบบรากแก้ว

ลักษณะของลำต้น - กลมตรง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

1. เนื้อไม้ ยางพาราจัดเป็นไม้เนื้ออ่อน เนื้อไม้มีสีขาวปนเหลืองอยู่ด้านในกลางลำต้น

2. เยื่อเจริญ เป็นเยื่อบางๆอยู่โดยรอบเนื้อไม้มีหน้าที่สร้างความเจริญเติบโตให้กับต้นยาง

3. เปลือกไม้ เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเยื่อเจริญออกมาด้านนอกสุด ช่วยป้องกันอันตรายที่จะมากระทบต้นยาง เปลือกของต้นยางนี้มีความสำคัญต่อเกษตรกรชาวสวนยางมาก เนื่องจากท่อน้ำยางจะอยู่ในส่วนนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเปลือกด้านในที่ติดอยู่เยื่อเจริญจะมีท่อน้ำยางอยู่มากที่สุด

ลักษณะของใบ - เป็นใบประกอบโดยทั่วไป 1 ก้านใบจะมีใบย่อย 3 ใบ มีหน้าที่หลักในการปรุงอาหารหายใจและคายน้ำ ใบยางจะแตกออกมาเป็นชั้น ๆ เรียกว่า "ฉัตร" ระยะเวลาเริ่มแตกฉัตรจนถึงใบในฉัตรนั้นแก่เต็มที่จะใช้เวลาประมาณ 2-3 เดือน ยางจะผลัดใบในฤดูแล้งของทุกปี ยกเว้นยางต้นเล็กที่ยังไม่แตกกิ่งก้านสาขาหรือมีอายุไม่ถึง 3 ปี จะไม่ผลัดใบ

ลักษณะของดอก - มีลักษณะเป็นช่อมีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกันดอกยางทำหน้าที่ผสมพันธุ์โดยการผสมแบบเปิด ดอกยางจะออกตามปลายกิ่งของยางหลังจากที่ต้นยางผลัดใบ

ลักษณะของผล - มีลักษณะเป็นพูโดยปกติจะมี 3 พู ในแต่ละพูจะไม่เมล็ดอยู่ภายใน ผลอ่อนมีสีเขียวผลแก่มีสีน้ำตาลและแข็ง

ลักษณะของเมล็ด - มีสีน้ำตาลลายขาวคล้ายสีของเมล็ดละหุ่ง จะมีความยาวประมาณ 2-2.5 เซนติเมตร กว้างประมาณ 1.5-2.5 เซนติเมตร หนักประมาณ 3-6 กรัม เมล็ดยางเมื่อหล่นใหม่ๆจะมีเปอร์เซ็นต์ความงอกสูงมาก แต่เปอร์เซ็นต์ ความงอกนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในสภาพปกติเมล็ดยางจะรักษาความ งอกไว้ได้ประมาณ 20 วันเท่านั้น

ลักษณะของน้ำยาง เป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลืองขุ่นข้น อยู่ในท่อน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง ในน้ำยางจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วนคือส่วนที่เป็น "เนื้อยาง" และส่วนที่ "ไม่ใช่ยาง" ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45 เปอร์เซ็นต์

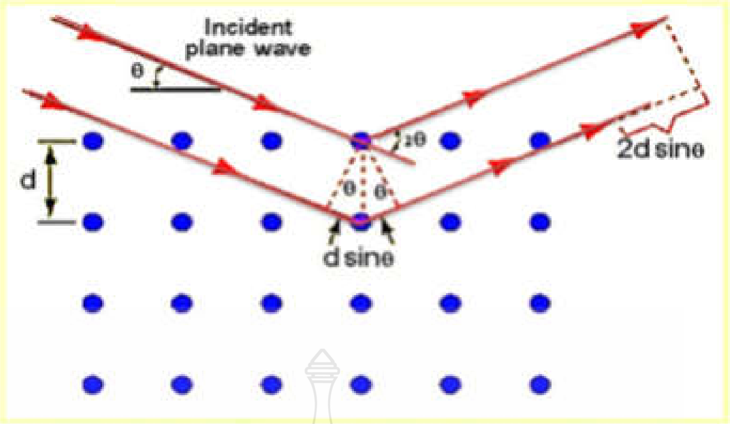
รูปที่ 2.11 น้ำยางธรรมชาติ [27]

การใช้ประโยชน์และการแปรรูปในขั้นต้น ยางพาราที่กรีดได้มักจะถูกนำไปแปรรูปเบื้องต้นซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ยางแห้ง (ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ยางเครพ ยางแผ่นผึ่งแห้ง และยางสกิม) และยางน้ำ (น้ำยางข้นหรือยางลาเท็กซ์) ก่อนจะนำไปแปรรูปในขั้นต่อไปซึ่งจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่พบได้ในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น ยางสำหรับประกอบยานพาหนะ ยางยืดและยางรัดของ ถุงมือยางทางการแพทย์ รองเท้าและอุปกรณ์กีฬา สายพานลำเลียง ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำ เป็นต้น

2.8 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [28]

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction analysis, XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิด ของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชิ้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบอนุภาคจะเกิดการเลี้ยวเบนของลำรังสี ออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก [28]

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ตามสมการของ Bragg 's Law คือ

$$2d_{hkl}\sin\Theta = n\lambda$$

โดยที่ λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n แทน เลขจำนวนเต็ม

d_{hkl} แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDs) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน จากหลักการทำงานของXRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน

ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบ

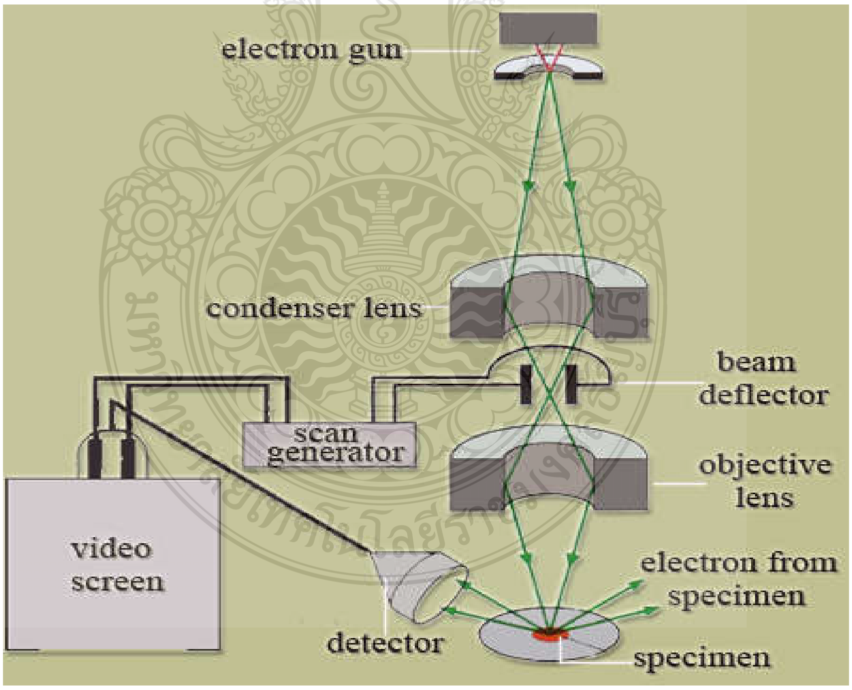
เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่าง

ที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาวไม่เกิน 10 cm ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ เป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 mm เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณน้อยมากๆ ก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่าง เพื่อทำการทดสอบ

2.8.2 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [29]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ซึ่งต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ใช้แสงขาวเป็นแหล่งกำเนิดแสง) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค จากคุณสมบัติของอิเล็กตรอนที่ประพฤติตัวเป็นคลื่นได้ เมื่อเปรียบเทียบความยาวคลื่นของคลื่นอิเล็กตรอนกับคลื่นแสง พบว่า คลื่นอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ทำให้สามารถแยกความแตกต่างและเก็บรายละเอียดของชิ้นงานได้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของ SEM [29]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงโดยมีปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) สร้างคลื่นอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง(High voltage) และถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กที่เรียก เลนส์แม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน สามารถถ่ายภาพได้โดยใช้พลังงานจาก Secondary electron และ Backscatter electron

Seccondary electron: เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (สร้างจาก electron gun) ที่ชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของชิ้นงานและถ่ายเพลังงานให้อิเล็กตรอนในผิวชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมา อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน

Backscattered electron: คืออิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

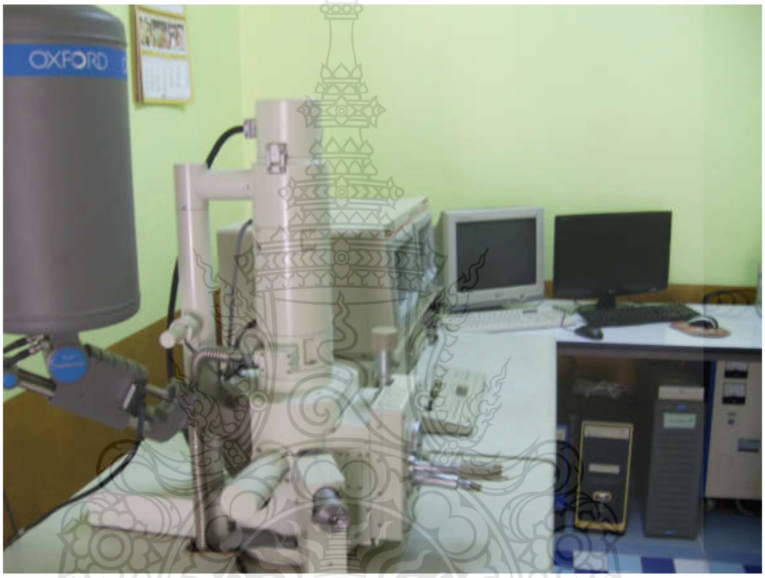
ตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาด้วย SEM และวิเคราะห์ภาพด้วย X-Ray Microanalysis จะต้องเป็นของแข็งปราศจากความชื้น ไม่สลายตัวเมื่อถูกกระทบด้วยลำอิเล็กตรอน และพื้นผิวตัวอย่างจะต้องมีสมบัตินำไฟฟ้า การเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย การตัดตัวอย่าง (Cutting) การติดตัวอย่าง (Mounting) และการฉาบผิว (Coating) ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนจะแตกต่างกันตามชนิดของตัวอย่างและวัตถุประสงค์ในการศึกษา วัสดุที่ใช้วางตัวอย่างก่อนนำเข้าเครื่องเรียกว่า stub ซึ่งทำมาจากวัสดุ เช่น ทองเหลือง อะลูมินัม หรือคาร์บอน เป็นต้น กาวที่ใช้ติดตัวอย่างได้แก่ ยาทาเล็บ กาวตราช้าง เทปคาร์บอน เทปใสสองหน้า หรือใช้กาวโลหะ เช่น Carbon paste , silver paste เป็นต้น [30]

2.8.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

หลักการของ Energy dispersive x-ray spectrophotometry (EDX)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDX เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 2.14 เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุและใช้เวลาไม่นานในการวิเคราะห์ หลักการของการวิเคราะห์ EDX คือ เมื่อลำ

อิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในเช่น ชั้น K หรือ L ของอะตอม แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของชั้นโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงเวลาอันสั้นโดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและเฉพาะของธาตุนั้นๆ [31]



รูปที่ 2.14 เครื่อง SEM และ EDX [32]

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

1) การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (area scan analysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เรย์แมบปิ้ง (x-ray mapping) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิว ตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะการกระจายของธาตุบนพื้นที่นั้นๆ

2) การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3) การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่นิ่งกับที่บนพื้นผิวตัวอย่าง ตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตรงจุดที่ต้องการรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการ

$$E = h\upsilon$$

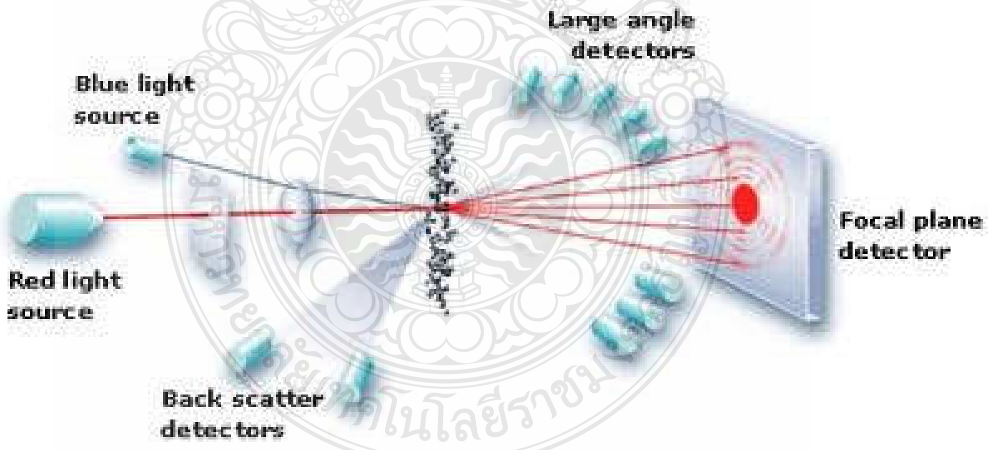
เมื่อ E = พลังงานของรังสีเอกซ์

H = ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant $\approx 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

υ = ความถี่ของรังสีเอกซ์

2.8.4 ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) [33-34]

เป็นการวัดวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ส่วนประกอบของเครื่องวัดขนาดอนุภาค แสดงดังรูปที่ 2.15 เครื่องจะวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง สามารถหาได้ทั้งขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของเครื่อง Particle size Analyzer [34]

การทำงานของเครื่องวัดขนาดอนุภาค

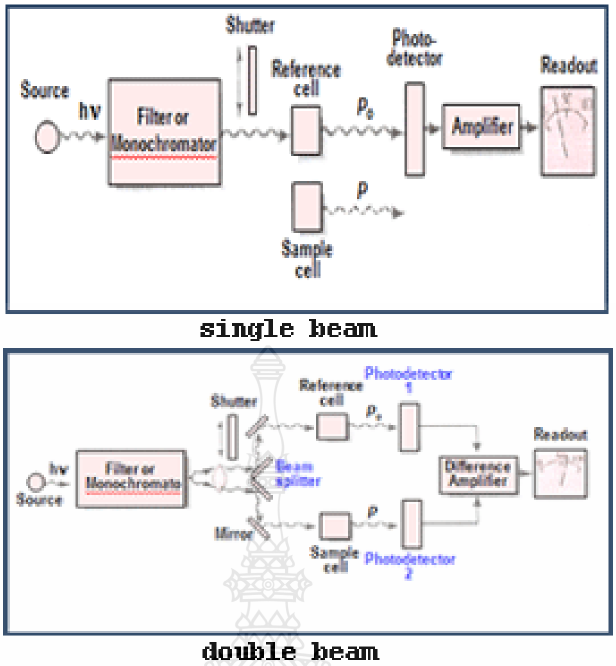
เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ จะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงขึ้นในมุมต่างๆ ตามลักษณะขนาดของอนุภาคที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ โดยมุมของการเลี้ยวเบนของแสงจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มุมของการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์จะแคบ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก มุมของการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์จะกว้าง ซึ่งความเข้มแสงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ที่มุมต่างๆ จะถูกตรวจวัดด้วยหัวตรวจวัดของเครื่องวัดขนาดอนุภาค และคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์และค่าของขนาดอนุภาคนั้นๆ รวมทั้งสามารถคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคได้

2.8.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area analyzer, BET) [34-35]

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) รวมถึงปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) จะอาศัยการใช้สมการจากทฤษฎีที่เหมาะสมมาคำนวณ ซึ่งได้มาจากข้อมูลดิบของไอโซเทอม (isotherm) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมพัทธ์ (P/Po) กับปริมาตรหรือน้ำหนักของก๊าซที่ถูกดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) ของวัสดุนั้นๆ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ตามทฤษฎีของ BET (The Brunauer Emmett-Teller) ใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับของก๊าซเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ก๊าซที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการที่ก๊าซเกิดดึงดูดกันเอง (ใช้ก๊าซไนโตรเจน, N_2)

2.8.6 โฟโตคะตะลิติกแอคทิวิตี โดยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis spectrophotometry) [36]



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ UV-VIS Spectrophotometer [36]

หลักการของยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี UV-VIS Spectrophotometer

ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-VIS Spectrophotometry) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือที่เรียกยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

สมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law หรือ Beer's Law) ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

ส่วนประกอบของยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1) แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H_2 and D_2 lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 160-380 nm และช่วงแสงที่ตามองเห็นหรือวิสิเบิล (visible) ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm

2) Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติกหรือแสงเอกรงค์ ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติง (grating)

3) เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (sample cell) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

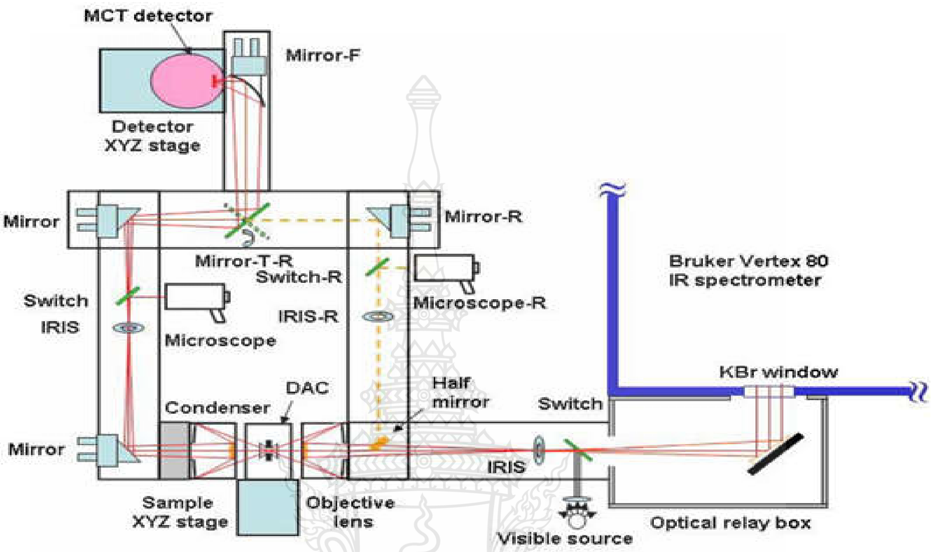
4) Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

2.8.7 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรมิเตอร์ [37]

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) มีส่วนประกอบที่สำคัญ แสดงดังรูปที่ 2.17 เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โฟโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็น beam splitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณ ที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสุ่มวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่

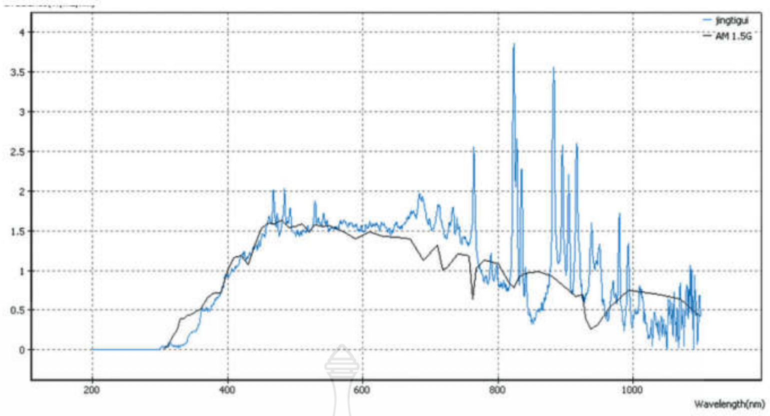
ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่ เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He – Ne Laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณ อ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โฟโรแกรมถูกเก็บไว้



รูปที่ 2. 17 หลักการทำงานของ FT-IR [37]

2.8.8 เครื่องวัดความเข้มแสง (Fiber optic spectrometer) [38]

เครื่องวัดความเข้มแสง (Fiber optic spectrometer) ใช้วัดค่ากำลังงานแสงเชิงสเปกตรัม จากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟ แสงเลเซอร์ เป็นต้น โดยใช้เทคนิคการวัดแบบ Fiber optic spectrometer มีตั้งแต่ความยาวคลื่น 200-2500 nm หรือวัดความเข้มแสงทางด้าน Photometric, วัดความเข้มแสง วัดค่าทาง Colorimetric เป็นต้น สามารถวัดได้ทั้งแบบสารละลายหรือแบบของแข็ง



รูปที่ 2.18 กราฟระหว่างความเข้มแสงและความยาวคลื่นจากเครื่อง Fiber optic spectrometer [38]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

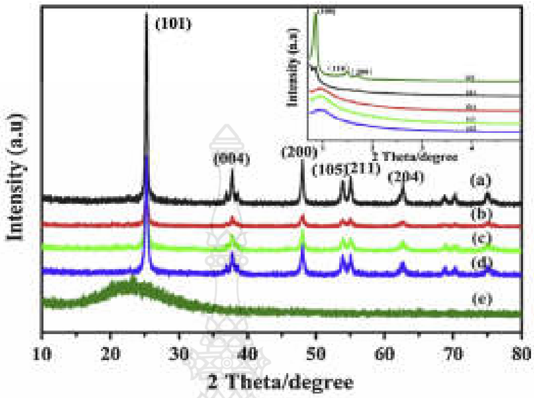
2.9.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และการเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลซิสโดยการเติมสารเจือ

Duminica *et al.* (2007) [39] ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของฟิล์มไทเทเนียมไดอออกไซด์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเฟสอะนาเทสและเฟสรูไทร์ อะนาเทสขึ้นอยูกับอุณหภูมิในการเผา โดยอุณภูมิต่ำกว่า 420 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดโครงสร้างอะนาเทสเพียงอย่างเดียว และมีสมบัติโฟโตคะตะไลซิส ที่อุณหภูมิ 430-600 องศาเซลเซียส เริ่มเกิดเฟสของรูไทล์ขึ้น ซึ่งทำให้โครงสร้างกลายเป็นเฟสผสม สมบัติความเป็นโฟโตคะตะไลซิสลดลง

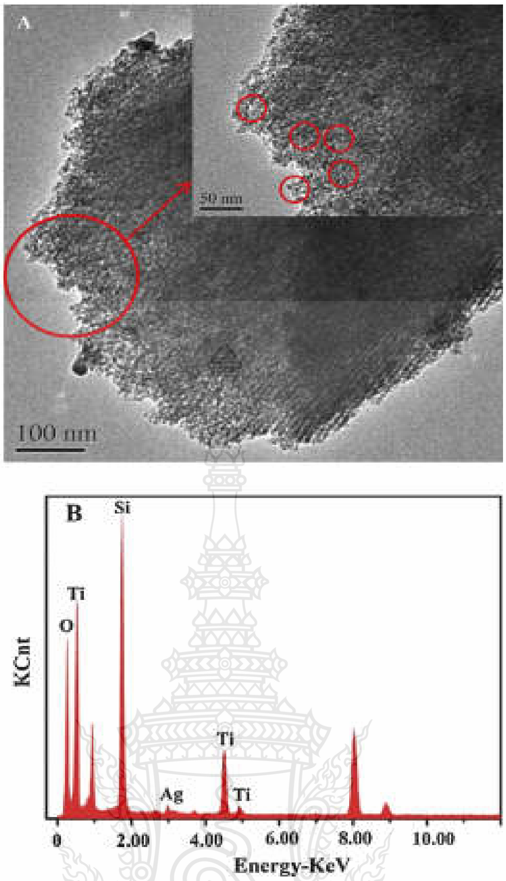
Gullapelli *et al.* (2017) [40] การเตรียมนาโนไทเทเนียมออกไซด์ ที่เติมด้วยซิลเวอร์ออกไซด์ ที่เสถียรสูง โดยเปรียบเทียบการเพิ่มของไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและน้ำ ภายใต้แสงอาทิตย์ เตรียมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่เติมซิลเวอร์ออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน (ไม่เติม, 0.5,1, 2, 3, 4, และ 5 น้ำหนักโดยมวล) ทำให้เกิดตะกอน ภายใต้การใช้แสง กลีเซอรอลและน้ำ ตรวจสอบผลกายภาพด้วย XRD, EDX, DRS, TEM, XPS, BET และเทคนิค Raman พบว่า การเพิ่มไฮโดรเจนที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบผลทางกายภาพและเคมี คือ การเติมซิลเวอร์ออกไซด์ที่ 3% น้ำหนักโดยมวล

Lin Liang *et al.* (2014) [41] ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เพิ่มขึ้น ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/SBS-15 ภายใต้การใช้แสง จากนั้นจึงนำไปเจือด้วยซิลเวอร์ออกไซด์ (ไม่เจือ, 1%, 5% และ10 %) วิเคราะห์โดย XRD, SEM, N_2-adsorbtion, UV- Vis

spectrophotometry และความสามารถในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิส ผลปรากฏว่าที่เจือด้วยซิลเวอร์ออกไซด์ 5% TiO_2/SBA-15 ประสิทธิภาพการเป็นโฟโตคะตะไลซิสดีกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า และที่ไม่เจือ รวมถึงการเข้าไปแทรกตัวของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้เกิดคอมโพสิท SBA-15 ลดการบวมตัวได้เมื่อถูกใช้งานนาน



รูปที่ 2.19 เฟส XRD ของ a) TiO_2/SBA-15, b) 1% TiO_2/SBA-15, c) 5% TiO_2/SBA-15, d) 10% TiO_2/SBA-15 และ e) SBA-15 [41]



รูปที่ 2.20 ภาพถ่าย TEM และ เฟสของ EDX ของตัวอย่าง 5% TiO_2/SBA-15 [41]

2.9.2 การเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกโดยเติมสารเจือวาเนเดียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

Jaiswal et al. (2012) [42] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติโฟโตคะตะไลซีสแบบ Visible light ของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเจือวาเนเดียมและไนโตรเจน โดยวิธีโซล-เจล ศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของวาเนเดียมและไนโตรเจนและทดสอบสมบัติด้วย TEM XPS และ UV-vis พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือสารลงไปมี Visible light ที่แคบลง จากปกติ 2.3eV ที่ 2%วาเนเดียมได้ 2.4eV และที่ 4%ไนโตรเจนได้ 2.95eV ดังแสดงค่าเปรียบเทียบในรูปที่ 2.15 พร้อมกับการเพิ่มขั้นตอนการบดผสม (ball mill) ในระยะเวลาที่เหมาะสม ผลที่ได้ทำให้ค่า Visible light แคบลงเป็นผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการเป็นโฟโตคะตะไลซีส

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเปรียบเทียบค่า Visible light (Band gap ennergy) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ [42]

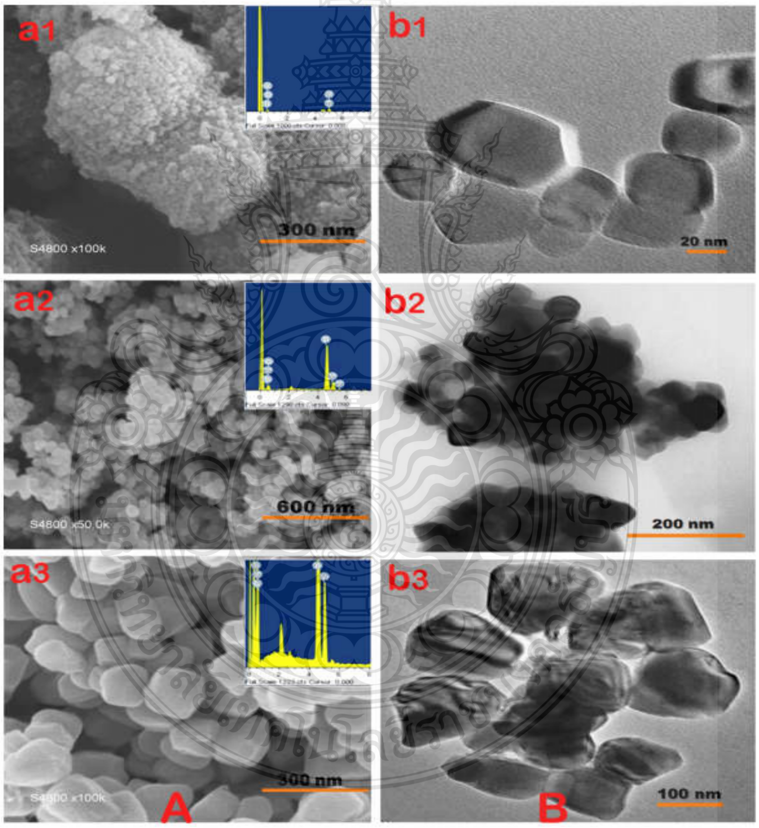
Samples	Band gap energy (eV)	R^2
Pure TiO_2	3.17 ± 0.06	0.997
Ball milled TiO_2	3.13 ± 0.06	0.996
N-doped		
TiO_2-N 2%	2.99 ± 0.06	0.994
TiO_2-N 3%	2.97 ± 0.06	0.993
TiO_2-N 4%	2.95 ± 0.06	0.991
TiO_2-N 5%	2.95 ± 0.06	0.996
V-doped		
TiO_2-V 0.5%	2.50 ± 0.06	0.999
TiO_2-V 1%	2.44 ± 0.06	0.998
TiO_2-V 2%	2.42 ± 0.06	0.998
TiO_2-V 3%	2.40 ± 0.06	0.998
TiO_2-V 4%	1.94 ± 0.06	0.997
V-N codoped		
TiO_2-V- 2%-N 4%	2.31 ± 0.04	0.998

M. Bettinelli et al. (2007) [43] ศึกษาสมบัติโฟโตคะตะไลซีสของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเจือสารโบรอนและวาเนเดียม โดยวิธีโซล-เจล ที่เจือด้วยวาเนเดียม 1โมล% และ ที่เจือด้วยโบรอน 9โมล% ทดสอบด้วย XRD BET และการสลายสีเมททาลีนบลู (Methylene blue, MB) พบเฟสอะนาเทสกับรูไทส์, พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น และการลดลงของสีเมททาลีนบลู แสดงถึงความเป็นโฟโตคะตะไลซีสที่ดีขึ้น

Zheng et al. (2007) [44] ได้ศึกษาสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เจือด้วยพลวง ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่า ฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ เกิดเฟสอะนาเทส หลังการเผาที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เฟสรูไทล์ที่ 550 องศาเซลเซียส จากการโด๊ป พลวง ทำให้ต้านเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าที่ไม่ได้เจือ ศึกษาภายใต้แสงยูวี ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง

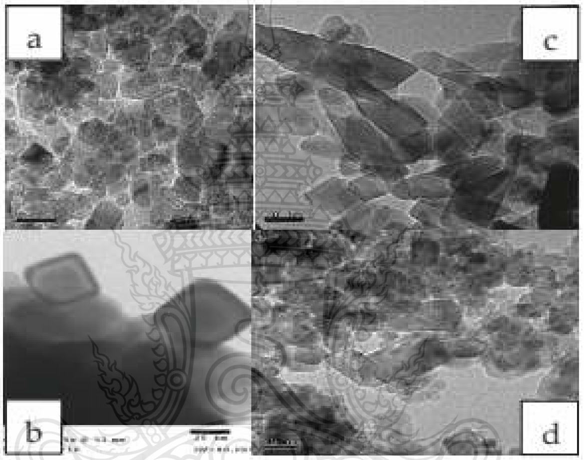
Yuzheng et al. (2014) [23] ฤทธิ์การต้านแบคทีเรียของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์และยูสเรียม สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจลโดยเจือด้วยซิงค์และยูสเรียม วิเคราะห์โดย XRD, TEM, XPS, DRS และ PL พบว่าโครงสร้างมีทั้งอนาเทสและรูไทร์ผสมกันอยู่จากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาและเกิดเป็นสารประกอบ Zn_3TiO_8, $ZnTiO_3$ และ Y_2TiO_7 หลังจากทดสอบการต้านแบคทีเรียพบว่าทั้งสองต้านแบคทีเรียได้ดีกว่าที่ไม่เจือ

Ranjith et al. (2012) [26] เจือวาเนเดียมลงในไททาเนียมไดออกไซด์แสดงค่า Photoactivity ที่สูงขึ้นในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coil* และการล้างพิษของฟีนอล ไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการเป็นโฟโตแคตะลิสอยู่แล้ว แต่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเจือวาเนเดียมลงไป แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น SEM และ TEM (ดังรูปที่ 2.21) พบว่ามีขนาดประมาณ 30-100nm อยู่ในช่วงวิสิเบิลไลท์ และการต้านเชื้อแบคทีเรียดีกว่าที่ไม่ได้เจือวาเนเดียมมาก เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย



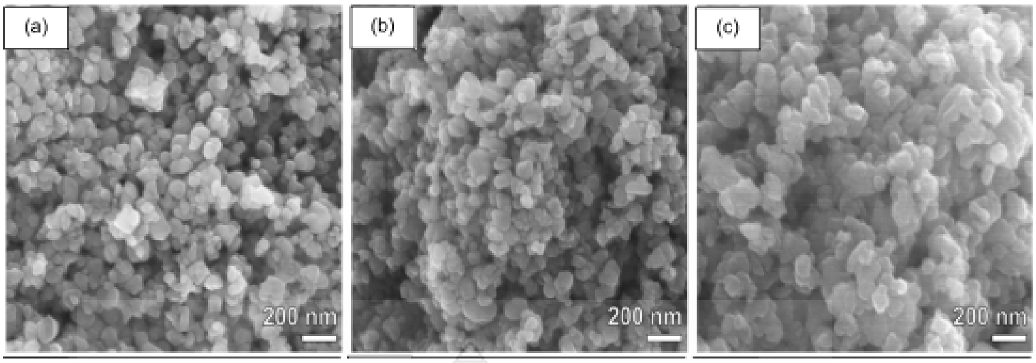
รูปที่ 2.21 แสดงภาพถ่าย SEM (แถวA) และภาพถ่ายจาก TEM (แถวB) กำลังขยายต่างๆ [26]

Nguyen Minh Thuy et al. (2012) [45] ปฏิกิริยาของแสงวิสิเบิลไลท์ของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิส ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม สังเคราะห์โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล ปริมาณที่เจือ คือ 0.0; 0.1; 0.3; 0.5; 0.7 และ 0.9% โมล ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเจือด้วยวาเนเดียมมีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึก ที่มีขนาดผลึกเฉลี่ย 10-20 นาโนเมตร กรดโอเลอิกและตัวทำละลายเอทานอลที่มีโมเลกุลแตกต่างกัน สามารถทำให้เกิดเกรนทรงกลมหรือรูปแบบติดกัน ที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายภาพของวัสดุสเปกตรัมการดูดซึมของตัวอย่างที่เจือปนมีค่าการดูดซับแสง ที่ความเข้มแสง 380 นาโนเมตร ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาสารละลายฟีนอล หลังจาก 360 นาที ภายใต้แสงปกติโดย ความเข้มข้นของฟีนอลลดลงเหลือ 9%



รูปที่ 2.22 ภาพถ่าย TEM ของ สัดส่วนระหว่าง ไทเทเนียมคลอไรด์ : กรดโอเลอิก :สารละลายเอทานอล a) 1:4:20, b) 1:5:20, c) 1:6:20 และ d) 1:8:20 [45]

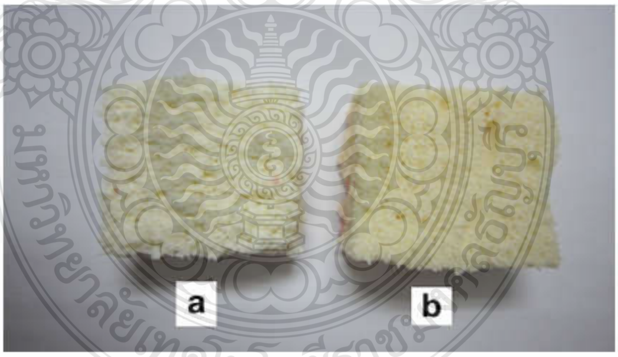
Park et al. (2016) [46] การเปรียบเทียบการกระจายและความเป็นพิษภายหลังให้ยาซ้ำของอนุภาคนาโนออกไซด์วานาเดียมที่แตกต่างกันในหนู จากปัจจุบันการมีเทคโนโลยีการประยุกต์ของวาเนเดียมออกไซด์รูปต่างๆ และในหลายๆด้านให้เข้ากับสภาพแวดล้อมและมนุษย์ โดยเปรียบเทียบผลทางชีวภาพของวาเนเดียมออกไซด์ในหนู ทั้งสารสังเคราะห์ขึ้นมากับทางการค้า พบว่ามีการสะสมของวาเนเดียมออกไซด์ในรูป V_2O_5 และ V_2O_3 ส่วน VO_2 และ รูปอื่นไม่ค่อยสะสมมาก แต่การสะสมนั้นมีอัตราลดลงเมื่อหยุดการให้ซ้ำและหนูสามารถปรับสภาพร่างกายให้สภาพเดิมหลังจากพักฟื้นพร้อมกลับมาให้ซ้ำได้อีก



รูปที่ 2.23 ภาพถ่าย SEM ของ a) VO_2, b) V_2O_3 และ c) V_2O_5 [46]

2.9.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์และสารอื่นๆ ในการต้านเชื้อราและแบคทีเรียในยางพารา

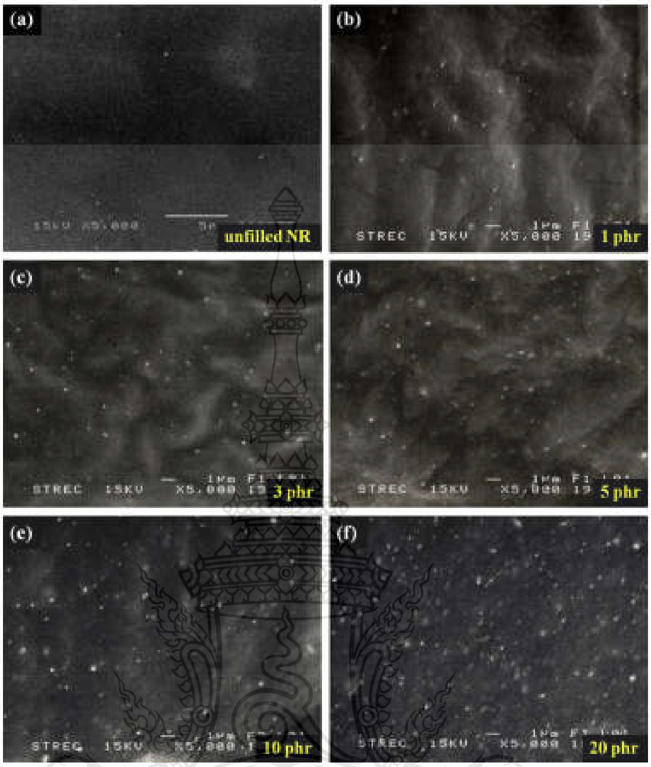
Rathnayake et al. (2012) [47] สังเคราะห์และศึกษาสมบัติของซิลเวอร์นาโนในน้ำยางธรรมชาติแบบโฟมสำหรับต้านเชื้อราและแบคทีเรีย การศึกษาสมบัติของซิลเวอร์นาโนจากน้ำยางธรรมชาติแบบตีโฟม (ดังรูปที่ 2.24) ซิลเวอร์นาโนที่ใช้สังเคราะห์ได้โดยการไตรซิเตรทโซเดียมในน้ำ วิเคราะห์สมบัติใช้ UV-vis และวิเคราะห์อนุภาคโดย SEM พบว่ามีการกระจายตัวและเสถียรภาพต้านแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบของ *Escherichia coil* ได้ดี ทดสอบการต้านเชื้อรา *Aspergilles niger* พบว่าสามารถต้านได้ดี



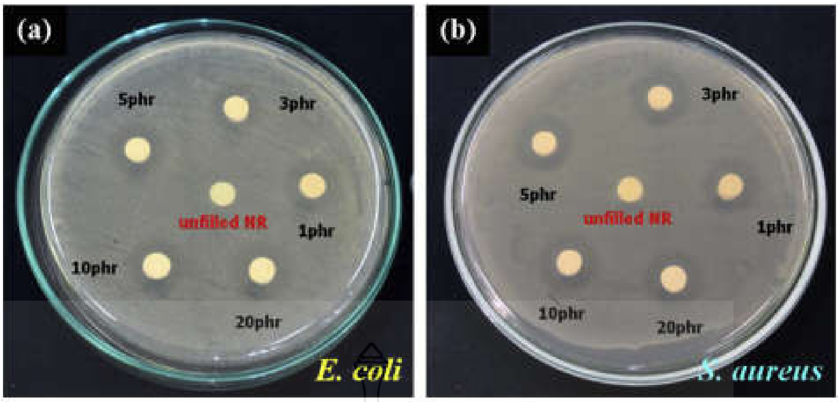
รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างของ a) น้ำยางธรรมชาติแบบตีโฟม b) น้ำยางธรรมชาติแบบตีโฟมเจือซิลเวอร์นาโน [47]

Boonchai et al. (2012) [9] ศึกษาการปรับปรุงป้องกันรังสียูวีและสมบัติต้านแบคทีเรียของยางธรรมชาติโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทส์นาโนคอมโพสิท เตรียมโดยใช้ไทเทเนียมได

ออกไซด์ขนาดประมาณ 73 nm อัลตราโซนิค พบว่าผสมในยางธรรมชาติ 5 phr ทดสอบการป้องกันรังสียูวิและการยับยั้งแบคทีเรีย *E. coil*, *S. aureus* ตามลำดับ พบว่าต้านรังสียูวีและแบคทีเรียได้ดี



รูปที่ 2.25 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางด้วยเครื่อง SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นผสมในยางธรรมชาติ (a) ไม่ผสม (b) 1phr (c) 3phr (d) 5phr (e) 10phr (f) 20phr [9]



รูปที่ 2.26 ทดสอบการยับยั้งแบคทีเรีย a) *E. coil* และ b) *S. aureus* ภายใต้รังสียูวี นาน 24 ชม. [9]

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีที่ใช้ศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดแผนการทดลอง ขอบเขตการศึกษา สำหรับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียในยางพารา โดยเลือกศึกษากับสารเจือ 2 ชนิดได้แก่ วาเนเดียมออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ ทำการศึกษาสารเจือทั้งสองชนิดภายใต้การทดลอง ดังนี้

3.1.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโดยกระบวนการโซล-เจล กำหนดสภาวะในการศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารเจือ, ความเข้มข้นของสารเจือ

3.1.2 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือที่เตรียมได้ โดย

- เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis, XRD)
- เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)
- วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area analyzer, BET)
- ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)
- โฟโตคะตะลิติกแอคทิวิตี (Photocatalytic activity) โดยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis spectrophotometry)
- ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยเทคนิค Time kill assay

3.1.3 ศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

3.1.4 การประยุกต์ใช้วิธีการและสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ศึกษาจากข้อ 1- 3 ในการทำสเปรย์บนชิ้นงานยางธรรมชาติเพื่อต้านเชื้อแบคทีเรีย

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง

สารเคมี

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
1. Titanium (IV) isopropoxide (TTIP)	Analytical reagent	Alfa Aesar
2. Ethanol	Analytical reagent	Carlo Erba
3. Hydrochloric acid (HCl)	Analytical reagent	Carlo Erba
4. Vanadium oxide (V_2O_5)	Analytical reagent	Sigma-aldrich
5. Zinc oxide (ZnO)	Analytical reagent	Sigma-aldrich
6. Methylene blue	Analytical reagent	Fluka

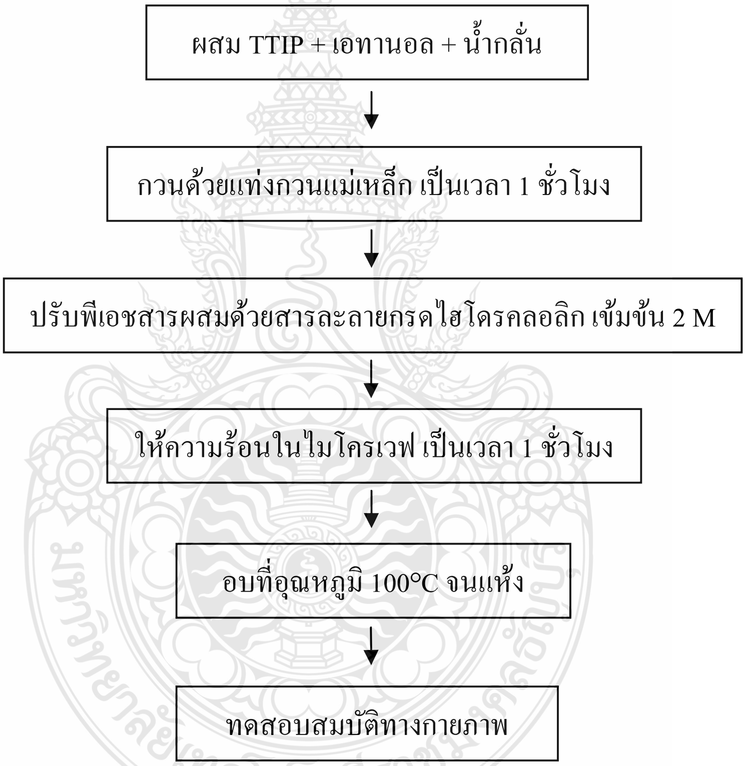
อุปกรณ์การทดลอง

ชื่อเครื่อง	ยี่ห้อ
1. แหล่งกำเนิดแสงยูวี (UV lamp)	PHILIPS รุ่น TUV F17T8
2. เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)	THERMOLYNC รุ่น CIMAREC
3. ไมโครเวฟ (Microwave oven)	ELECTROLUX รุ่น EMM2016W
4. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analyzer, XRD)	SHIMADZU รุ่น XRD 2000
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	JEOL รุ่น JSM-504LV
6. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy dispersive X-ray spectrometer, EDX)	JEOL รุ่น JSM-504LV
7. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)	MALNERN รุ่น MASTERSIZER 2000
8. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area analyzer, BET)	QUANTACHROME รุ่น AUTOSORB
9. ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis-spectrophotometry)	IQUV-Vis master
10.ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR spectrometer)	NETZSCH รุ่น STA449
11.เครื่องวัดความเข้มแสง (Fiber optic spectrometer)	Avaspec รุ่น Avaspec model

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 5 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เป็นสารตั้งต้นที่มีไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบ ละลายในเอทานอล ปริมาณ 35 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เทผสมกับน้ำกลั่นปริมาณ 60 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก และปรับพีเอชของสารเท่ากับ 2 โดยใช้สารละลายกรด HCl เข้มข้น 2M กวนสารผสมที่อุณหภูมิห้อง ด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ ที่ 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนแห้ง จากนั้นจะได้สารไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะโดย XRD, SEM, BET, Particle size และ FT-IR ต่อไป

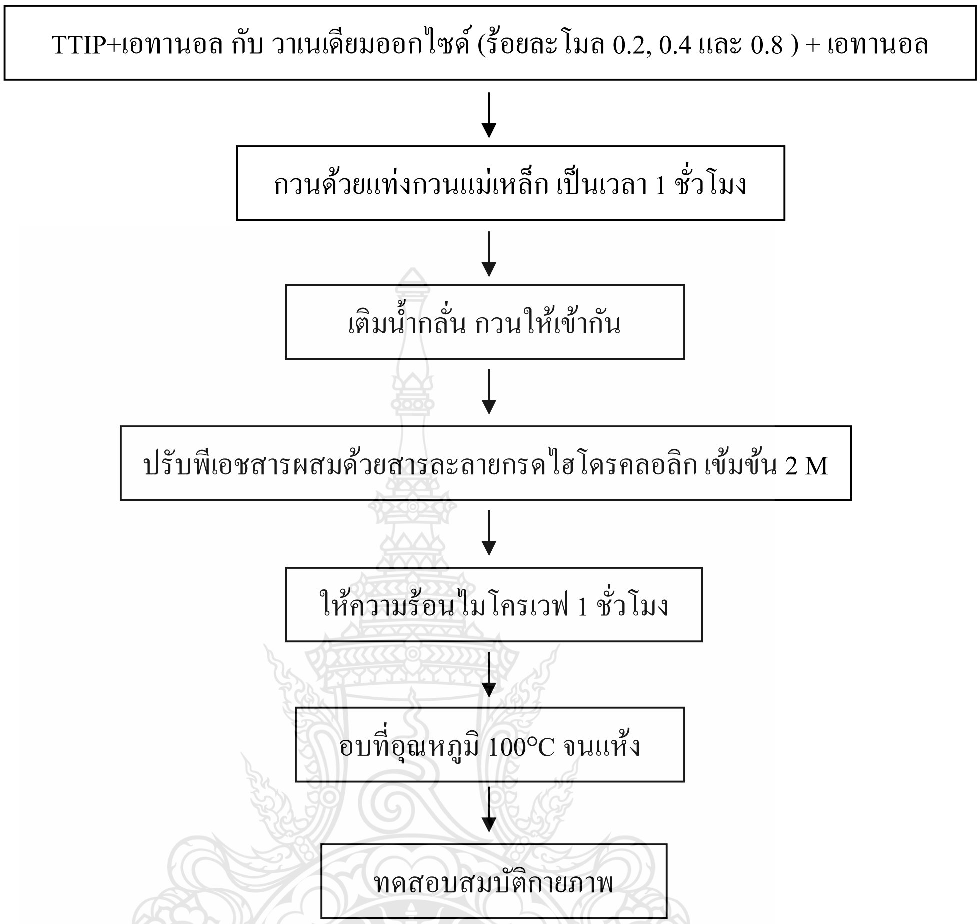


รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการโซล-เจล

รูปที่ 3.2 ลักษณะของสารผสมหลังจากกวนให้เข้ากันและปรับพีเอชด้วยสารละลายกรด

3.3.2 การสังเคราะห์สารไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม

ใช้ titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 5 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เป็นสารตั้งต้นที่มีไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบ ละลายในเอทานอล ปริมาณ 35 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก และละลายวาเนเดียมออกไซด์ (V_2O_5) ที่ต่างกันคือ 0.2, 0.4 และ 0.8 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เทผสมในน้ำกลั่นปริมาณ 58.6 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก และปรับพีเอชของสารเท่ากับ 2 โดยใช้สารละลายกรด HCl เข้มข้น 2M กวนผสมที่อุณหภูมิห้อง ด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ ที่ 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนแห้ง จากนั้นจะได้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมออกไซด์แบบผง เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะโดย XRD, SEM, BET, Particle size และ FT-IR ต่อไป

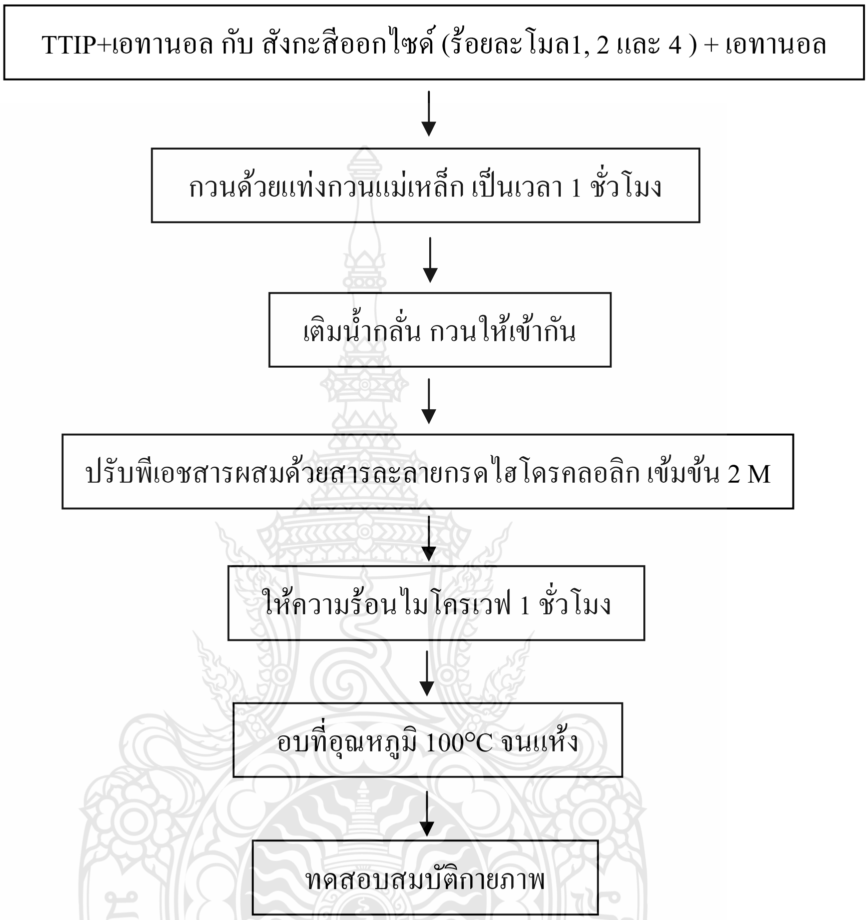


รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม

3.3.3 การสังเคราะห์สารไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี

ใช้ titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 5 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เป็นสารตั้งต้นที่มีไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบ ละลายในเอทานอล ปริมาณ 34.5 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก และละลายสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่ต่างกันคือ 1, 2 และ 4 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เทผสมในน้ำกลั่น ปริมาณ 53.5 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก และปรับพีเอชของสารให้เท่ากับ 2 โดยใช้สารละลายกรด HCl เข้มข้น 2M กวนผสมที่อุณหภูมิห้อง ด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ ที่ 180 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศา

เซลเซียสจนแห้ง จากนั้นจะได้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ซิงค์ออกไซด์แบบผง เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะโดย XRD, SEM, BET, Particle size และ FT-IR ต่อไป



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี

3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้

3.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็นผง ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึง

จะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัมในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10cm ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 mm เท่านั้น [28], [40] [42] ในงานวิจัยนี้เตรียมตัวอย่างแบบผงอัดลงบนสตับ เครื่อง XRD SHIMADZU รุ่น XRD 2000 ที่มุม Theta 5-80º scan rate 0.05 2Θ / sec.[51], [52]

3.4.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาด้วย SEM จะต้องเป็นของแข็งปราศจากความชื้นไม่สลายตัวเมื่อถูกกระทบด้วยลำอิเล็กตรอน และพื้นผิวตัวอย่างจะต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ในการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย การตัดตัวอย่างหรือโรยผงตัวอย่าง, การติดตัวอย่าง และการฉาบผิว [30], [40] [42] ซึ่งการเตรียมตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมแบบผง คือใช้ก้านสำลีจุ่มผงตัวอย่างแล้วโรยลงบนสตับแบบบาง จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นและนำไปฉาบด้วยทอง เวลา 30 วินาที (วัสดุที่ใช้วางตัวอย่างก่อนนำเข้าเครื่องเรียกว่าสตับ ซึ่งทำมาจากวัสดุหลายชนิดเช่นทองเหลืองอลูมินัมหรือคาร์บอนเป็นต้นกาวที่ใช้ติดตัวอย่าง) ในงานวิจัยนี้ใช้ เครื่อง SEM JEOL รุ่น JSM-504LV โดยลำอิเล็กตรอนเป็นต้นกำเนิดอิเล็กตรอน ที่ศักย์ไฟฟ้า 5 KV กำลังขยายต่างๆ [49]

3.4.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy dispersive X-ray spectrometer, EDX)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDX เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุและใช้เวลาไม่นานในการวิเคราะห์ [32], [40] โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับ SEM การเตรียมตัวอย่างเหมือนกันตามหัวข้อ 3.4.1

3.4.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

เป็นการวัดวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) เครื่องจะวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง สามารถหาได้ทั้งขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค [33], [34] เครื่อง Particle size analyzer รุ่น MALNERN รุ่น MASTERSIZER 2000 เตรียมโดยการนำผงที่ได้มาทำเป็นสารละลายในน้ำกลั่น ปั่นกวนให้เข้ากันประมาณ 10 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอนุภาค ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยจากค่ากลางที่ได้

3.4.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area analyzer, BET)

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ตามทฤษฎีของ BET (The BrunauerEmmett-Teller) ใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับของก๊าซเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ก๊าซที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการที่ก๊าซเกิดดึงดูดกันเอง (ใช้ก๊าซไนโตรเจน, N_2) [34], [35], [40] ใช้เครื่อง BET

QUANTACHROME รุ่น AUTOSORB IQ แก๊สไนโตรเจน Out gas ที่อุณหภูมิ 300ºC ทำทั้งหมด 11 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยจากกราฟ

3.4.6 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR spectrometer)

เครื่อง FT-IR Spectroscopy มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โฟโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็น beamsplitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beamsplitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณ [37], [52] จะแปลสัญญานเป็นกราฟเกิดขึ้น โดยกราฟที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน [53] โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง FT-IR NETZSCH รุ่น STA449 การเตรียมตัวอย่าง จะอัดตัวอย่างเป็นแผ่นบางร่วมกับ KBr วัดที่เลขคลื่นประมาณ 400-4000 cm^{-1}

3.4.7 เครื่องวัดความเข้มแสง (Fiber optic spectrometer)

เครื่องวัดความเข้มแสง (Fiber optic spectrometer) ใช้วัดค่ากำลังงานแสงเชิงสเปกตรัม จากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น ดวงอาทิตย์, หลอดไฟ, แสงเลเซอร์ เป็นต้น โดยใช้เทคนิคการวัดแบบ Fiber optic spectrometer มีตั้งแต่ความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร [38] หรือวัดค่าการดูดซับแสง, การสะท้อน, การเลี้ยวเบน เป็นต้น ในการวัดค่าการดูซับแสงของเครื่อง Fiber optic spectrometer รุ่น Avaspec model ซึ่งเตรียมตัวอย่างแบบ อัดขึ้นรูปทรงกลม แล้วนำมาวิเคราะห์กับเครื่องโดยใช้ Absorbance mode ความยาวคลื่นตามแสงปกติ

3.4.8โฟโตคะตะลิติกแอคติวิตีของผงตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์

- เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ให้ความเข้มข้นในช่วง $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-6}$ โมลาร์ วัดการดูกลืนแสงโดย UV-Vis Spectrophotometer [36], [52] ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร และวัดค่า Absorbance ของเมทิลีนบลู และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ในการวัด Absorbance ของเมทิลีนบลู [3]

- นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียมกับซิงค์ พร้อมสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้ใส่หลอดทดลอง โดยใส่ผง 0.05 กรัม ปั่นกวนให้เข้ากัน 30 นาที แล้วนำไปวางเพื่อรับแสงภายในห้องปกติ (แสงวิสิเบิลไลท์) ที่เวลา เริ่มต้น , 5 นาที , 10 นาที, 30 นาที และ 60 นาที วัดค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงด้วย UV-Vis Spectrophotometer แล้วบันทึกผลอัตราการลดลงของความเข้มข้น แล้วนำไปคำนวณความเข้มข้นที่ลดลงเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับเวลา

3.4.9 ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (ATCC 25922) และ *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) โดยวิธี Time kill assay

การเตรียมหัวเชื้อทดสอบ (Inoculums) ใช้ Loop แตะเชื้อจากหลอด Working stock นำมา Streak บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ $37^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชม. ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยว ๆ 1 โคโลนี เพาะลงใน Nutrient broth 5 ml เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ $37^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชม. เตรียมหัวเชื้อทดสอบโดยปรับความขุ่นของเชื้อด้วย Normal saline (0.85% NaCl) ให้มีความขุ่นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน Mc. Farland No. 0.5 (Biomerieux) การทดสอบ เมื่อครบเวลาบ่ม บันทึกขนาดของ inhibition zone รอบๆ แผ่นทดสอบ เทผงตัวอย่างลงในหลอดทดลองปราศจากเชื้อ ตัวอย่างละ 3 หลอด จากนั้น ใส่ inoculums ปริมาตร 100 ไมโครลิตรลงบนผงตัวอย่าง ผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง เมื่อครบระยะเวลาสัมผัส 5, 10, 30 และ 60 นาทีใส่ letheen broth ปริมาตร 10 มล. ลงไปในแต่ละหลอด เขย่าให้เข้ากันอย่างทั่วถึง ทำการนับเชื้อที่เหลืออยู่ในแต่ละหลอดด้วยวิธี Standard plate count technique คำนวณหา % การต้านเชื้อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมลบ (มีแต่ inoculums) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ [48]

$$R = \frac{\text{C - B}}{\text{C}} \times 100$$

เมื่อ

R = เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ

C = จำนวนเฉลี่ยของเชื้อที่นับได้จากตัวควบคุมลบ

B = จำนวนเฉลี่ยของเชื้อที่นับได้จากหลอดที่มีตัวอย่างหลังระเวลาสัมผัสต่าง ๆ

3.5 การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์แบบสเปรย์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

คัดเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือ ที่มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ดีที่สุดเพื่อเตรียมสารแขวนลอยที่มีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แบบสเปรย์ เตรียมดังนี้ นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์หนัก 5 g เติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 ml ปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปอัตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เสถียร จะได้สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชนิด คือ สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม และสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี

สารแขวนลอยดังกล่าวนำมาประยุกต์สำหรับผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่มีพื้นผิวในการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยนำสารแขวนลอยที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบสเปรย์บนแผ่นผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 1 ซม ×1 ซม แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน และ 7 วัน เพื่อนำมาทดสอบการยึดเกาะของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติและทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียต่อไป

3.5.1 การทดสอบการยึดเกาะของสารแขวนลอยที่มีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวผลิตภัณฑ์ยางพารา

1) โดยการนับจำนวนครั้งในการเช็ดออกของชิ้นงานแต่ละครั้ง โดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX)

2) โดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) เมื่อเวลาผ่านไป ที่ 1 วัน และ 7 วัน

3) ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดย (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.5.2 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่สเปรย์สารละลายที่ 1 วัน และ7วัน ทำการทดสอบ 2 วิธี ดังนี้

1) Disk diffusion method (CLSI, 2012)

การเตรียม inoculums ใช้ loop แตะเชื้อทดสอบจากหลอด working stock นำมา streak บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ 37^{o}C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยวๆ 1 โคโลนี เพาะลงใน nutrient broth 5 ml เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 37^{o}C เป็นเวลา 24 ชม. เตรียมหัวเชื้อทดสอบโดยปรับความขุ่นของเชื้อด้วย normal saline (0.85% NaCl) ให้มีความขุ่นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน Mc. Farland No. 0.5 การเตรียมอาหารทดสอบ เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller-Hinton agar ซึ่งหลอมจนละลายอย่างทั่วถึงและมีอุณหภูมิประมาณ 45^{o}C ลงในจานเพาะเชื้อ (90 mm) ปริมาตร 25 ml/จาน ตั้งทิ้งไว้จนอาหารทดสอบแข็ง จากนั้นใช้ cotton swab ปราศจากเชื้อจุ่มหัวเชื้อทดสอบป้ายลงบนผิวหน้าอาหารทดสอบสำหรับเชื้อแต่ละชนิดให้ทั่วถึง การทดสอบ ใช้ forceps ปราศจากเชื้อหยิบตัวอย่างทดสอบวางลงผิวหน้าอาหารทดสอบ ใช้ปลาย forceps กดแผ่นทดสอบเบาๆเพื่อให้ตัวอย่างสัมผัสกับอาหารทดสอบอย่างทั่วถึง นำจานอาหารทดสอบไปบ่มใน

สภาวะที่เหมาะสม อ่านผลเมื่อครบเวลาบ่ม บันทึกขนาดของ inhibition zone รอบๆ แผ่นทดสอบ [48]

2) Time kill assay (ASTM E 2315)

การเตรียม inoculums ใช้ loop แตะเชื้อทดสอบจากหลอด working stock นำมา streak บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม.จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยวๆ 1 โคโลนี เพาะลงใน nutrient broth 5 ml เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม. เตรียมหัวเชื้อทดสอบโดยปรับความขุ่นของเชื้อด้วย normal saline (0.85% NaCl) ให้มีความขุ่นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน Mc. Farland No. 0.5

วิธีการทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบ ที่ วางใส่ในจานเพาะเชื้อ จำนวน 1 ตัวอย่าง/จาน ปิเปต inoculum ปริมาตร 0.1 ml หยดลงบนชิ้นตัวอย่างทดสอบ ให้ใช้แผ่น plastic วางทับลงบน inoculum เพื่อให้ inoculum สัมผัสกับผิวหน้าตัวอย่างทดสอบอย่างทั่วถึง จากนั้น ใช้ Saran wrap พันรอบ plate เพื่อป้องกันไม่ให้ inoculum แห้งเนื่องมาจากการระเหย นำจานเพาะเชื้อ จากข้อ 2 ไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 10 นาที หรือ 1 ชม. ทำการนับปริมาณเชื้อที่ระยะเวลาตั้งต้น (ระยะเวลาสัมผัสเป็น 0 หรือT0) และปริมาเชื้อที่เหลืออยู่เมื่อ บ่มครบตามระยะเวลาสัมผัสที่กำหนดไว้ 10 นาที (T10) หรือ 1 ชม. (T1h) โดยนำชิ้นทดสอบพร้อม film ใส่ลงใน stomacher bag ที่มี SCDLP broth ใส่อยู่ 10 ml หลังจากนำเข้าเครื่อง stomacher เพื่อชะแบคทีเรียออกจากผิว ตัวอย่าง ทำการนับจำนวนแบคทีเรียใน SCDLP broth ด้วยวิธี viable cell count โดยใช้ plate count agar เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มจานเพาะเชื้อทั้งหมดที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24-48 ชม. จึงทำการนับเชื้อที่ปรากฏแล้วคำนวณ หาปริมาณเชื้อที่พบ/ชิ้นตัวอย่างทดสอบ การคำนวณ% การต้านเชื้อ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ [48]

$$R = \frac{C_0 - C_2}{C_0} \times 100$$

เมื่อ

R = เปอร์เซ็นต์การต้านเชื้อ

C_0 = $\log_{10}$ ของปริมาณเฉลี่ยของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ที่เวลา 0 นาที

C_2 = $\log_{10}$ ของปริมาณเฉลี่ยของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ที่เวลา 10 นาที หรือ 1 ชม.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะการเตรียมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะวาเนเดียม และสังกะสีโดยกระบวนการโซล-เจล โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของโลหะที่ใช้ต่าง ๆ กันภายใต้สภาวะที่ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) เป็นสารตั้งต้นที่มี Ti เป็นองค์ประกอบ ใช้ Vanadium oxide (V_2O_5) และ Zinc oxide (ZnO) เป็นสารตั้งต้นที่มีโลหะวาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) เป็นองค์ประกอบ ตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่ใช้น้ำและเอทานอลเป็นตัวทำละลาย และใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นคะตะลิสต์ในการทำปฏิกิริยา ช่วงความเข้มข้นของโลหะที่ใช้เจือ ดังนี้ 0-0.8 wt% loading สำหรับ V-doped TiO_2 และ 0 – 2wt% loading สำหรับ Zn-doped TiO_2 ผงวัสดุนาโนที่เตรียมได้จากกระบวนการดังกล่าวนำมาทดสอบสมบัติและคุณลักษณะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (Commercially available TiO_2) คือ P-25 TiO_2 นอกจากนี้ ยังทำการศึกษาการนำไปประยุกต์เป็นสารแขวนลอยสำหรับสเปรย์บนผิวผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ และทำการศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของพื้นผิวผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่เคลือบฟิล์มบางที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้

4.1 การเตรียม V-doped TiO_2 โดยกระบวนการโซล-เจล และการวิเคราะห์คุณลักษณะ

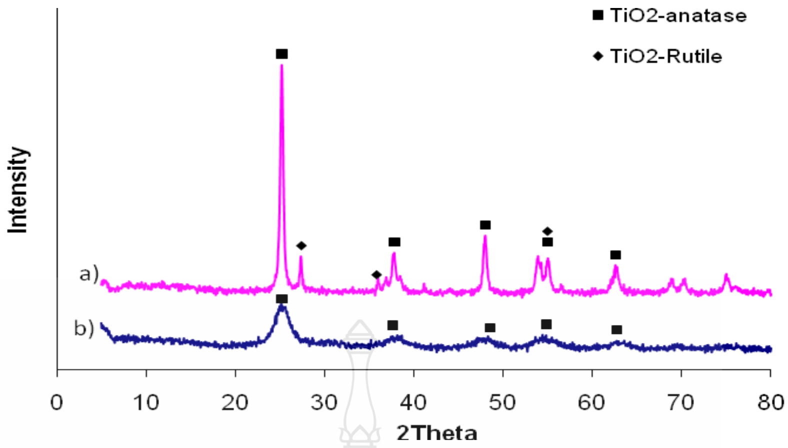
เมื่อทำการศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อศึกษาความเข้มข้นของวาเนเดียมที่ใช้เจือในช่วง 0-0.8 wt% loading โดยกระบวนโซล-เจล ลักษณะทางภายภาพของผงแห้งที่ยังไม่ผ่านการเผาแสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่า ผง undoped TiO_2 (แสดงดังรูปที่ 4.1 (a)) มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวขุ่นและเมื่อเตรียมโดยการเติมสารเจือวาเนเดียม (V-doped TiO_2) พบว่า ผง V-doped TiO_2 (แสดงดังรูปที่ 4.1 (b)) มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีเหลืองนวล ส่วน P-25 TiO_2 มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาว (แสดงดังรูปที่ 4.1 (c))

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (a) undoped TiO_2 (b) V-doped TiO_2 และ (c) P-25 TiO_2

4.1.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

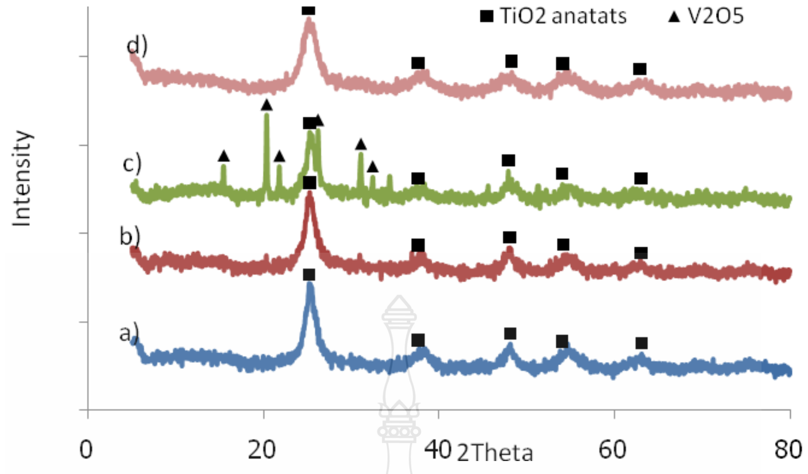
ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้นำมาตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ทั้ง P-25 TiO_2 (แสดงดังรูปที่ 4.2 (a)) แสดงโครงสร้างเฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ โดยปรากฏสัญญาณพีกของโครงสร้างอนาเทสที่ 2θ = 25.4^o, 37.8^o, 48.5^o, 54.0^o, 55.4^o, 62.9^o, 68.9^o, 70.3^o, และ 75.2^o ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (101), (004), (200), (105), (211), (204), (116), (220) และ (215) ตามลำดับ (JCPDS file No. 21-1272) สำหรับสัญญาณพีกของโครงสร้างรูไทล์ปรากฏที่ 2θ = 27.96 ^{o}, 35.70^o และ 54.65^o ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (110), (101) และ (211) ส่วนผง undoped TiO_2 (แสดงดังรูปที่ 4.2 (b)) แสดงโครงสร้างเฟสอนาเทสอย่างเดียว (JCPDF file No. 82-0514) [53]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รูปที่ 4.2 XRD Patterns ของ a) P-25 TiO_2 และ b) undoped TiO_2

เมื่อทำการศึกษา XRD Patterns ของ V-doped TiO_2 ที่เตรียมโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของวาเนเดียมในช่วง 0-0.8 wt% loading แสดงดังรูปที่ 4.3 ผงตัวอย่าง V0.2wt%/TiO_2 และ V0.4wt%/TiO_2 แสดงโครงสร้างอนาเทส แสดงดังรูปที่ 4.3 a) และ 4.3 b) ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ undoped TiO_2 (V 0wt%/TiO_2) แสดงดังรูปที่ 4.3 d) เนื่องจากรัศมีอะตอมไอออนวาเนเดียม (0.59 nm) ซึ่งใกล้เคียงกับรัศมีอะตอมของไอออนไทเทเนียม (0.68 nm) จึงทำให้ง่ายในการที่ไอออนวาเนเดียมเข้าไปแทนไอออนไทเทเนียมในแลททิซของ TiO_2 [55] อย่างไรก็ตาม XRD pattern ของผงตัวอย่าง V0.8wt%/TiO_2 แสดงโครงสร้างเฟสผสม TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสและ V_2O_5 ซึ่งเนื่องมาจากการเจือวาเนเดียมที่มากเกินไป แสดงดังรูปที่ 4.3 c) ทำให้ค่าแลททิซพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.7 c))



รูปที่ 4.3 XRD Patterns ของ a) V0.2wt%/TiO_2 b) V0.4wt%/TiO_2 c) V0.8wt%/TiO_2 และ d) Undoped TiO_2

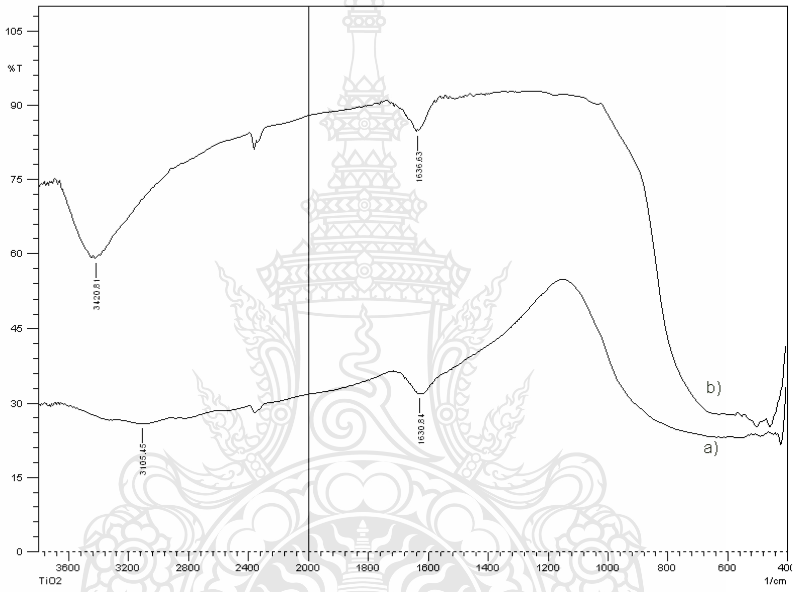
จากตารางที่ 4.1 แลททิซพารามิเตอร์ของ V-doped TiO_2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารเจือ (วาเนเดียม) มากขึ้น มีผลทำให้ค่า c/a ลดลง เนื่องจากสารเจือวาเนเดียมมีอิทธิพลในการยับยั้งการเติบโตของผลึก นอกจากนี้ เนื่องจากรัศมีไอออนของวาเนเดียมเล็กกว่ารัศมีไอออนของไทเทเนียม จึงเกิดไมโครสเตรส (Microstress) ในขณะที่เจือเข้าไปยังแลททิซผลึก TiO_2 [56] ดังนั้น ความเข้มข้นของสารเจือวาเนเดียมเหมาะสม คือ ไม่เกิน 0.4wt%

ตารางที่ 4.1 ค่าแลททิซพารามิเตอร์ของ V-doped TiO_2

ตัวอย่าง	Lattice parameter (Å)	
	a = b	c
V 0 wt%/TiO_2	3.8034	9.4840
V 0.2 wt%/TiO_2	3.7888	9.4668
V 0.4 wt%/TiO_2	3.7922	9.4972
V 0.8 wt%/TiO_2	3.8006	9.4864

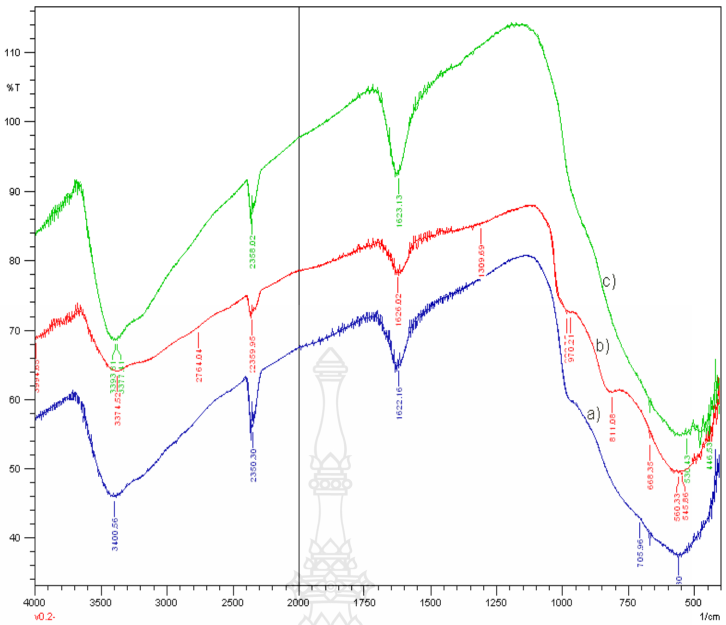
4.1.2 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR)

การศึกษาผงตัวอย่าง TiO_2 ที่ได้จากงานวิจัยนี้และ P-25 TiO_2 โดยเทคนิค FT-IR แสดงดังรูปที่ 4.4 ช่วง 450-800 cm^{-1} เกิดจาก Bending mode ของพันธะ O-Ti-O ในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส พีกที่ 1,630 cm^{-1} เกิดจาก H-O-H Bending vibration ซึ่งเป็นของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) พีกช่วงกว้างที่ 3,000-3,500 cm^{-1} เกิดเนื่องจาก O-H stretching vibration ของน้ำบริเวณผิวผงตัวอย่าง [54], [57]



รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FT-IR ของ a) undoped TiO_2 และ b) P-25 TiO_2

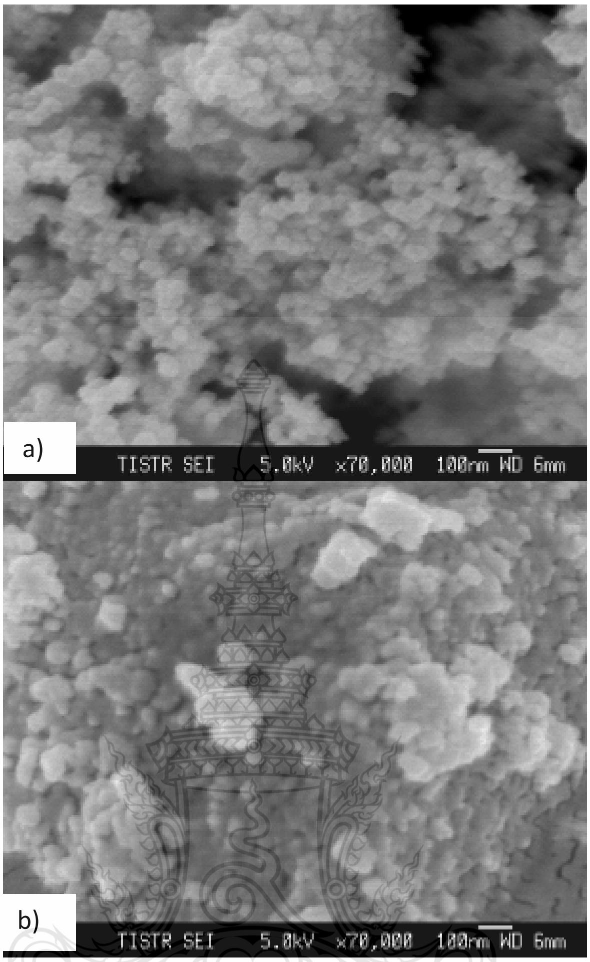
เมื่อทำการศึกษา FT-IR ของ V-doped TiO_2 เปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารเจือวาเนเดียมในช่วง 0 – 0.8 wt% แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งลักษณะของสเปกตรา FT-IR ของทุกตัวอย่างมีความคล้ายคลึงกันมาก ที่ประมาณ 500 cm^{-1} เกิดจาก stretching vibration ของพันธะ Ti-O-Ti และที่ 600 cm^{-1} เกิดจาก stretching vibration ของพันธะ Ti-O [58] อย่างไรก็ตาม ทั้งสองแบนด์ข้างต้นเกิดการซ้อนเหลื่อมอยู่ในแบนด์กว้างในช่วง 400-700 cm^{-1}



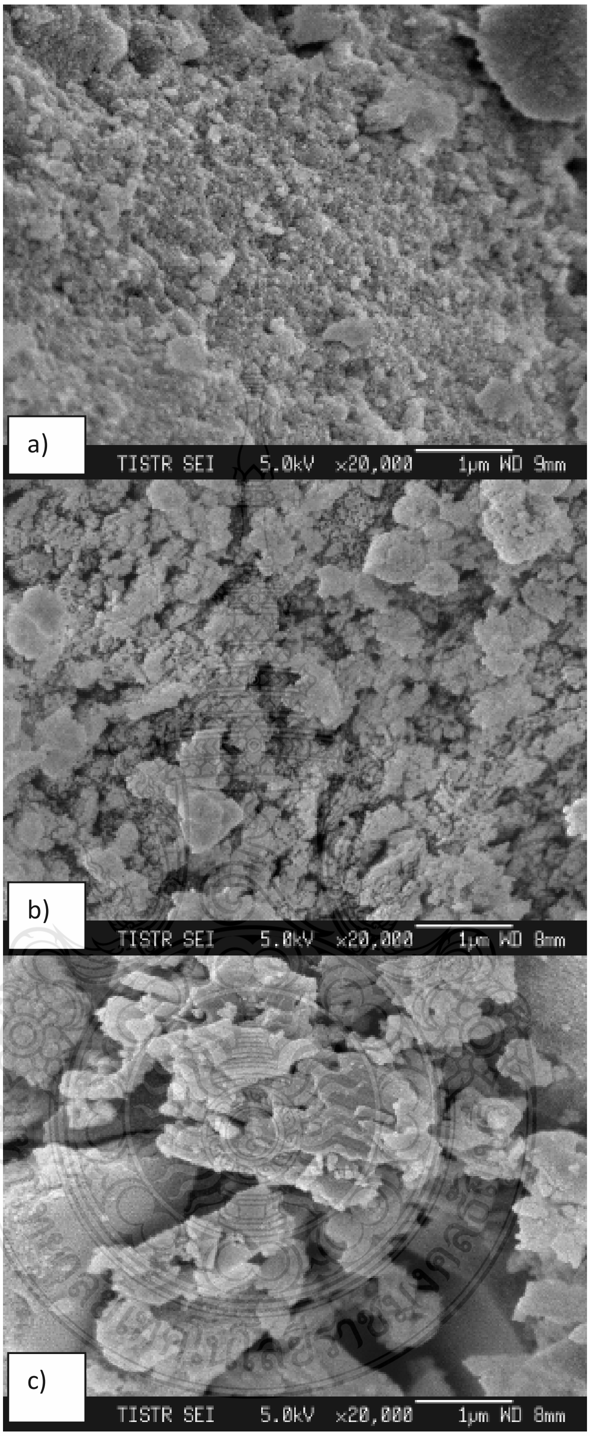
รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของ a) V0.2wt%/TiO_2 b) V0.4wt%/TiO_2 และ c) V0.8wt%/TiO_2

4.1.3 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

รูปที่ 4.6 แสดง SEM ของตัวอย่าง ผง undoped TiO_2 (แสดงดังรูปที่ 4.6 a)) และ P-25 TiO_2 (แสดงดังรูปที่ 4.6 b)) ทั้งสองตัวอย่างแสดงลักษณะเป็นอนุภาคที่อยู่ในลักษณะเกาะกลุ่มกัน (Aggregration) ขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร เมื่อศึกษาตัวอย่าง V-doped TiO_2 ที่ความเข้มข้นของสารเจือวาเนเดียมต่าง ๆ ด้วย SEM (แสดงดังรูปที่ 4.7) เมื่อสารเจือเพิ่มขึ้นขึ้นทำให้ความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับค่าแลททิซพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไป เมื่อสารเจือมากเกินพอ

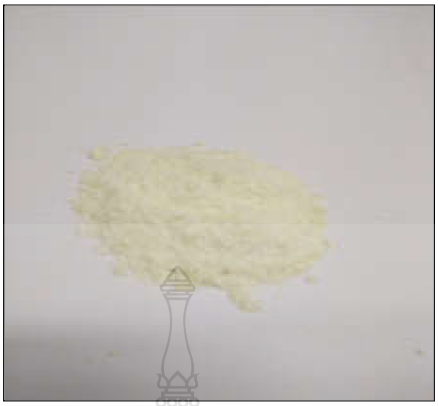


รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของ a) undoped TiO_2 และ b) P-25 TiO_2



รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของ a) V0.2wt%/TiO_2 b) V0.4wt%/TiO_2 และ c) V0.8wt%/TiO_2

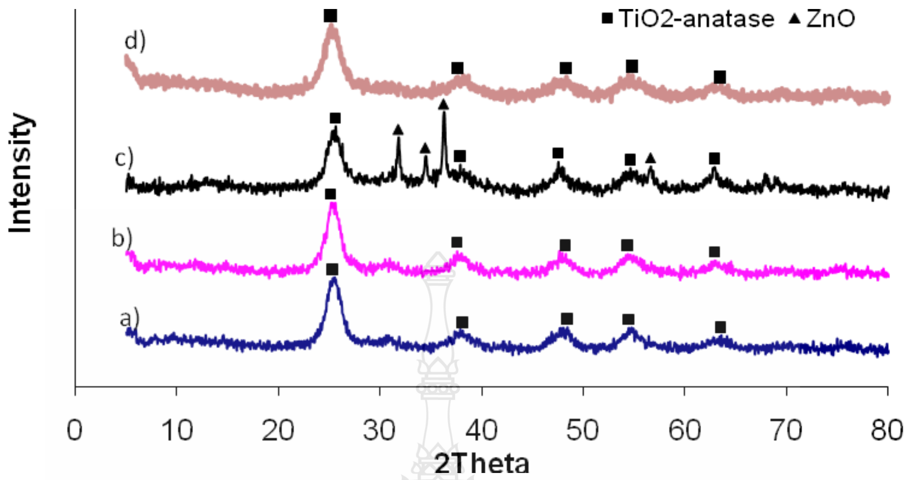
4.2 การเตรียม Zn-doped TiO_2 โดยกระบวนการโซล-เจล และการวิเคราะห์คุณลักษณะ



รูปที่ 4.8 สังกะสีออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

4.2.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

เมื่อศึกษา XRD Patterns ของ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสังกะสีในช่วง 0-4wt% loading (แสดงดังรูปที่ 4.9) ผงตัวอย่าง Zn1wt%/TiO_2 และ Zn2wt%/TiO_2 แสดงโครงสร้างอนาเทส (แสดงดังรูปที่ 4.9 (a) และ 4.9 (b)) ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ undoped TiO_2 (Zn 0wt%/TiO_2) (แสดงดังรูปที่ 4.9(d)) ซึ่งมีแนวโน้มการแทนที่ไอออนแลคทิชคล้ายกับวาเนเดียมออกไซด์เมื่อสารเจือเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 XRD Patterns ของ (a) Zn1wt%/TiO_2 (b) Zn2wt%/TiO_2 (c) Zn4wt%/TiO_2 และ (d) Undoped TiO_2

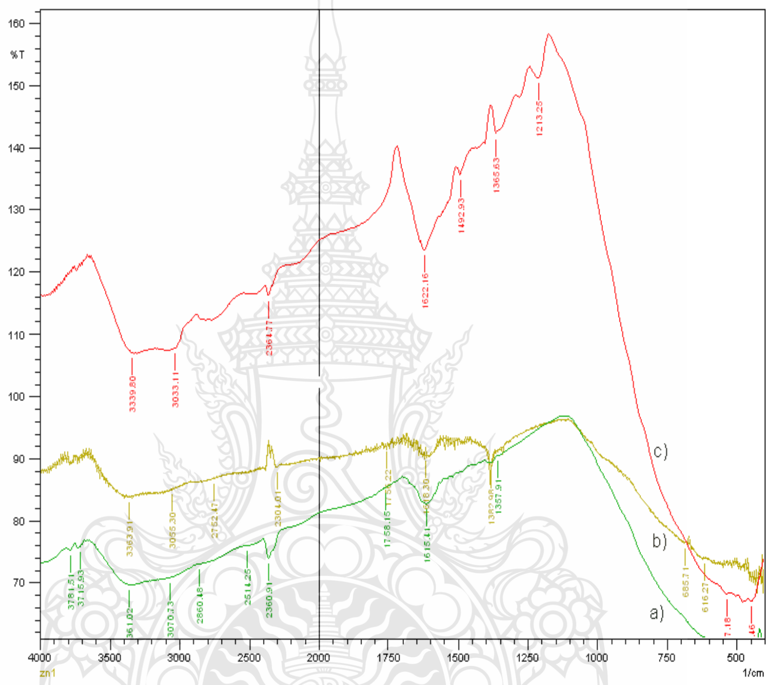
ตารางที่ 4.2 ค่าแลททิซพารามิเตอร์ของ Zn-doped TiO_2

ตัวอย่าง	Lattice parameter (Å)	
	a = b	c
Zn 0 wt%/TiO_2	3.8034	9.4840
Zn 1 wt%/TiO_2	3.8017	9.4540
Zn 2 wt%/TiO_2	3.7970	9.4520
Zn 4 wt%/TiO_2	3.7988	9.5000

จากตารางที่ 4.2 แลททิซพารามิเตอร์ของ Zn-doped TiO_2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารเจือมากขึ้น มีผลทำให้ค่า c/a ลดลง เนื่องจากสารเจือสังกะสีมีอิทธิพลในการยับยั้งการเติบโตของผลึก ดังนั้น ความเข้มข้นของสารเจือสังกะสีที่เหมาะสม คือ ไม่เกิน 1wt%

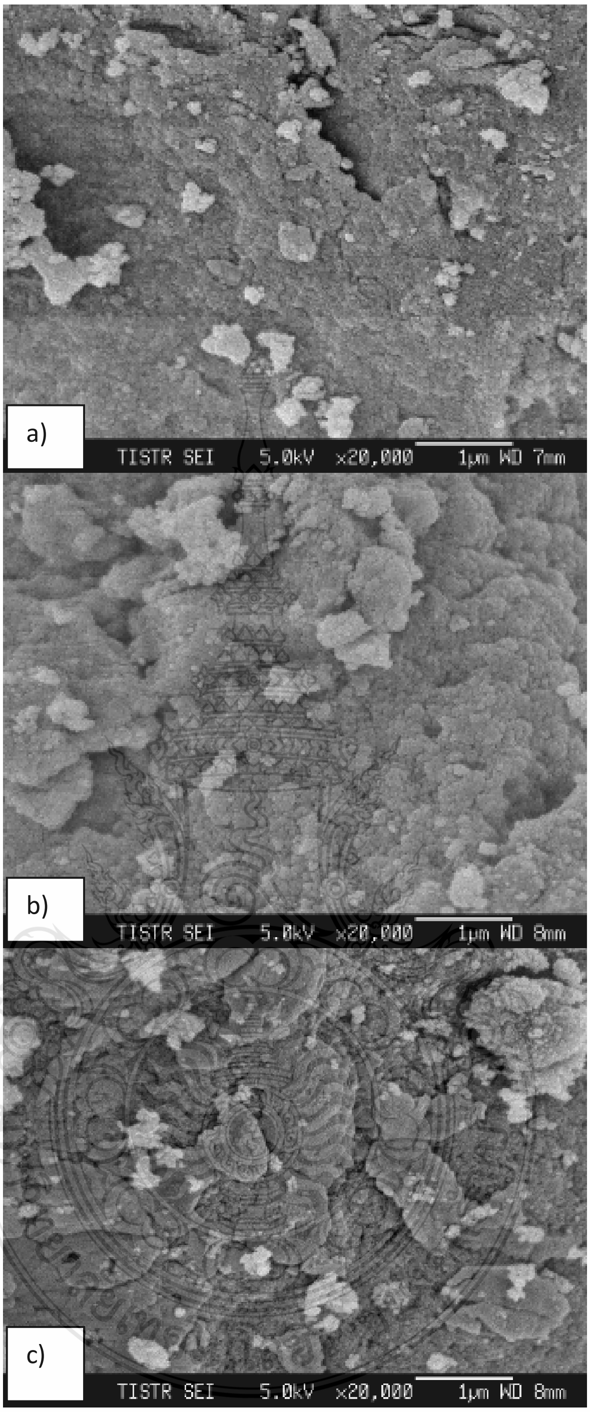
4.2.2 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR)

เมื่อทำการศึกษา FT-IR ของ Zn-doped TiO_2 เปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารเจือสังกะสีในช่วง 0 – 4 wt% (แสดงดังรูปที่ 4.10) ซึ่งลักษณะของสเปกตรา FT-IR ของทุกตัวอย่างมีความคล้ายคลึงกันมาก ที่ประมาณ 500 cm^{-1} เกิดจาก stretching vibration ของพันธะ Ti-O-Ti และที่ 600 cm^{-1} เกิดจาก stretching vibration ของพันธะ Ti-O [58]



รูปที่ 4.10 FT-IR patterns ของ a) Zn1wt%/TiO_2b) Zn2wt%/TiO_2 c) Zn4wt%/TiO_2

รูปที่ 4.11 แสดง SEM ของตัวอย่าง Zn-doped TiO_2 ที่ความเข้มข้นของสารเจือสังกะสีต่าง ๆ ด้วย SEM เมื่อสารเจือเพิ่มขึ้นทำให้ความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคที่เกิดขึ้นมากขึ้นด้วย

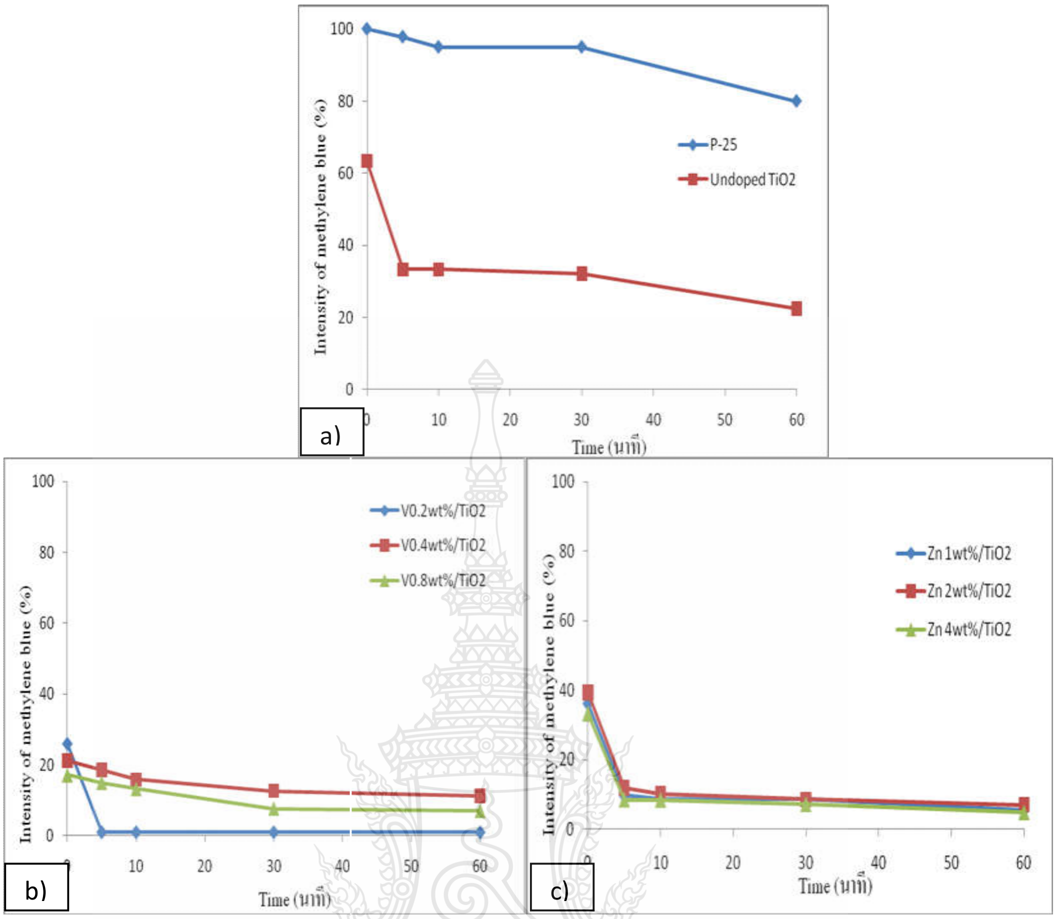


รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของ a) Zn1wt%/TiO_2 b) Zn2wt%/TiO_2 และ c) Zn4wt%/TiO_2

4.3 การศึกษาโฟโตคะตะลิติก แอคติวิตีของ TiO_2 ที่เตรียมได้

การศึกษาโฟโตคะตะลิติกแอคติวิตีของตัวอย่าง TiO_2 ที่เตรียมได้จากกระบวนการดังกล่าว โดยศึกษาการลดลงของความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลู ภายใต้การส่องด้วยแสงวิสิเบิลจากแหล่งกำเนิด เป็นเวลา 0 นาที, 5 นาที, 10 นาที, 30 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ โดยใช้ UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.12 แสดงโฟโตคะตะลิติกแอคติวิตีของ P-25 TiO_2 เทียบกับ undoped TiO_2, V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล ผง P-25 TiO_2 มีอัตราการลดลงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูช้ากว่า undoped TiO_2 (ภาพที่ 4.12 a)) ตั้งแต่เริ่มต้น ส่วนเมื่อ undoped TiO_2, V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกัน V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 มีอัตราการลดลงของสีเมทิลีนบลู เร็วกว่าสาร undoped TiO_2 เพราะการเติมสารเจือส่งผลให้ประสิทธิภาพของ TiO_2 ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะละไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลดีขึ้น [42] ระหว่าง V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่ Zn-doped TiO_2 มีอัตราการลดลงความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูใกล้เคียงกันทั้ง 3 ปริมาณความเข้มข้นซึ่งเร็วกว่า undoped TiO_2 แต่ช้ากว่า V-doped TiO_2 และพบว่า V0.2wt%/TiO_2 มีอัตราการลดลงความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูสูงที่สุด สอดคล้องกับค่าแลททิซพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณของกราฟ XRD ที่ปริมาณสารเจือวาเนเดียมที่เหมาะสม ไม่เกิน V0.4wt%/TiO_2 จะเกิดไมโครสเตรส (Microstress) ขณะที่เจือเข้าไปยังแลททิซผลึก TiO_2 ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะละไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลดีขึ้น โดยก่อให้เกิดการแทรนซิชันของการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง d-electron ของสารเจือและแถบคอนดักชันหรือแถบเวเลนซ์ของ TiO_2 ที่สารเจือวาเนเดียม V0.2wt%/TiO_2 เหมาะสม

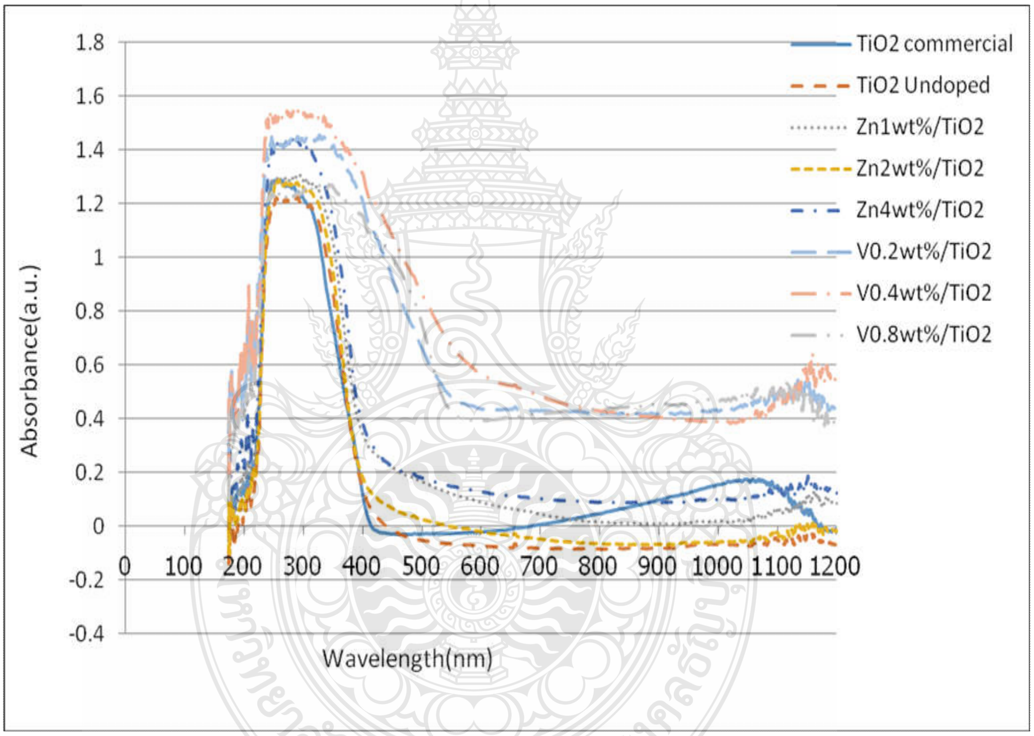


รูปที่ 4.12 โฟโตคะตะลิติกแอคติวิตีของ TiO_2 ที่เตรียมได้ โดยศึกษาจากการลดความเข้มข้นของ เมทิลีนบลู a) P-25 กับ undoped TiO_2 b) V-doped TiO_2 และ c) Zn-doped TiO_2

4.4 การศึกษาค่าแอบซอร์พแบนซ์โดยใช้เครื่อง Fiber Optic Spectrometer

เครื่องวัดความเข้มแสง (Fiber optic spectrometer) ใช้วัดค่ากำลังงานแสงเชิงสเปกตรัม จากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟ แสงเลเซอร์ เป็นต้น โดยใช้เทคนิคการวัดแบบ Fiber optic spectrometer มีตั้งแต่ความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร [38] หรือวัดค่าการดูดซับแสง การสะท้อน การเลี้ยวเบน เป็นต้น ในการวัดค่าการดูซับแสงของเครื่อง Fiber optic spectrometer รุ่น Avaspec model ซึ่งเตรียมตัวอย่างแบบ อัดขึ้นรูปทรงกลม แล้วนำมาวิเคราะห์กับเครื่องโดยใช้ Absorbance mode ความยาวคลื่นตามแสงปกติ

จากรูปที่ 4.13 ค่าแอบซอร์พแบนซ์ของ Undoped TiO_2 ที่เตรียมที่สภาวะต่าง ๆ และ P-25 ซึ่งเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า พบว่า absorption edge ของ undoped-TiO_2 และ P-25 TiO_2 มีค่า 405 nm ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น (วิสิเบิล) สำหรับผงตัวอย่าง TiO_2 ที่เจือด้วยสังกะสีที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า สังกะสีที่เจือมีผลทำให้เกิดเรดชิพ (Red shift) ของ Adsorption edge จาก 405 nm ไปเป็น 420 nm ส่วน V-doped TiO_2 เกิดเรดชิพของ Adsorption edge จาก 405 nm ไปเป็น 600-800 nm เนื่องจากระดับพลังงานของสารเจือในแถบพลังงานของ TiO_2 ก่อให้เกิดการแทรนซิชันของการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง d-electron ของสารเจือและแถบคอนดักชันหรือแถบเวเลนซ์ของ TiO_2 และการเกิดเรดชิพจะเห็นผลชัดเจนขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเจือพอเหมาะ



รูปที่ 4.13 ค่าแอบซอร์พแบนซ์ ของตัวอย่าง TiO_2 เตรียมที่สภาวะต่าง ๆ

การคำนวณค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบ (Band gap energy, E_g) โดยสมการ Kubelka-Munk แสดงดังสมการ

$$E_g = \frac{1,240}{\lambda}$$

เมื่อ E_g = พลังงานแบนด์แก็พ (ในหน่วย eV)

λ = ความยาวคลื่น (ในหน่วย nm)

จากตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีค่าน้อยกว่า P-25 TiO_2 เมื่อศึกษาพลังงานช่องว่างระหว่างแถบในตัวอย่าง Zn-doped TiO_2 พบว่า Zn1wt%/TiO_2, Zn2wt%/TiO_2 และ Zn4wt%/TiO_2 แสดงค่า 2.95, 2.94 และ 2.95 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกันและมีค่าที่น้อยกว่า undoped TiO_2 เมื่อศึกษา V-doped TiO_2 พบว่า V0.2wt%/TiO_2, V0.4wt%/TiO_2และ V0.8wt%/TiO_2 แสดงค่า 2.10, 2.17 และ 2.25 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกันระหว่าง undoped TiO_2, Zn-doped TiO_2 และ V-doped TiO_2 พบว่า V-doped TiO_2 มีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบน้อยกว่า ปริมาณการเจือที่ V0.2wt%/TiO_2 และ V0.4wt%/TiO_2มีพลังงานช่องว่างระหว่างแถบน้อยที่สุด ซึ่งจากกราฟโฟโตคะตะลิติกแอคติวิตี ที่ V0.2wt%/TiO_2 สามารถลดสีของเมททิลีนบลูได้ภายในเวลาน้อยที่สุด สอดคล้องกับค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบ ที่คำนวณได้จากกราฟ Absorbance เมื่อเทียบกับ Wavelength ที่มีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบต่ำสุด เนื่องจากการเรดชิพ (Red shift) ของ Adsorption edge จาก 405 nm ไปเป็น 600-800 nm ด้วย

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบ (Band Gap Energy) ของตัวอย่าง TiO_2 ที่เตรียมได้

Samples	Band gap Energy (eV)
P-25 TiO_2	3.03
Undoped TiO_2	2.99
Zn1wt%/TiO_2	2.95
Zn2wt%/TiO_2	2.94
Zn4wt%/TiO_2	2.95
V0.2wt%/TiO_2	2.10
V0.4wt%/TiO_2	2.17
V0.8wt%/TiO_2	2.25

จากตาราง 4.4 แสดงค่า Particle size (nm) และ BET surface area (m^2/g) พบว่า มีค่า 4.57 nm, 65 m^2/g และ 9.33 nm, 208 m^2/g ตามลำดับ ถึงแม้แบบท้องตลาด จะมีการกระจายตัวของอนุภาคมากกว่าแต่ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้อยกว่า undoped TiO_2 เช่นเดียวกันกับการเจือด้วยสังกะสีมี Particle size (nm) และ BET (m^2/g) ใกล้เคียงกับ undoped TiO_2 ส่วนการเจือด้วยวาเนเดียม (รูปที่ 4.7) จะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของ V0.2wt%/TiO_2 และ V0.4wt%/TiO_2 มีขนาดและการยึดเกาะกลุ่ม (Aggregration) ใกล้เคียงกัน (SEM) ส่วน V0.8wt%/TiO_2 จะพบว่าลักษณะอนุภาคไม่สม่ำเสมอและมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ซึ่งมีค่า 22.66 nm , 215 m^2/g, 22.34 nm , 270 m^2/g 18.31 nm , 189 m^2/g ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณการเจือของวาเนเดียมและสังกะสี ส่งผลกับลักษณะอนุภาคที่เกาะกลุ่ม (Aggregration) สอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4.7) แต่ไม่ค่อยมีผลกับการกระจายตัวของอนุภาค Particle size (nm) มากนัก สารเจือวาเนเดียม V0.2wt%/TiO_2 และ V0.4wt% มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ส่วนที่ V0.8wt%/TiO_2 ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อยลง อาจเนื่องมาจากสารเจือที่มากเกินพอส่งผลต่อการมีอิทธิพลในการยับยั้งการเติบโตของผลึกและค่าแลททิซพารามิเตอร์ (รูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1) ทำให้การทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ใช้แสงวิสิเบิลลดลง ดังนั้นสารเจือวาเนเดียมที่เหมาะสมไม่เกิน 0.4wt%/TiO_2

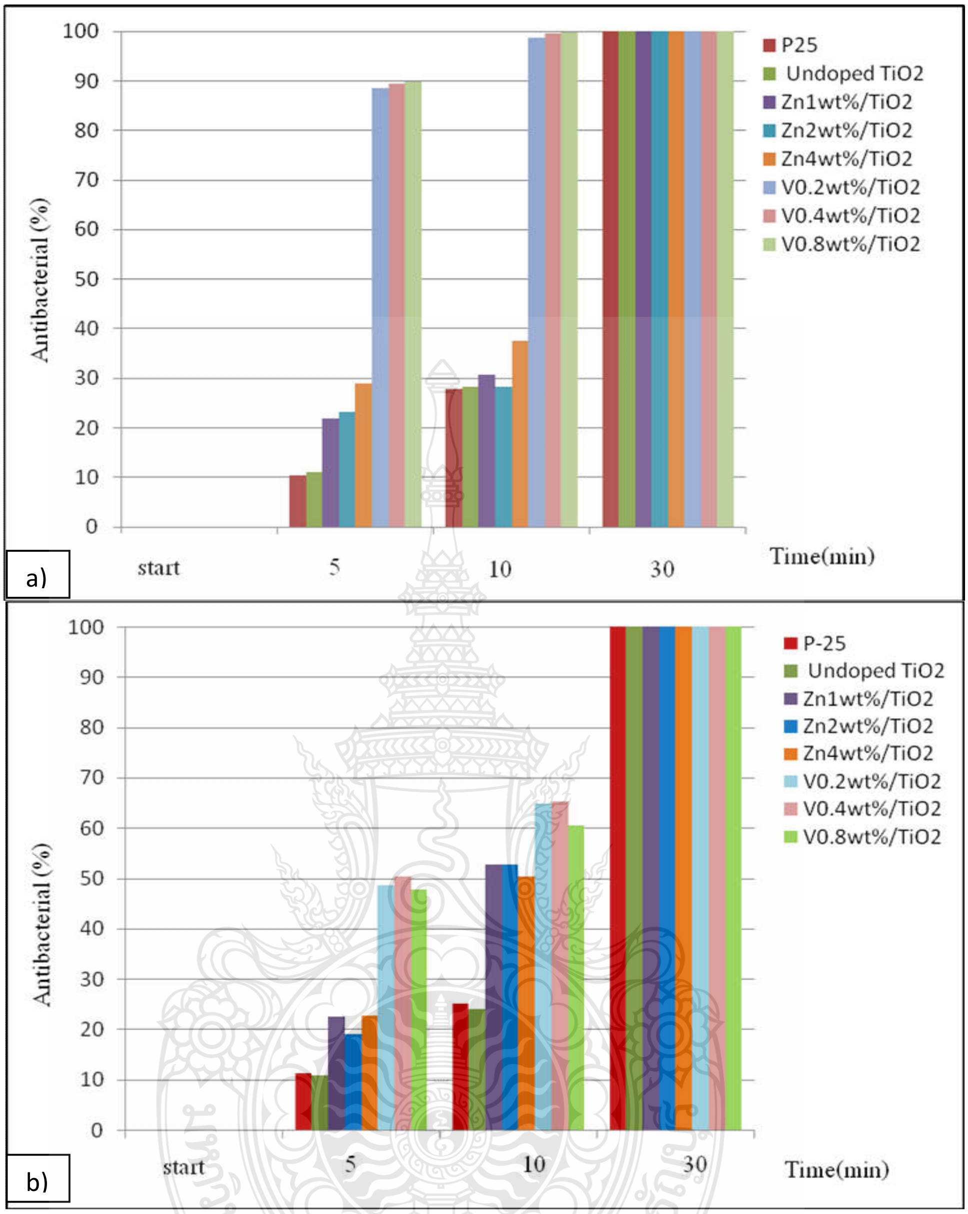
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Particle size(nm) และ BET(m^2/g)

Samples	Particle size (nm)	BET (m^2/g)
TiO_2 commercial	4.57	65
TiO_2 synthesis	9.33	208
Zn1wt%/TiO_2	30.07	144
Zn2wt%/TiO_2	31.27	164
Zn4wt%/TiO_2	39.00	202
V0.2wt%/TiO_2	22.66	215
V0.4wt%/TiO_2	22.34	270
V0.8wt%/TiO_2	18.31	189

4.5 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี Time kill assay

เตรียมสารสังเคราะห์แบบผงที่เตรียมได้ โดยวิธีโซล-เจล ตัวอย่างละ 5 กรัม จากนั้นเตรียมหัวเชื้อทดสอบ (Inoculums) ใช้ Loop แตะเชื้อจากหลอด Working stock นำมา Streak บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ 37^{o}C เป็นเวลา 24 ชม. ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยว ๆ 1 โคโลนี เพาะลงใน Nutrient broth 5 ml เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 37^{o}C เป็นเวลา 24 ชม. เตรียมหัวเชื้อทดสอบโดยปรับความขุ่นของเชื้อด้วย Normal saline (0.85% NaCl) ให้มีความขุ่นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน Mc. Farland No. 0.5 (Biomerieux) การทดสอบ เมื่อครบเวลาบ่ม บันทึกขนาดของ inhibition zone รอบๆ แผ่นทดสอบ เทผงตัวอย่างลงในหลอดทดลองปราศจากเชื้อ ตัวอย่างละ 3 หลอด จากนั้น ใส่ inoculums ปริมาตร 100 ไมโครลิตรลงบนผงตัวอย่างผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง เมื่อครบระยะเวลาสัมผัส 5, 10, 30 และ 60 นาทีใส่ letheen broth ปริมาตร 10 มล. ลงไปในแต่ละหลอด เขย่าให้เข้ากันอย่างทั่วถึง ทำการนับเชื้อที่เหลืออยู่ในแต่ละหลอดด้วยวิธี Standard plate count technique คำนวณหา % การต้านเชื้อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมลบ และทำเป็นกราฟระหว่าง Antibacterial (%) กับเวลา

จากรูปที่ 4.14 เมื่อเวลาผ่านไปถึง 60 นาที ทั้ง P-25 TiO_2, Unodped TiO_2 และ Doped TiO_2 สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้เกือบ 100 เปอร์เซนต์ แต่ V-doped TiO_2 มีอัตราเร็วในการต้านเชื้อแบคทีเรีย ที่ 5 นาที ของ V0.2wt%/TiO_2 , V0.4wt%/TiO_2 และ V0.8wt%/TiO_2 เป็น 88.64 % ,89.4% และ 89.79% ที่ 10 นาที 98.64% ,99.69% และ 99.79% ส่วน Zn-doped TiO_2 ของ Zn1wt%/TiO_2 , Zn2wt%/TiO_2 และ Zn4wt%/TiO_2 เป็นที่ 5 นาที 21.96%, 23.12% และ 28.9% และที่ 10 นาที 30.64%, 28.32% และ 37.53% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า V-doped TiO_2 มีอัตราเร็วในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่สูงกว่า Unodped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 โดยแค่ที่10 นาทีก็สามารถทำได้ เกือบ 100 เปอร์เซนต์ สำหรับ Zn-doped TiO_2 มีความเร็วในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใกล้เคียงกัน ส่วน *S. aureus* ที่ Zn1wt%/TiO_2 ใช้เวลาในการต้านเชื้อแบคทีเรียน้อยที่สุด สำหรับ V-doped TiO_2 พบว่า ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใกล้เคียงกันเช่นกัน ส่วน *S. aureus* V0.2wt%/TiO_2 และ V0.4wt%/TiO_2 มีอัตราเร็วในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่เร็วกว่าที่เจือสารมากเกินไป สอดคล้องกันจากค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบ ที่มีค่าเข้าใกล้วิสิเบิลมากกว่าส่งผลให้สมบัติโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้น [3], [42] อาจอธิบายเพิ่มได้ว่าสาร V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้สามารถต้านแบคทีเรียได้ทั้งสองชนิด แต่ต้านแบคทีเรียแกรมบวก (Gram positive bacteria) ได้มากกว่า แกรมลบ (Gram negative bacteria) เล็กน้อย



รูปที่ 4.14 แสดงการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay ของเชื้อแบคทีเรีย a) *E.coli* และ b) *S.aureus*

4.6 ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่สเปรย์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

จากการเปรียบเทียบสมบัติโฟโตคะตะลิติก ของ undoped TiO_2 กับสารเจือทั้ง 2 ชนิด (วาเนเดียมและสังกะสี) พบว่าการเติมสารเจือลงไปทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของ TiO_2 [23], [26], [42], [45] ให้มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกดีขึ้นภายใต้แสงวิสิเบิล รวมถึงการต้านเชื้อแบคทีเรียเร็วขึ้นภายใน 30 นาทีของสารเจือทั้ง 2 ชนิด

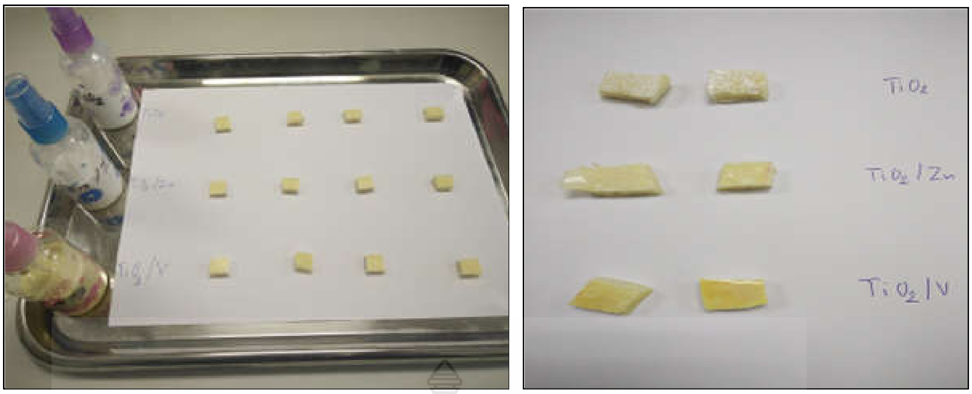
สารเจือวาเนเดียม การทดสอบสมบัติโฟโตคะตะลิติกของสารที่เตรียมได้ และการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay รวมถึงคุณสมบัติต่างๆ สารเจือวาเนเดียมทั้ง 3 ความเข้มข้น V0.2wt%/TiO_2, V0.4wt%/TiO_2 และ V0.8wt%/TiO_2 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใกล้เคียงกัน ส่วนการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ที่ความเข้มข้น V0.2wt%/TiO_2 และ V0.4wt%/TiO_2 ใกล้เคียงกันแต่เร็วกว่าปริมาณที่เจือมาก คือภายในเวลา 10 นาที สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียเร็วกว่าที่ V0.8wt%/TiO_2 และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของสารเจือวาเนเดียมทั้ง 3 ความเข้มข้น พบว่า V0.2wt%/TiO_2 สมบัติโฟโตคะตะไลติกดีกว่าความเข้มข้นอื่น เพราะแค่เวลา 5 นาทีก็สามารถลดความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูได้เกือบหมด สอดคล้องกับค่าช่องว่างพลังงานระหว่างแถบที่คำนวณได้ ซึ่งV0.2wt%/TiO_2 มีค่าเข้าใกล้วิสิเบิลโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (2.10 eV) อาจเนื่องมาจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงเลือกความเข้มข้นของสารเจือวาเนเดียมที่ V0.2wt%/TiO_2 ซึ่งถึงแม้จะเจือแค่ปริมาณไม่มากก็ส่งผลต่อสมบัติที่ดีแล้ว

สารเจือสังกะสี การทดสอบสมบัติโฟโตคะตะลิติกของสารที่เตรียมได้ และการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay รวมถึงคุณสมบัติต่างๆ สารเจือสังกะสีทั้ง 3 ความเข้มข้น Zn1wt%/TiO_2, Zn2wt%/TiO_2 และ Zn4wt%/TiO_2 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใกล้เคียงกัน ส่วนการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ที่ความเข้มข้น Zn1wt%/TiO_2 มีค่าการต้านเชื้อที่สูงกว่าความเข้มข้นอื่น ภายใน 10 นาที สามารถต้านเชื้อได้เกิน 50 เปอร์เซ็นต์แล้ว และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของสารเจือวาเนเดียมทั้ง 3 ความเข้มข้น พบว่า Zn1wt%/TiO_2, Zn2wt%/TiO_2 และ Zn4wt%/TiO_2 มีสมบัติโฟโตคะตะไลติกใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่าช่องว่างพลังงานระหว่างแถบที่คำนวณได้ซึ่งไม่แตกต่างกันมาก แต่มีค่าที่เข้าใกล้แสงวิสิเบิลได้มากกว่าที่ไม่เจือสังกะสี งานวิจัยนี้จึงพบว่าการเจือสังกะสี Zn1wt%/TiO_2 เพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติโฟโตคะตะไลติกและการต้านเชื้อแบคทีเรียได้ดี

เตรียมสารแขวนลอยที่มีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แบบสเปรย์ของ undoped TiO_2, V0.2wt%/TiO_2 และ Zn1wt%/TiO_2 เตรียมดังนี้ นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์หนัก 5 g และเติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 ml ปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปอัตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เสถียร จะได้สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชนิด คือ สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวาเนเดียม และสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสี

สารแขวนลอยดังกล่าวนำมาใช้บนผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ (หมอนยางพารา) โดยนำสารแขวนลอย ทั้ง 3 ชนิด สเปรย์บนหมอนยางพารา (รูปที่ 4.15) ที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 1 ซม $\times$1 ซม (ภาพที่ 4.16) แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 วัน และ 7 วัน เพื่อนำมาทดสอบการยึดเกาะของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติและทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียต่อไป

รูปที่ 4.15 ผลิตภัณฑ์หมอนยางพาราที่นำมาตัดเพื่อการทดลอง



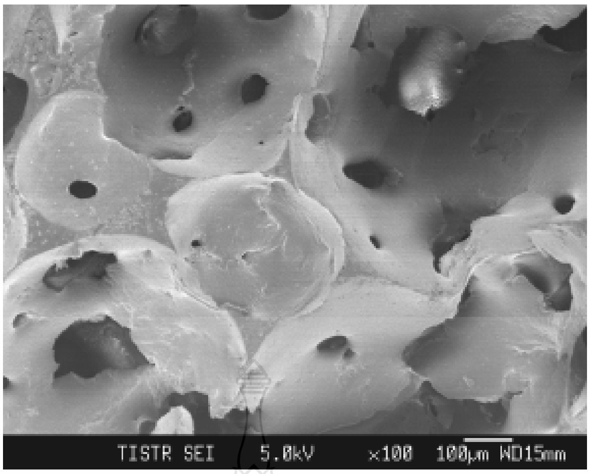
รูปที่ 4.16 ก่อนสเปรย์และหลังสเปรย์บนผลิตภัณฑ์ยางพารา

4.6.1 ทดสอบสมบัติของสารละลายที่เตรียมได้บนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ยางพาราเมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 วัน และ 7 วัน

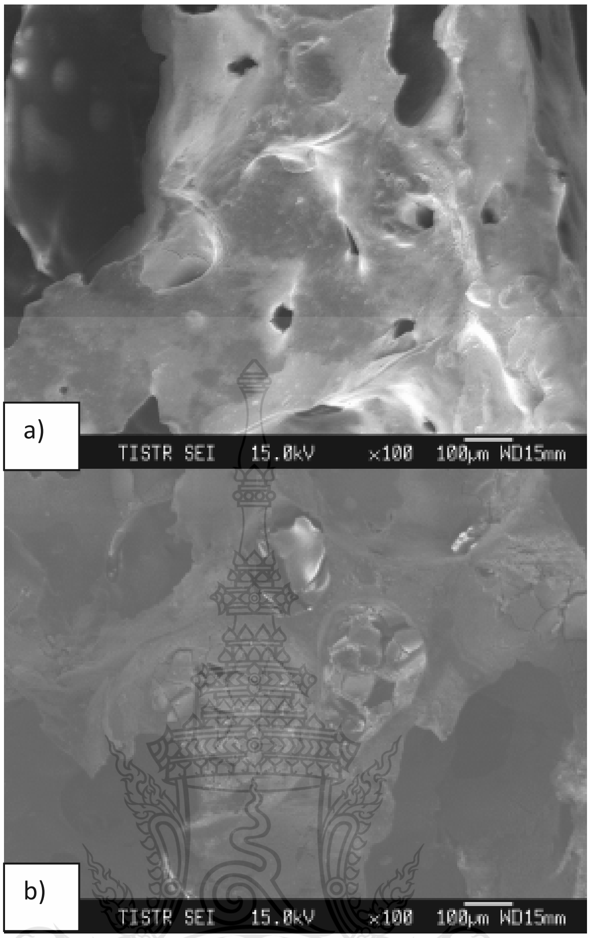
1) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพถ่าย SEM (รูปที่ 4.18-4.20) จะเห็นได้ว่าเมื่อสเปรย์สายละลายลงไป พบว่า มีการยึดเกาะของสารละลายเป็นจุดๆกระจายออกไป เมื่อเทียบกับที่ไม่ได้ทำการสเปรย์จะไม่มีการยึดเกาะของอนุภาค และเมื่อเวลาผ่านไป 7 วันแล้ว ลักษณะที่พบคือมีการแตก แห้ง ของชิ้นงานและอนุภาคที่พบมีน้อยลง อาจเนื่องมาจาก ระยะเวลา ลม หรืออุณหภูมิภายในห้อง ซึ่งเปรียบได้กับสภาพปกติของผลิตภัณฑ์ยางพาราเมื่ออยู่ในที่พักอาศัย ซึ่งทั้ง undoped TiO_2, V0.2wt%/TiO_2 และ Zn1wt%/TiO_2 มีลักษณะคล้ายกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

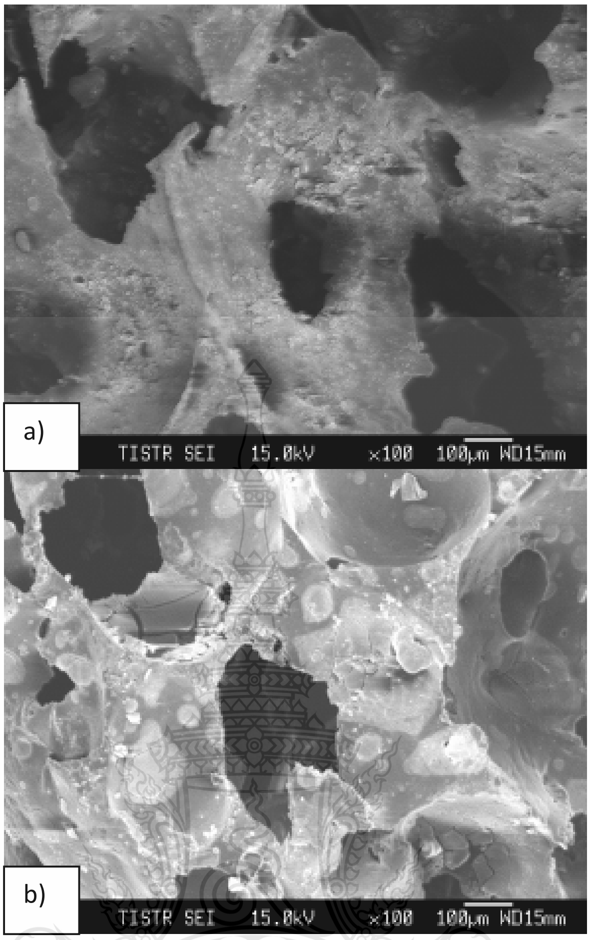


รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่ไม่ได้ทำการสเปรย์



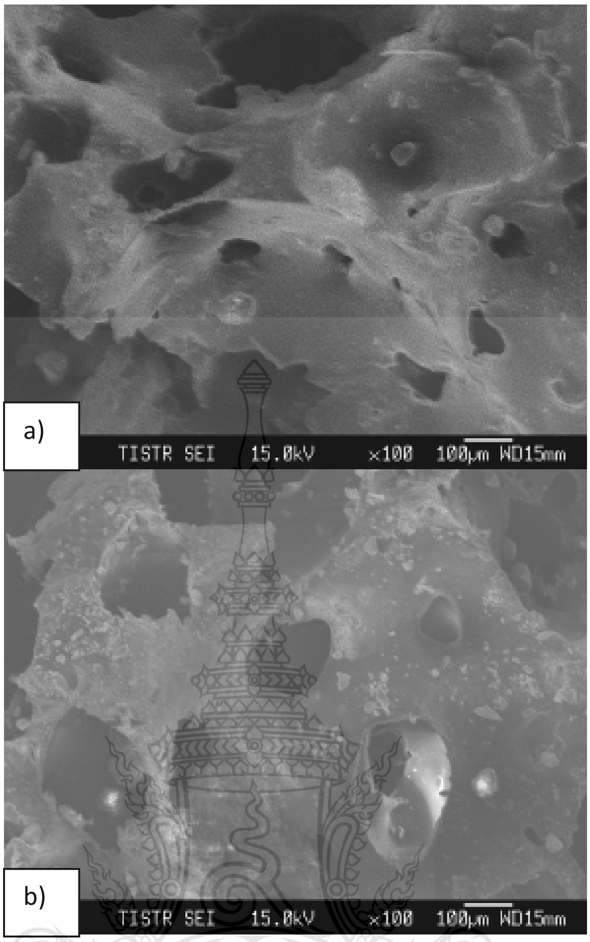
รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ undoped TiO_2 a) 1วัน และ b) 7วัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ Zn1wt%/TiO_2 a) 1วัน และ b) 7วัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

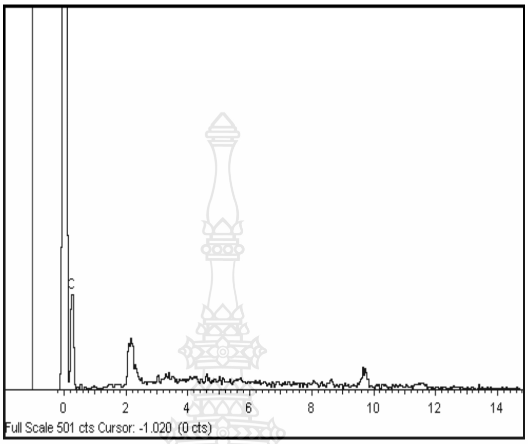


รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ a) V0.2wt%/TiO_2 1วัน และ b) V0.2wt%/TiO_2 7วัน

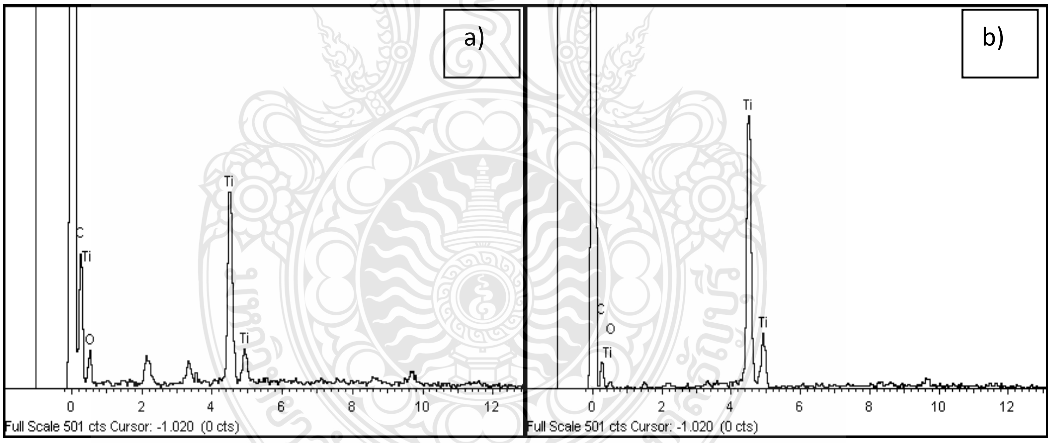
2) วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX)

จากผล EDX ของชิ้นงาน non spay (รูปที่ 4.21) เทียบกับชิ้นงานที่สเปรย์ (รูปที่ 4.22-4.24) พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้สเปรย์ จะพบแค่พื้นผิวของยางพาราธรรมชาติเท่านั้น (C, Carbon) ส่วนชิ้นงานยางพาราธรรมชาติที่สเปรย์ (รูปที่ 4.22-4.24 และตารางที่ 4.5) พบว่าสารทั้ง 3 ชนิด undoped TiO_2, Zn1wt%/TiO_2 และ V0.2wt%/TiO_2 ทิ้งไว้ 1วัน พบสารสเปรย์ที่ติดบนพื้นผิวประมาณ 2-12 % undoped TiO_2 10 %, Zn1wt%/TiO_2 (Ti, TiO_2 และ Zn, ZnO) 12 % และ V0.2wt%/TiO_2 (Ti, TiO_2 และ V, V_2O_5) พบน้อยที่สุดที่ 2% อาจเนื่องมาจากเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเจือของวาเนเดียมน้อยกว่าของสังกะสีออกไซด์จึงพบปริมาณน้อยกว่า ส่วนเมื่อเวลาผ่านไป 7วัน มีแนวโน้มลดลงหรือใกล้เคียง

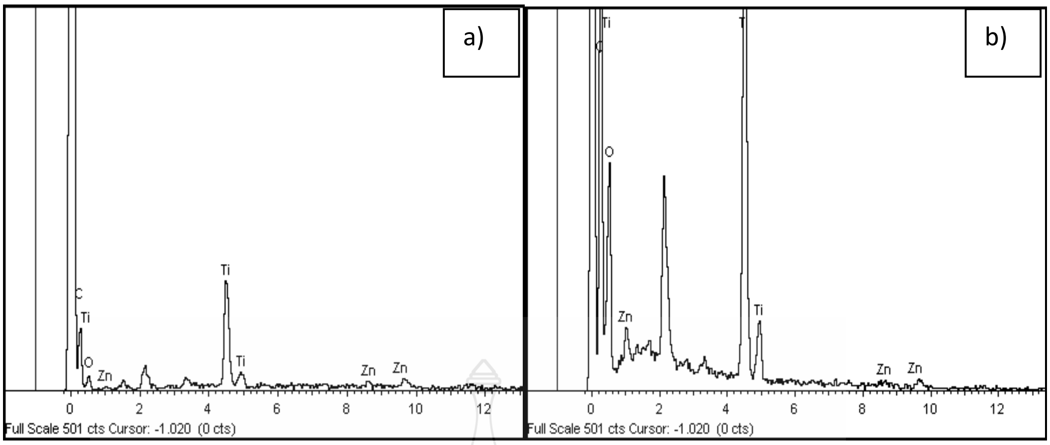
กัน undoped TiO_2 10 %, Zn1wt%/TiO_2 (Ti, TiO_2 และ Zn, ZnO) 9 % และ V0.2wt%/TiO_2 (Ti, TiO_2 และ V, V_2O_5) 2 % ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะภาพถ่าย SEM ที่มีลักษณะแห้งขึ้น พร้อมหลุดลอกได้โดยง่าย



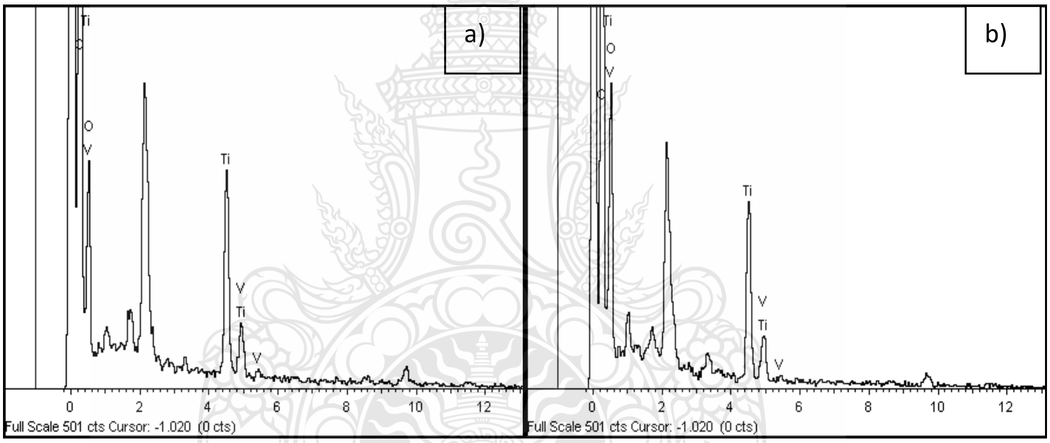
รูปที่ 4.21 กราฟ EDX ของ non Spay



รูปที่ 4.22 กราฟ EDX ของ undoped TiO_2 a) 1วัน และ b) 7วัน



รูปที่ 4.23 กราฟ EDX ของ Zn1wt%/TiO_2 a) 1วัน และ b) 7วัน



รูปที่ 4.24 กราฟ EDX ของ V0.2wt%/TiO_2 a) 1วัน และ b) 7 วัน

ตารางที่ 4.5 ธาตุเชิงปริมาณโดยเครื่อง EDX

จำนวนวันก่อนทดสอบ	Non spay	undoped TiO_2		Zn1wt%/TiO_2			V0.2wt%/TiO_2		
	C+O	C+O	TiO_2	C+O	TiO_2	ZnO	C+O	TiO_2	V_2O_5
1วัน	100	89.23	10.77	87.26	12.56	0.18	98.26	1.47	0.27
7วัน	100	89.27	10.73	90.49	9.31	0.20	97.88	1.90	0.22

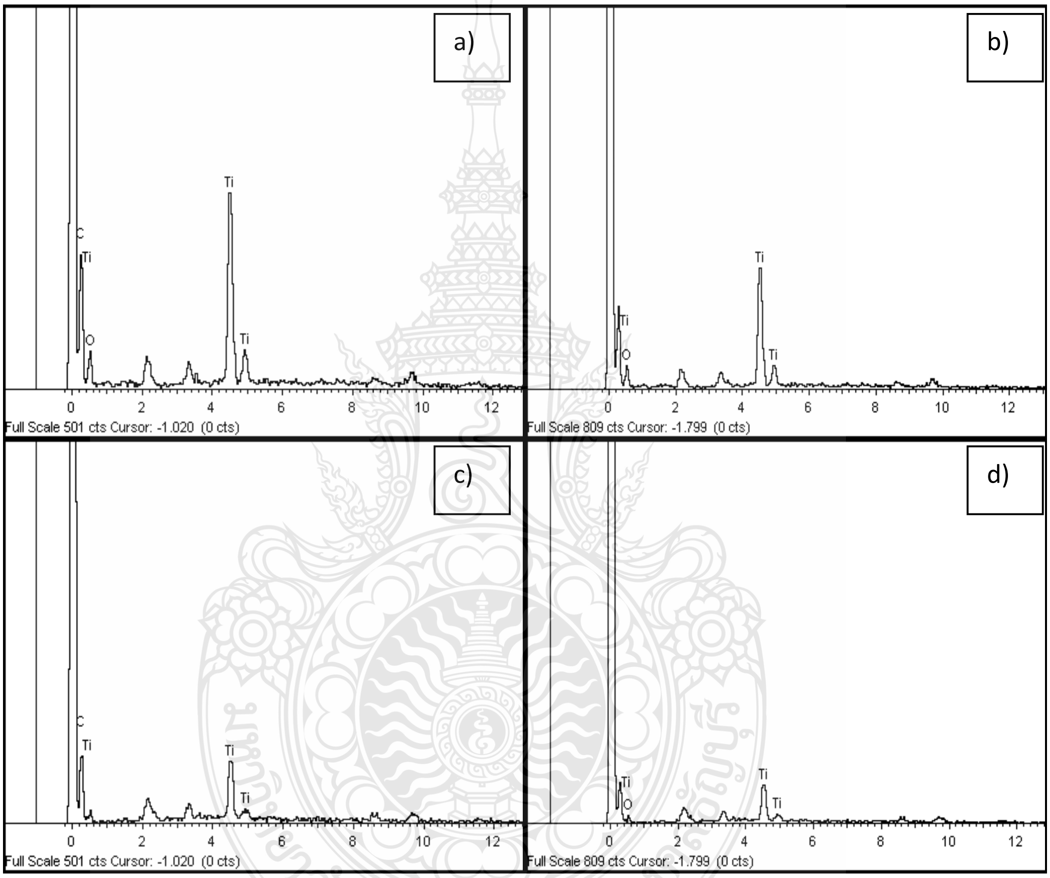
4.6.2 การนับจำนวนครั้งในการเช็ดออกของชิ้นงาน จนหมดคราบหลังสเปรย์แล้วทิ้งไว้ 1 วัน โดยวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) ที่เหลืออยู่ในการเช็ดแต่ละครั้ง

สารแขวนลอยดังกล่าวนำมาใช้บนผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ (หมอนยางพารา) โดยนำสารแขวนลอย ทั้ง 3 ชนิด สเปรย์บนหมอนยางพารา (รูปที่ 4.15) ที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 1 ซม. ×1 ซม. (รูปที่ 4.16) แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 วัน เพื่อนำมาทดสอบการยึดเกาะของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ โดยการนับจำนวนครั้งในการเช็ดออกของสารบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์จนแห้งแล้ว

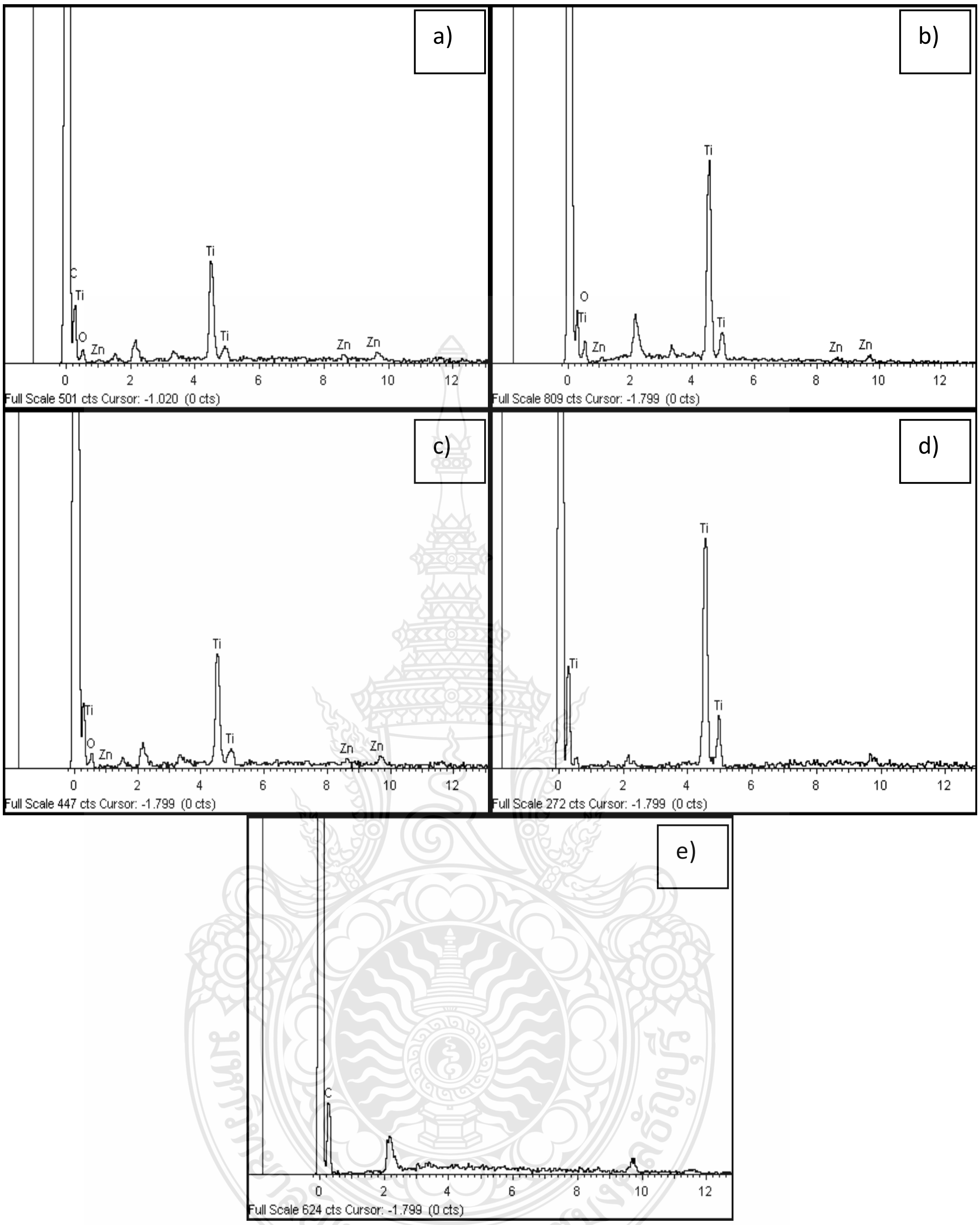
จากตารางที่ 4.6 สรุปจำนวนครั้งในการเช็ดออกได้ดังนี้ undoped TiO_2 3 ครั้ง, Zn1wt%/TiO_2 4 ครั้ง และ V0.2wt%/TiO_2 3 ครั้ง จึงไม่พบสารหลงเหลืออยู่ กล่าวคือ undoped TiO_2 เริ่มต้นที่ 10.77 %, 1 ครั้ง 4.56 %, 2 ครั้ง 3.12 % และ 3 ครั้ง 0.09 % ตามลำดับ Zn1wt%/TiO_2 (Ti, TiO_2 และ Zn, ZnO) เริ่มต้นที่ 12 %, 1 ครั้ง 7 %, 2 ครั้ง 7 % , 3 ครั้ง 4 % และ 4 ครั้ง 0.08 % ตามลำดับ V0.2wt%/TiO_2 (Ti, TiO_2 และ V, V_2O_5) เริ่มต้นที่ 2 %, 1 ครั้ง 2 %, 2 ครั้ง 1.8 % และ 3 ครั้ง 0.09 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนครั้งในการเช็ดเพิ่มขึ้น ปริมาณสารที่เกาะติดบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ยางพาราก็จะค่อยๆลดลง ดังนั้นอาจสื่อถึงการใช้งานจริงจำนวนครั้งในการสัมผัสหรือเช็ดบนพื้นผิวจะได้ประมาณ 3-4 ครั้ง จึงสเปรย์ใหม่

ตารางที่ 4.6 จำนวนครั้งในการเช็ดออก ตรวจสอบปริมาณที่พบสารประกอบที่พื้นผิวด้วย EDX

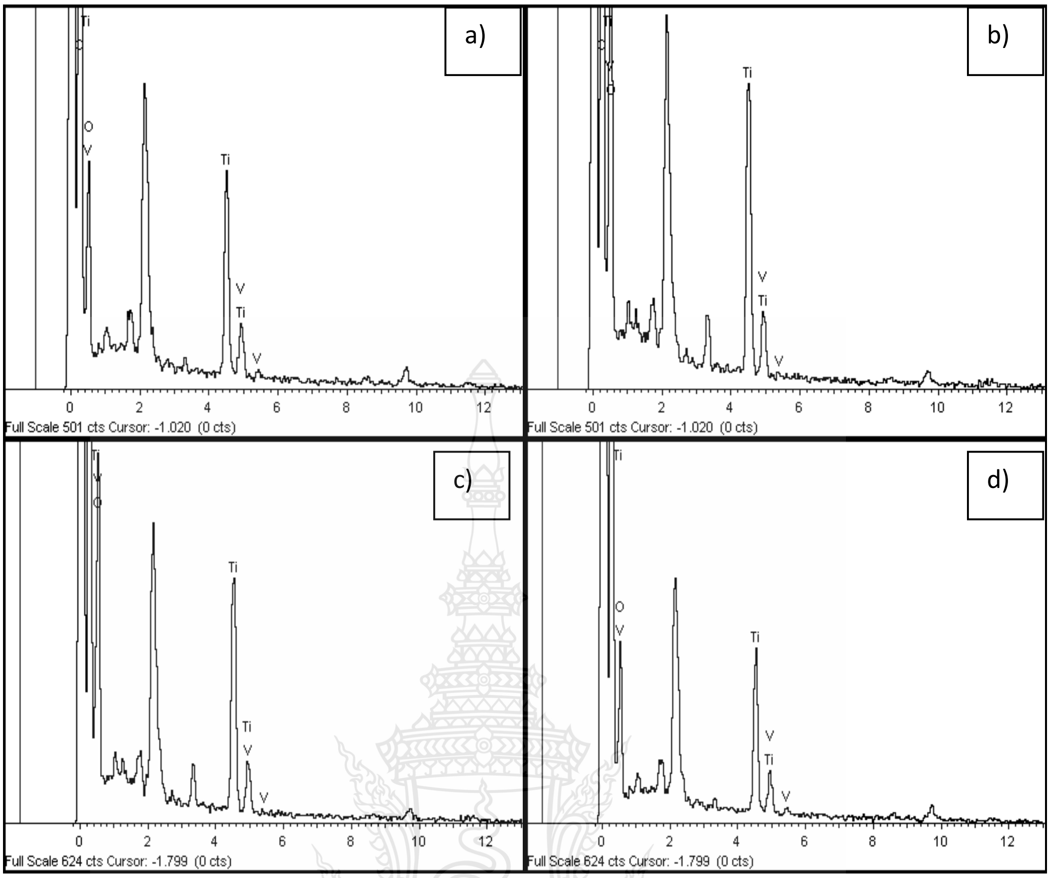
ตัวอย่าง	จำนวนครั้ง
undoped TiO_2	3
Zn1wt%/TiO_2	4
V0.2wt%/TiO_2	3



รูปที่ 4.25 กราฟ EDX ตามจำนวนครั้งที่เช็ดของ undoped TiO_2 a) 0 ครั้ง b) 1ครั้ง c) 2 ครั้ง d) 3 ครั้ง



รูปที่ 4.26 กราฟ EDX ตามจำนวนครั้งที่เช็ดของ Zn1wt%/TiO_2 a) 0 ครั้ง b) 1 ครั้ง c) 2 ครั้ง d) 3 ครั้ง e) 4 ครั้ง



รูปที่ 4.27 กราฟ EDX ตามจำนวนครั้งที่เช็ดของ V0.2wt%/TiO_2 a) 0 ครั้ง b) 1ครั้ง c) 2 ครั้ง d) 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.7 จำนวนครั้งเช็ดของผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์สารละลาย แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน

จำนวนครั้ง	undoped TiO_2		Zn1wt%/TiO_2			V0.2wt%/TiO_2		
	C+O	TiO_2	C+O	TiO_2	ZnO	C+O	TiO_2	V_2O_5
0	89.23	10.77	87.26	12.56	0.18	98.26	1.47	0.27
1	95.44	4.56	92.62	7.15	0.23	97.99	1.8	0.21
2	96.88	3.12	92.67	7.22	0.11	98.1	1.82	0.08
3	99.91	0.09	95.81	4.08	0.11	99.91	0.09	0
4	-	-	99.92	0.08	0	-	-	-

4.6.3 ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่สเปรย์แล้วทิ้งไว้ 1 วัน และ 7 วัน

1) Disk diffusion assay

เตรียมชิ้นงานผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์พื้นผิวแล้วที่ 1 วัน และ 7 วัน ของ undoped TiO_2, Zn1wt%/TiO_2 และ V0.2wt%/TiO_2 จากนั้นเตรียมเชื้อในการทดสอบโดย การเตรียม inoculums ใช้ loop แตะเชื้อทดสอบจากหลอด working stock นำมา streak บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยวๆ 1 โคโลนี เพาะลงใน nutrient broth 5 ml เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม. เตรียมหัวเชื้อทดสอบโดยปรับความขุ่นของเชื้อด้วย normal saline (0.85% NaCl) ให้มีความขุ่นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน Mc. Farland No. 0.5 การเตรียมอาหารทดสอบ เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller-Hinton agar ซึ่งหลอมจนละลายอย่างทั่วถึงและมีอุณหภูมิประมาณ 45°C ลงในจานเพาะเชื้อ (90 mm) ปริมาตร 25 ml/จาน ตั้งทิ้งไว้จนอาหารทดสอบแข็ง จากนั้นใช้ cotton swab ปราศจากเชื้อจุ่มหัวเชื้อทดสอบป้ายลงบนผิวหน้าอาหารทดสอบสำหรับเชื้อแต่ละชนิดให้ทั่วถึง การทดสอบ ใช้ forceps ปราศจากเชื้อหยิบตัวอย่างทดสอบวางลงผิวหน้าอาหารทดสอบ ใช้ปลาย forceps กดแผ่นทดสอบเบาๆเพื่อให้ตัวอย่างสัมผัสกับอาหารทดสอบอย่างทั่วถึง นำจานอาหารทดสอบไปบ่มในสภาวะที่เหมาะสม อ่านผลเมื่อครบเวลาบ่ม บันทึกขนาดของ inhibition zone รอบๆ แผ่นทดสอบ [48]

จากผลการทดสอบ ตารางที่ 4.8 เนื่องจากการทดสอบแบบ Disk diffusion assay ต้องเป็นชิ้นงานหรือตัวอย่างที่สามารถละลายได้ภายใต้โซนที่เพาะเชื้อจึงจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์สารละลายทั้ง 3 ชนิดลงไปไม่สามารถละลายได้ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้น

ตารางที่ 4.8 การทดสอบด้วยวิธี Disk diffusion assay ที่ 1วัน และ 7 วัน

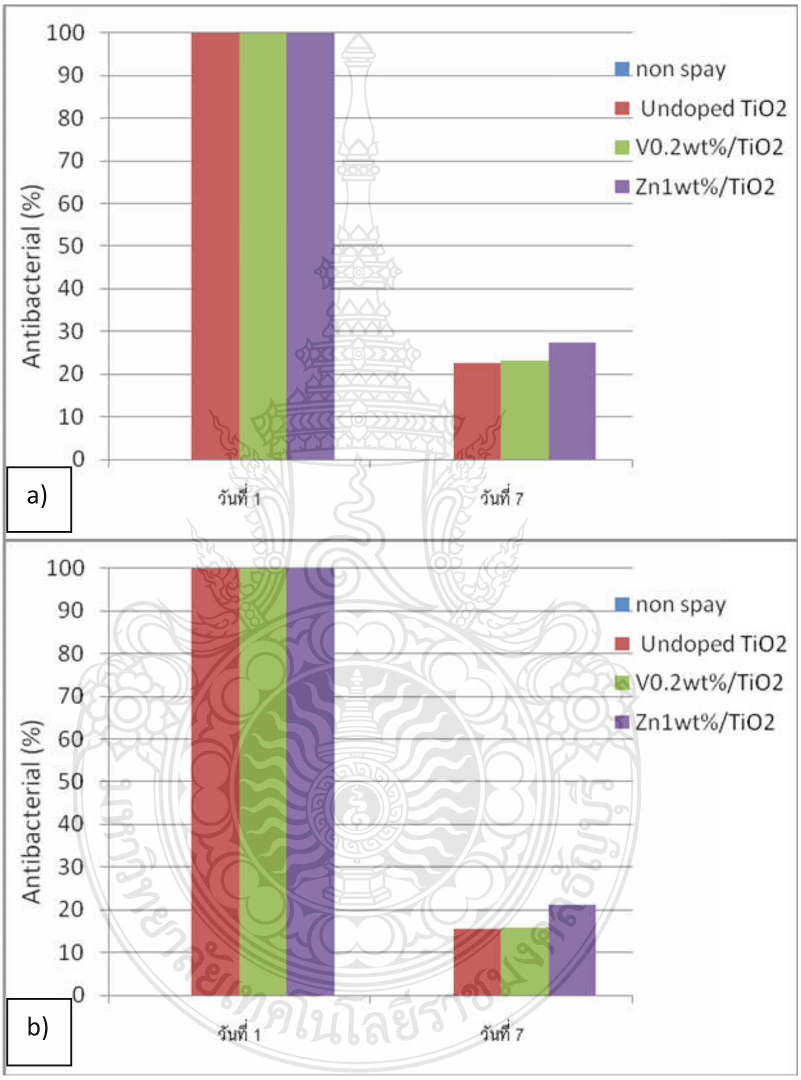
ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดของ inhibition zone (mm)	
	วันที่ 1	วันที่ 7
TiO_2 synthesis	0	0
V0.2wt%/TiO_2	0	0
Zn1wt%/TiO_2	0	0
Non spray	0	0

2) Time kill assay (ASTM E 2315)

เตรียมชิ้นงานผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์พื้นผิวแล้วที่ 1 วัน และ 7 วัน ของ undoped TiO_2, Zn1wt%/TiO_2 และ V0.2wt%/TiO_2 จากนั้นเตรียมเชื้อในการทดสอบโดย การเตรียม inoculums ใช้ loop แตะเชื้อทดสอบจากหลอด working stock นำมา streak บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม.จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยวๆ 1 โคโลนี เพาะลงใน nutrient broth 5 ml เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม. เตรียมหัวเชื้อทดสอบโดยปรับความขุ่นของเชื้อด้วย normal saline (0.85% NaCl) ให้มีความขุ่นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน Mc. Farland No. 0.5

วิธีการทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบ ที่ วางใส่ในจานเพาะเชื้อ จำนวน 1 ตัวอย่าง/จาน ปิเปต inoculum ปริมาตร 0.1 ml หยดลงบนชิ้นตัวอย่างทดสอบ ให้ใช้แผ่น plastic วางทับลงบน inoculum เพื่อให้ inoculum สัมผัสกับผิวหน้าตัวอย่างทดสอบอย่างทั่วถึง จากนั้น ใช้ Saran wrap พันรอบ plate เพื่อป้องกันไม่ให้ inoculum แห้งเนื่องมาจากการระเหย นำจานเพาะเชื้อที่ได้ ไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 10 นาที หรือ 1 ชม. ทำการนับปริมาณเชื้อที่ระยะเวลาตั้งต้น (ระยะเวลาสัมผัสเป็น 0) และปริมาเชื้อที่เหลืออยู่เมื่อ บ่มครบตามระยะเวลาสัมผัสที่กำหนดไว้ 30 นาที โดยนำชิ้นทดสอบพร้อม film ใส่ลงใน stomacher bag ที่มี SCDLP broth ใส่อยู่ 10 ml หลังจากนำเข้าเครื่อง stomacher เพื่อชะแบคทีเรียออกจากผิว ตัวอย่าง ทำการนับจำนวนแบคทีเรียใน SCDLP broth ด้วยวิธี viable cell count โดยใช้ plate count agar เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มจานเพาะเชื้อทั้งหมดที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24-48 ชม. จึงทำการนับเชื้อที่ปรากฏแล้วคำนวณ หาปริมาณเชื้อที่พบ/ชิ้นตัวอย่างทดสอบ การคำนวณ% การต้านเชื้อเทียบกับปริมาณเริ่มต้น

จากรูป 4.28 ที่เกิดขึ้นหากไม่ได้สเปรย์สารลายลงไป อัตราการต้านเชื้อแบคทีเรียจะเท่ากับ 0% ส่วนผลิตภัณฑ์ยางพาราที่สเปรย์ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 7 วัน ยังสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้อยู่ แต่อัตราการต้านเชื้อแบคทีเรียทุกชนิดลดลงจาก 100 % ที่ undoped TiO_2 22.52%, V0.2wt%/TiO_2 23.09 % และ Zn1wt%/TiO_2 27.41% อาจอธิบายการใช้จริงได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5-7 วัน ประสิทธิการต้านเชื้อแบคทีเรียจะลดลง ดังนั้นจึงต้องทำการสเปรย์เพิ่ม



รูปที่ 4.28 แสดงการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Time kill assay ของเชื้อแบคทีเรีย a) *E.coli* และ b) *S.aureus*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะการเตรียมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะวาเนเดียมและสังกะสีโดยกระบวนการโซล-เจล สภาวะที่ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 5 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก เป็นสารตั้งต้น ใช้ Vanadium oxide (V_2O_5) และ Zinc oxide (ZnO) ภายใต้สภาวะที่ใช้น้ำ 60 ร้อยละโมลโดยน้ำหนัก และเอทานอล 35 ร้อยละโมลโดยน้ำหนักเป็นตัวทำละลาย และใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 2M เป็นคะตะลิสต์ในการทำปฏิกิริยา โดยให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ช่วงความเข้มข้นของโลหะที่ใช้เจือ ดังนี้ 0-0.8 wt% loading สำหรับ V-doped TiO_2 และ 0 – 2wt% loading สำหรับ Zn-doped TiO_2 ผงวัสดุนาโนที่เตรียมได้จากกระบวนการดังกล่าวนำมาทดสอบสมบัติและคุณลักษณะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (Commercially available TiO_2) คือ P-25 TiO_2 จากนั้นศึกษาการนำไปประยุกต์เป็นสารแขวนลอยสำหรับสเปรย์บนผิวผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ และศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของพื้นผิวผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่ที่สเปรย์

5.1 วิเคราะห์สมบัติของสารที่สังเคราะห์ได้

V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ตรวจสอบคุณลักษณะโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบเฟสอนาเทสของ TiO_2 แนวโน้มเมื่อเติมสารเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้แลททิซพารามิเตอร์ของผลึกลดลง แต่ไม่เกิน 0.4 wt% และ 1 wt% ตามลำดับ จากการศึกษาจาก ฟูเรียร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) พบพันธะของ Ti-O และ Ti-O-Ti ซึ่งทั้ง V-doped TiO_2, Zn-doped TiO_2 และปริมาณสารเจือไม่ส่งผลต่อพันธะ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) V-doped TiO_2 ที่สารเจือไม่เกิน 0.4 wt% มีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แต่เมื่อสารเจือเพิ่มขึ้นภาพมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ส่วน Zn-doped TiO_2 แสดงภาพถ่ายที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

ขนาดอนุภาคของ V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 มีแนวโน้มไม่ต่างกันมากเมื่อเทียบกับ undoped TiO_2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ V-doped TiO_2 เทียบกับ undoped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 สารเจือ 0.2 wt% และ 0.4 wt% มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าแต่เมื่อเพิ่มสารเจือค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะลดลง ค่าสมบัติโฟโตคะตะลิสเมื่อเจือสารทั้ง V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีเมทิลีนบลู ได้ดีกว่า undoped TiO_2 ที่ปริมาณสารเจือ V0.2 wt% TiO_2 และ Zn1

wt%TiO_2 ได้เร็วกว่าสารเจือปริมาณอื่น เมื่อคำนวณค่า Band gap energy V-doped TiO_2 อยู่ในช่วง 2.1-2.2 eV ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับทางการค้าและ Zn-doped TiO_2 ซึ่งมีค่าในช่วง 2.95-3.0 eV การต้านเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี Time kill assay ทั้ง *S.aurues* และ *E.coli* สารสังเคราะห์ TiO_2 ทุกตัวสามารถต้านได้ 100 % ภายในเวลา 30 นาที เชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ปริมาณสารเจือที่ต่างกันของ V-doped TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ส่งผลการต้านเชื้อไม่ต่างกันมากนัก ส่วนเชื้อแบคทีเรีย *S.aurues* V-doped TiO_2 ที่ 0.2 wt% และ Zn-doped TiO_2 ที่ 1 wt% ต้านเชื้อแบคทีเรียได้เร็วที่สุด

5.2 วิเคราะห์สมบัติเมื่อสเปรย์บนผลิตภัณฑ์ยางพารา

เมื่อนำสาร undoped TiO_2 และสารเจือทั้งสองชนิด (V-doped TiO_2 ที่ 0.2 wt% และ Zn-doped TiO_2 ที่ 1 wt%) ศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของพื้นผิวผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่สเปรย์ พบว่ามีการยึดเกาะของสารที่สเปรย์บนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ยางพารา จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (EDX) โดยทิ้งให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน และเมื่อผ่านการสัมผัสหรือเช็ดออก ประมาณ 3-4 ครั้งก็จะค่อยๆหลุดออกจากผิว ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง *E.coli* และ *S.aurues* เมื่อทิ้งไว้ 1 วัน สามมารถต้านแบคทีเรียได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 3 ชนิดทดสอบ เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน การต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง V-doped TiO_2 ที่ 0.2 wt% และ Zn-doped TiO_2 ที่ 1 wt% เหลือการต้านเชื้อแบคทีเรียประมาณ 20 % อธิบายการใช้จริงได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5-7 วัน ประสิทธิการต้านเชื้อแบคทีเรียจะลดลง ดังนั้นจึงต้องสเปรย์เพิ่ม

บรรณานุกรม

[1] Caballero L., Whitehead K.A., Allen N.S., and Verran J. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* on immobilized TiO_2 using fluorescent light. J. Photochem. Photobiol. A. 202 (2-3) : pp 92-98.

[2] Carp O., Huisman C.L., and Reller A. (2004). Photo induced reactivity of titanium dioxide. Prog. Solid State Chem. 32: 33-177. The surface science of titanium dioxide. Surf. Sci. Reports. 48 : pp53-229.

[3] Saowalak Boonyod., Weerawan Sutthisripok., and Lek Sikong. (2011) Antibacterial Activity of TiO_2 and Fe^{3+} doped TiO_2 Nanoparticlecles Synthesized at Low Temperature. Advanced Materials Research Vol. 214 : pp197-201.

[4] Sue-min Chang., and Wei-szu Liu. (2010). Surface doping is more beneficial than bulk doping to the photocatalytic activity of vanadium-doped TiO_2. Applied Catalysis B: Environmental 101 : pp333–342.

[5] วาเนเดียมออกไซด์ (13 April 2016). (Online), Available : https://th.wikipedia.org/wiki.

[6] วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (13 April 2016). (Online), Available : https://thai.alibaba.com/product detail/vanadium-oxide-pentoxide-powder.

[7] Yan Yan., Bing Li., Huan Pang., and Huaiguo Xue. (2016). Vanadium based materials as electrode materials for high performance supercapacitors. Journal of Power Soures 329 : pp148-169.

[8] Princess Chulabhorn's college NakhonSiThammarat., (2013). (Online), Available : โครงงานศึกษาความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคซิงก์ออกไซด์บนเส้นใยฝ้ายเมื่อผ่านการซัก http://nanozincoxide.blogspot.com.

[9] Boonchai Banja., and Warinthorn. (2012). Enhanced UV-protection and antibacterial properties of natural rubber/rutile-TiO_2 nanocomposite. Polymer Degradation and Stability. 5 : pp566-578.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[10] Fujishima A., Rao T.N., and Tryk D.A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. J. Photochem. Photobiol. C : Photochem. *Rev.*, 1: pp1-21.

[11] Hagfeldt A., and Graetzel M. (1995). Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems. Chem. Rev., 95(1) : pp49-68.

[12] Liuxie Z., Peng L., and Zhixing S. (2006). Photocatalytic anatase thin film coated PAN fiber prepared at low temperature. Mater. Chem. Phys. 98 : pp111-115.

[13] สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (12 July 2016). (Online), Available : http://wikipedia.ord/tiaaniumdioxdioxide.

[14] Palominos R. A., Mondaca M.A., Giraldo A., Penuela G., Perez-Moya M., and Mansilla H.D. (2009). Photocatalytic oxidation of the antibiotic tetracycline on TiO_2 and ZnO suspensions. Catal. Today 144(1-2) : pp100-105.

[15] นาโนโซอีซี่ดอทคอม (1 September 2016). โฟโตคะตะไลติก (Online), Available : http://nanosoeasy.com/photocatalytic.

[16] Li J., Liu L., Bai H., Wang Y., and Sun D. D. (2011). Gram-scale production of grapheme oxide- TiO_2 nanorod composites: Towards high activity photocatalytic materials. Appl. Catal. B: Environ. 1-2 : pp76-82.

[17] Jung Tae Park., Joo Hwan Kon., and Jong Hae Kim. (2011). Formation of mesoporous TiO_2 with large surface areas, interconnectivity and hierarchical pores for dye-sensitized solar cells. J. Mater. Chem. pp17872-17880.

[18] กระบวนการโซล-เซล (1 September 2016). (Online), Available : http://wordpress.com/sol-gel process.

[19] Ceramic Industry (1 December 2001) Sol-gel. (Online), Available : http://ceramicindustry.com/Advances in Sol-Gel Technology.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[20] I. Zhitomirsky., (2000) Ceramic films using cathodic electrodeposition. The Minerrals, Metals & Materials Society. pp52 (1).

[21] แบคทีเรีย (1 September 2016). (Online), Available : http://wikipedia.ord/becteria.

[22] Sayilkan F., Asilturk M., Kiraz N., Burunkaya E. Arpac E., and Sayilkan H. (2009) Photocatalytic antibacterial performance of Sn^{4+}-doped TiO_2 thin films on glass substrate. J. Hazard Mater. 162(2-3) : pp1309-1316.

[23] Yuzheng Wang, He Yang., and Xiangxin Xue. (2014). Synergistic antibacterial activity of TiO_2 co-doped with zinc and yttrium. Vacuum. 107 : pp28-32.

[24] Yunhong Jiang, Lingling Zhang., Dongsheng Wen., and Yulong Ding. (2016). Role of physical and chemical interactions in the antibacterial behavior of ZnO nanoparticles against *E. coli*. Materials Science and Engineering. C 69 : pp1361–1366.

[25] Ming-Fang X., Shan L., Xin-man C., and Yan-zhi P. (2006). Studies on characteristic of nanostructure of N-TiO_2 thin films and photo-bactericidal action. J. Zhejiang Univ. Science B. 7(7) : pp586-590.

[26] Ranjith G. Nair, Jetendra K. Roy., S.K. Samdarshi., and A.K. Mukherjee. (2012). Mixed phase V doped titania shows high photoactivity for disinfection of *Escherichia coli* and detoxification of phenol. Solar Energy Materials & Solar Cells. 105 : pp103–108.

[27] การยางแห่งประเทศไทย (1 September 2016). ยางพารา (Online), Available : http://rubber.co.th/para.

[28] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, (9 April 2017). การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray driffraction) (Online), Available : http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-driffraction.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[29] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, (9 April 2017). กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Online), Available http://www.il.mahidol.ac.th/emedia/nano/Page/Unit4-5.html.

[30] การเตรียมตัวอย่างสำหรับ SEM (9 April 2017). (Online), Available : http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/sem

[31] สถาบันวิจัยและพัฒนา Burkhoderia sp (9 April 2017). ผลของพืชแซมยางพาราต่อแบคทีเรียละลายฟอสเฟต. (Online), Available : https://research.dusit.ac.th/menu/abstra/abstract/full/sci/yuttana/ch2.pdf.

[32] วิชาการดอทคอม (วิชาการ.คอม), (9 April 2017). (Online), Available : https://www.vcharkarn.comblog115808.

[33] Malvern Instruments Ltd (9 April 2017). Particlesize (Online), Available : http://www.malvern.co.uk/LabEng/technology/laser_diffraction/particle.

[34] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, (9 April 2017). สาระน่ารู้: การหาสภาวะการวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าแกลบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Online), Available : https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1708.

[35] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (13 April 2017). BET. (Online), Available : https://www.site.google.com./central lab science /TU.

[36] Glassware Chemical, (9 April 2017). UV-VIS Spectrophotometer (Online), Available : http://glasswarechemical.comscientific.

[37] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (13 April 2017). FT-IR spectrometer (Online), Available : http://science.kmutt.ac.thsicindex.phpchemistry.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[38] สเปคทรัลเทคโนโลยีอินสทรูเม้น (13 April 2017). Fiber optic spectrometer (Online), Available : http://www.spectralinstrument.com/14028175/spectroradiometer.

[39] Duminica F.D., Maury F., and Hausbrand R. (2007). Growth of TiO_2 thin films by AP-MOCVD on stainless steel substrates for photocatalytic applicationa. Surf. & Coating Technol. 201: pp9304-9308.

[40] Gullapelli Sadanandam, Valluri Durga Kumari., and Michael S. Scurrell. (2017). Highly stabilized Ag_2O-loaded nano TiO_2 forhydrogen production from glycerol: Water mixtures under solar light irradiation. International Journal of Hydrogenenergy 42: pp807-820.

[41] Lin Liang, Yanan Meng., Lei Shi., Jun Ma., and Jianmin Sun. (2014). Enhanced photocatalytic performance of novel visible light-driven Ag–TiO2/SBA-15 photocatalyst. Superlattices and Microstructures 73 : pp60–70.

[42] R. Jaiswal, N. Patel., D.C. Kothari., and A. Miotello. (2012). Improved visible light photocatalytic activity of TiO2 co-doped with Vanadium and Nitrogen. Applied Catalysis B: Environmental. 126 : pp47–54.

[43] M. Bettinelli, V. Dallacasa., D. Falcomer., P. Fornasiero., V. Gombac., T. Montini., L. Romano`., and A. Speghini. (2007). Photocatalytic activity of TiO_2 doped with boron and vanadium. Journal of Hazardous Materials. 146 : pp529–534.

[44] Zheng, J., Yu, H., Li, X., Shang, (2007). Enhanced photocatalytic activity of TiO_2 nano structured thin film with a silver hierarchical configuration . Appli. Surf. Sci. 254: pp1630-1635.

[45] Nguyen Minh Thuy, Duong Quoc Van., and Le Thi Hong Hai. (2012). The Visible Light Activity of the TiO_2 and TiO_2 :V^{4+} Photocatalyst. Nanomaterials and Nanotechnology Vol 2. Art. INTECH.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[46] Eun-Jung Park, Gwang-Hee Lee., Cheolho Yoon., and Dong-Wan Kim. (2016). Comparison of distribution and toxicity following repeated oral dosing of different vanadium oxide nanoparticles in mice. Environmental Research 150 : pp154–165.

[47] Rathnayake, W.G.I.U., Ismail, H.., Baharin A.., Darsanasiri A.G.N.D.., and Sanath Rajapakse. (2012). Synthesis and characterization of nano silver based natural rubber latex foam for imparting antibacterial and anti-fungal properties. Polymer Testing. 31 : pp586–592.

[48] ภูษิตา วรรนิสสร, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), (2017). วิธีการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบเชื้อ.

[49] Singto Sakulkhaemaruethai., and Thammanoon Sreethawong., (2011). Synthesis of mesoporous-assembled TiO_2 nanocrystals by a modified urea-aided sol-gel process and their outstanding photocatalytic H_2 production activity. International journal of hydrogenenergy. 36 : pp6553-6559.

[50] Athapol Kitiyanan., Singto Sakulkhaemaruethai., Yoshikazu Suzuki., and Susumu Yoshikawa., (2006). Structural and photovoltaic properties of binary TiO_2–ZrO_2 oxides system prepared by sol–gel method. Composites Science and Technology 66 : pp1259–1265.

[51] สุธรรม ศรีหล่มสัก., (2011) เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเบื้องต้น. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[52] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล., (2002) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. สำนักพิมพ์กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[53] Y. Wu., and M.A. Schoonen. (2010). The absolute energy positions of conduction and valence bands of selected semiconducting minerals. Am. Mineral 85: pp543-56.

[54] Santhilnathan, J., and Philip, L., (2010). Photocatalytic Degradation of Lindane under UV and Visible Light using N-Doped TiO_2. Chemical Engineering Journal. 161 : pp83-92.

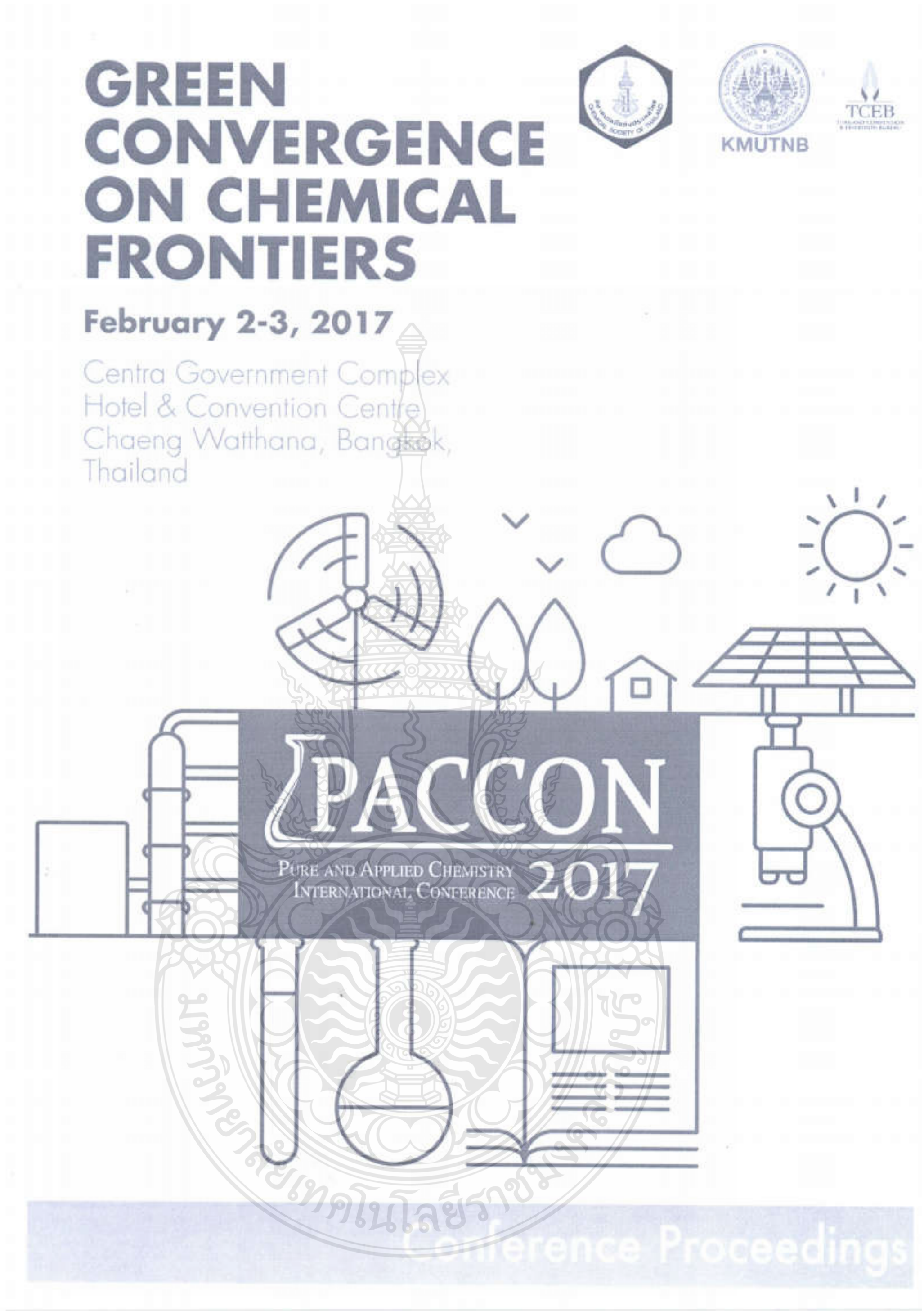
บรรณานุกรม (ต่อ)

[55] I. Cimieri., H. Poelman, and S. Lambert. (2013). Novel sol-gel preparation of V-TiO_2 films for the photocatalytic oxidation of ethanol in air. *J. Photochem. Photobiol. A* 263 : pp1-7.

[56] D.A. Duncan., D. Kreikemeyer-Lorenzo and E. Primorae. (2014). V-doped TiO2 (110): quantitative structure determination using energy scanned photoelectron diffraction, Surf. Sci. 630 : pp64-70.

[57] N.N. Binitha S. Sugunan., (2006) Preparation, characterization and catalytic activity of titania pillared montmorillonite clays, Microporous Mesoporous Mater. 93 : pp82-89.

[58] T. Ivanova, A. Harizanova,M. (2002). Surtchev, Formation and investigation of sol-gel TiO_2-V_2O_5 system, Mater. Lett. 55 : pp327-333.


GREEN CONVERGENCE ON CHEMICAL FRONTIERS
February 2-3, 2017
Centra Government Complex Hotel & Convention Centre Chaeng Watthana, Bangkok, Thailand
KMUTNB
TCEB
PACCON
PURE AND APPLIED CHEMISTRY INTERNATIONAL CONFERENCE
2017
Conference Proceedings

Proceedings

The Pure and Applied Chemistry International Conference 2017
(PACCON2017)

"Green Convergence on Chemical Frontiers"

February 2-3, 2017

at

Centra Government Complex Hotel & Convention Centre Bangkok, Thailand

Organized by

The Chemical Society of Thailand under the Patronage of
Her Royal Highness Princess Chulabhorn Mahidol

In association with

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
(KMUTNB)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Proceedings of the Pure and Applied Chemistry International Conference 2017 (PACCON2017)

Editor-in-Chief: Yingpit Pornputtkul

ISBN (e-book): 978-616-368-045-7

Prepared by: Department of Industrial Chemistry,
Faculty of Applied Science, KMUTNB

1st **edition:** May 2017 (available in PDF version only)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Editorial Information

Editor-in-Chief Yingpit Pornputtkul
Assistant Editor Noppavan Chanunpanich
Editorial Board See PACCON2017 Scientific Committee
Editorial Staff Chandrladda Chotratanadilok
Chatchalida Boonpanaid
Cherdchai Laongthipparos
Jaruwan Talawat
Kowit Piyamakala
Lida Simasatitkul
Monrudee Phongaksorn
Nakadech Youngwilai
Narong Pungwiwat
Narumol Kreuaongarjnukool
Parinya Khongprom
Piyarat Trikittiwong
Pravitra Chandranupap
Rungsima Yeetsorn
Sabaithip Tungkamani
Samitthichai Seeyangnok
Sarinya Shawaphun
Sirisart Ouajai
Sunanta Chuayprakong
Sunisa Jindasuwan
Suttinun Phongtamrug
Tanakorn Ratana
Thara Manangan
Walaiporn Prissanaroon Ouajai

COMMITTEES

Honorary Advisory Committee

Prof. Dr. Teravuti Boonyasopon	Former President of King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)
Prof. Dr. – Ing. Habil. Suchart Siengchin	President of King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)
Assoc. Prof. Dr. Surapun Yimman	Dean, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)
Assoc. Prof. Dr. Surin Laosooksathit	President of the Chemical Society of Thailand 2015-2016
Prof. Dr. Supa Hannongbua	President of the Chemical Society of Thailand 2017-2018
Prof. Dr. Supawan Tantayanon	Immediate Past President of the Chemical Society of Thailand
Assoc. Prof. Dr. Thanuttkhul Mongkolaussavarat	Vice President of the Chemical Society of Thailand 2017-2018

Conference Organizers

Chemical Society of Thailand under the Patronage of Her Royal Highness Princess Chulabhorn Mahidol

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)

Conference Chair

Assoc. Prof. Dr. Yingpit Pornputtkul
Head of Department of Industrial Chemistry, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)

International Advisory Board

Prof. Dr. Kurt Wüthrich
The Scripps Research Institute, USA and ETH Zürich, Switzerland

Prof. Dr. Kohji Tashiro
Toyota Technological Institute, Japan

Prof. Dr. Hasuck Kim
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Korea

Prof. Dr. James P. Runt
The Pennsylvania State University, USA

Prof. Dr. San H. Thang
Monash University, Australia

Prof. Dr.h.c. József Karger-Kocsis
Budapest University of Technology and Economics, Hungary

Prof. Dr. Apichart Suksamrarn
Ramkhamhaeng University, Thailand

Prof. Dr. Vatcharin Rukachaisirikul
Prince of Songkla University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Ladda Meesuk
Chemical Society of Thailand

Assoc. Prof. Dr. Phatiphat Thounthong
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Prof. Dr. Suchart Siengchin
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Prof. Dr. Yasuyuki Shibata
Japan Society for Environmental Chemistry, Japan

Prof. Dr. Morita Masatoshi
Faculty of Agriculture, Ehime University, Japan

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Scientific Committee

Assoc. Prof. Dr. Noppavan Chanunpanich (Chair)
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Prof. Dr. Braja Gopal Bag
Vidyasagar University, India

Prof. Dr. Doo Sung Lee
Sungkyunkwan University, Korea

Prof. Dr. Durand Alain
University of Lorraine, France

Prof. Dr. Eric Croiset
University of Waterloo, Canada

Prof. Dr. Fabrice Leroux
ICCF (Chemical Institute of Clermont-Ferrand), Blaise Pascal University, France

Prof. Dr. Fortunato Sevilla III
University of Santo Tomas, Philippines

Prof. Dr. Hasuck Kim
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), South Korea

Prof. Dr. Hidehiro Sakurai
Osaka University, Japan

Prof. Dr. Hiroshi Uyama
Osaka University, Japan

Prof. Dr. Ho Seok Park
Sungkyunkwan University

Prof. Dr. Hong Sik Byun
Keimyung University, Daegu, Korea

Prof. Dr. Jan Weigand
Technical University Dresden, Germany

Prof. Dr. Jin-Ho Choy
Ewha Womans University, Korea

Prof. Dr. Jongwook Park
Kyung Hee University, Korea

Prof. Dr. Joo Hyun Kim
Pukyong National University, Korea

Prof. Dr. Jun-Seo Park
Hankyong National University, Korea

Prof. Dr. Katsuyoshi Kakinuma
Fuel cell nanomaterials center, University of Yamanashi, Japan

Prof. Dr. Kotohiro Nomura
Tokyo Metropolitan University, Japan

Prof. Dr. Leonardo Simon
University of Waterloo, Canada

Prof. Dr. Makoto Ogawa
Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology (VISTEC), Thailand

Prof. Dr. Makoto Yamashita
Nagoya University, Japan

Prof. Dr. Masamichi Ogasawara
Tokushima University, Japan

Prof. Dr. Masaya Sawamura
Hokkaido University, Japan

Prof. Dr. Narongrit Sombatsompop
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand

Prof. Dr. Navadol Laosiripojana
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

Prof. Dr. Oliver Reiser
University of Regensburg, Germany

Prof. Dr. Orawon Chailapakul
Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Pooi See Lee
Nanyang Technological University, Singapore

Prof. Dr. Pramuan Tangboriboonrat
Mahidol University, Thailand

Prof. Dr. S. Ted Oyama
The University of Tokyo, Japan and Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

Prof. Dr. Sangaraju Shanmugam
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Korea

Prof. Dr. Sanong Ekgasit
Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Santi Maensiri
Suranaree University and Technology

Prof. Dr. Sensuke Ogoshi
Osaka University, Japan

Prof. Dr. Somyote Sutthivaiyakit
Ramkhamhaeng University, Thailand

Prof. Dr. Steven Bull
University of Bath, United Kingdom

Prof. Dr. Suttichai Assabumrungrat
Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Suwabun Chirachanchai
The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Takumi Konno
Osaka University, Japan

Prof. Dr. Thawatchai Tuntulani
Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Tony James
University of Bath, United Kingdom

Prof. Dr. Toshihiko Imato
Kyushu University, Japan

Prof. Dr. Toshiyuki Kida
Osaka University, Japan

Prof. Dr. Tsuyoshi Inoue
Osaka University, Japan

Prof. Dr. Vinich Promarak
Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology (VISTEC), Thailand

Prof. Dr. Yasushi Nishihara
Okayama University, Japan

Assoc. Prof. Dr. Apinpus Rujiwatra
Chiang Mai University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Atitaya Siripinyanond
Mahidol University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Chantaraporn Phalakornkule
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Assoc. Prof. Dr. David J. Harding
Walailak University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Deva Priyakumar Udayakumar
Center for Computational Natural Sciences and Bioinformatics, International Institute of Information Technology, India

Assoc. Prof.Dr. Duangjai Nacapricha
Mahidol University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Is Fatimah
Universitas Islam, Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Jeff Gostick
McGill University, Canada

Assoc. Prof. Dr. Khamphee Phomphrai
Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology (VISTEC), Thailand

Assoc.Prof. Dr. Kitikorn Charmondusit
Mahidol University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Michiya Matsusaki
Osaka University, Japan

Assoc. Prof. Dr. Tawan Sooknoi
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Vilai Rungsardthong
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Assoc. Prof. Dr. Vudhichai Parasuk
Chulalongkorn University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Vuthichai Ervithayasuporn
Mahidol University, Thailand

Asst. Prof. Dr. Winita Punyodom
Chiang Mai University, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Yoshikuni Teramoto
Gifu University, Japan

Asst. Prof. Danial R. King
Hokkaido University, Japan

Asst. Prof. Dr. Patchanita Thamyongkit
Chulalongkorn University, Thailand

Asst. Prof. Dr. Sabaithip Tungkamani
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Harnchana Gatemala
Chulalongkorn University, Thailand

Dr. Isabelle Roth-Panke
TU Chemnitz, Germany

Dr. Kajornsak Faungnawakij
National Nanotechnology Center

Dr. Monthip Sriratana Tabucanon
Chemical Society of Thailand

Dr. Pierre Rabu
IPCMS – Departement de Chimie et des Materiaux Inorganiques (DCMI), France

Dr. Pimpa Limthongkul
National Science and Development Agency, Thailand

Dr. Sumittra Charojrochkul
National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand

Dr. Suteera Witayakran
Kasetsart University, Thailand

Dr. Yoshimura Yuji
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan

Organizing Committee

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)

Assoc. Prof. Dr. Kowit Piyamakala
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Assoc. Prof. Dr. Narong Pungwiwat
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Assoc. Prof. Narumol Kreuaongarjnukool
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Chandrladda Chotratanadilok
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Monrudee Phongaksorn
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Parinya Khongprom
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Rungsima Yeetsorn
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Samitthichai Seeyangnok
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Sarinya Shawaphun
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Sirisart Ouajai
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Sunisa Jindasuwan
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Suttinun Phongtamrug
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Tanawadee Dechakupt
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Dr. Tanawadee Dechakupt
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Asst. Prof. Pravitra Chandranupap
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Chanut Bamrungwongdi
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Chatchalida Boonpanaid
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Jaruwan Talawat
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Lida Simasatitkul
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Nakadech Youngwilai
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Piyarat Trikittiwong
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Saowapa Thamsing
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Sunanta Chuayprakong
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Sukanya Thepwatee
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Tanakorn Ratana
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Dr. Voranuch Somsongkul
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Mr. Cherdchai Laongthipparos
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Mr. Thara Manangan
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand

Chemical Society of Thailand under the Patronage of Her Royal Highness Princess Chulabhorn Mahidol

Assoc. Prof. Dr. Kitti Amornraksa
Chemical Society of Thailand

Asst. Prof. Dr. Boonyaras Sookkheo
Chemical Society of Thailand

Asst. Prof. Dr. Duangruthai Sridaeng
Chemical Society of Thailand

Asst. Prof. Dr. Singto Sakulkhaemaruethai
Chemical Society of Thailand

Assoc. Prof. Sutha Poosittisak
Chemical Society of Thailand

Dr. Boonnak Sukhummek
Chemical Society of Thailand

Dr. Kajornsak Faungnawakij
Chemical Society of Thailand

Dr. Monthip Sriratana Tabucanon
Chemical Society of Thailand

Dr. Wandee Luesaiwong
Chemical Society of Thailand

Mr. Phoosak Hirunyatrakul
Chemical Society of Thailand

OVERALL PROGRAM

Analytical Chemistry (AN)
Chair:
Prof.Dr. Orawon Chailapakul
Co-Chair:
Asst.Prof.Dr. Chandrladda Chotratanadilok
Dr. Chatchalida Boonpanaid

Environmental Chemistry (EN)
Chair:
Dr. Monthip Sriratana Tabucanon
Co-Chair:
Assoc.Prof.Dr. Kowit Piyamakala
Dr. Jaruwan Talawat

Sustainable Food and Agricultural Chemistry (FA)
Chair:
Assoc.Prof.Dr. Vilai Rungsardthong
Co-Chair:
Asst.Prof.Dr. Sirisart Ouajai
Asst.Prof. Pravitra Chandranupap

Industrial Chemistry and Innovations (IC)
Chair:
Prof. Dr. Suttichai Assabumrungrat
Co-Chair:
Asst.Prof.Dr. Parinya Khongprom
Dr. Lida Simasatitkul

Inorganic Chemistry (IN)
Chair:
Prof.Dr. Thawatchai Tuntulani
Co-Chair:
Asst.Prof.Dr. Samitthichai Seeyangnok
Dr. Nakadech Youngwilai

Materials Science and Nanotechnology (MS)
Chair:
Prof. Dr. Santi Maensiri
Co-Chair:
Dr. Kajornsak Faungnawakij
Asst.Prof.Dr. Sarinya Shawaphun
Asst.Prof.Dr. Sunisa Jindasuwan
Dr. Sunanta Chuayprakong

Natural Products, Chemical Biology and Medicinal Applications (NP)
Chair:
Prof.Dr. Vatcharin Rukachaisirikul
Co-Chair:
Assoc. Prof. Narumol Kreuaongarjnukool
Mr. Cherdchai Laongthipparos

Organic Chemistry and green Chemistry (OR)
Chair:
Prof. Dr. Somyote Sutthivaiyakit
Co-Chair:
Assoc. Prof. Narumol Kreuaongarjnukool
Mr. Thara Manangan

Sustainable Catalysis and Petrochemicals (CP)
Chair:
Assoc.Prof.Dr. Tawan Sooknoi
Co-Chair:
Dr. Sabaithip Tungkamani
Dr. Piyarat Trikittiwong

Physical Chemistry (PH)
Chair:
Assoc.Prof.Dr. Vudhichai Parasuk
Co-Chair:
Assoc.Prof.Dr. Narong Pungwiwat
Dr. Tanakorn Ratana

Polymer Chemistry (PO)
Chair:
Prof. Dr. Suwabun Chirachanchai
Co-Chair:
Asst.Prof.Dr. Suttinun Phongtamrug
Asst.Prof.Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai
Asst.Prof.Dr. Winita Punyodom

Renewable Energy (RE)
Chair:
Assoc.Prof.Dr. Phatiphat Thounthong
Co-Chair:
Asst.Prof.Dr. Monrudee Phongaksorn
Asst.Prof.Dr. Rungsima Yeetsorn
Dr. Sunanta Chuayprakong

SPECIAL

Small Scale Chemistry Workshop: DOW Chemistry Classroom (DOW)
Organized by Dow Chemical (Thailand) Co., Ltd. and Chemical Society of Thailand

Thai-Korean Symposium : the Future of Green Energy (KT)
Organized by Chemical Society of Thailand and Chemical Society of Korean

Persistent Organic Pollutants Monitoring and Management in Asia (UNU)
Organized by United Nations University Institute for the Advanced Study of Sustainability (UNU-IAS)

Synchrotron Radiation Applications for Innovative Materials (SLRI)
Organized by Synchrotron Light Research Institute (SLRI)

The 2nd Advanced Materials for Sustainable Innovation (PMM)
Organized by Center of Excellence in Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials, Naresuan University

Innovative Instruments and Advanced Characterization for Industrial Solutions (INST)
Organized by PACCON 2017 and Bruker

Sustainable Industrial Chemistry and Green Innovation (SIC)
Organized by PACCON 2017

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Optimization of Marshall stability and self-healing performance of asphalt mixture using response surface technology
Florencio D. de los Reyes*, Jade Dhalle P. Encarnacion, Kerguelen Mae A. Nodora, Joshia Uzziel L. Plandes and Jay-Anne B. Aleno — MS-O-034 — 621-626

A comparative study on antibacterial screening of synthesized silver nanoparticles using *Carica papaya* Linn. leaves (papaya) and *Morinda citrifolia* Linn. leaves (noni) extracts
Chaw Su Aung, Kyaw Zan Aung and Nay Thwe Kyi* — MS-O-038 — 627-632

Synthesis, characterization of $Al_xZn_{1-x}O$ and its application for photocatalytic hydrogen production from water splitting
Janyaphon Buaphang, Nithima Khaorapapong and Sujitra Klinsrisuk* — MS-P-003 — 633-637

Synthesis of hydroxyapatite using lime mud by mechanochemical method
Saowalak Puangpaka, ChokchaiYatongchai and Pornsawai Praipipat — MS-P-009 — 638-642

The preparation and characterization CuNi catalysts supported on treated carbon for PEMFC
Siwat Thungprasert*, Anukorn Phuruangrat, Thapanee Sarakonsri and Aphiruk Chaisena — MS-P-014 — 643-647

Synthesis, characterization and optical properties of surface-modified metal/ ZnO hexagonal plate
Apicha Thanatsiri and Karaked Tedsree* — MS-P-015 — 648-655

Hybrid white organic light emitting diodes from fluorescent blue emitter and phosphorescent charged iridium(III) complexes
Potsawat Khamtoem, Takdanai Unjarern, Somboon Sahasithiwat and Rukkiat Jitchati* — MS-P-016 — 656-661

Novel charged iridium complexes for organic light emitting diodes (OLEDs)
Natsiri Wongsang, Kittiya Wongkhan, Laongdao Kangkaew, Somboon Sahasithiwat and Rukkiat Jitchati* — MS-P-019 — 662-667

The effect of Pt precursor on the catalytic properties of Pt/TiO_2 catalysts in the selective hydrogenation of 3-nitrostyrene
Nuttaya Panjamaphon* and Joongjai Panpranot — MS-P-021 — 668-673

Dimerization of isobutene to isooctene over $NiO-WO_3/Al_2O_3$ catalysts
Kannara Kerdphol* and Joongjai Panpranot — MS-P-022 — 674-679

Effect of transition metal promoted on vanadium phosphorus oxide (VPO) catalysts in the partial oxidation of *n*-Pentane
Suchanuch Pisuttangkul* and Joongjai Panpranot — MS-P-023 — 680-685

An enhanced photocatalytic activity of methylene blue using visible light responsive V-doped TiO_2 nanoparticles
Siripom Tong-on*, Siripom Larpkiattaworn, Singto Sakulkhaemaruethai and Chuntip Sakulkhaemaruethai — MS-P-028 — 686-691

Synthesis of magnetically recoverable rod like Bi_2O_3/γ-Fe_2O_3 composite with high photocatalytic performance under visible light irradiation
Ruethaithip Wisedsri*, Saiphon Chanpaka, Theanchai Panphojan and Thanonchat Imsombat — MS-P-030 — 692-697

An enhanced photocatalytic activity of methylene blue using visible light responsive V-doped TiO_2 nanoparticles

Siriporn Tong-on[1,2*], Siriporn Larpkiattaworn[2], Singto Sakulkhaemaruethai[3] and Chuntip Sakulkhaemaruethai[1]

[1]*Department of Material and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand*
[2]*Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Thailand*
[3]*Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand*

*e-mail: siriporn_zinn@mail.rmutt.ac.th

Abstract: Titanium dioxide (TiO_2) has been proven to be the most attractive material for a wide range of applications, particularly as the photocatalyst for degradation of organic pollutants. Due to the wide band gap of TiO_2 (3.0-3.2 eV), its photocatalytic activity is restricted in the UV region. In order to narrow band gaps and extend their working spectra scope, doping metal with oxides has been an effective strategy. In this work, V-doped TiO_2 nanoparticles with different (0-0.8%wt) concentrations were synthesized by a microwave assisted sol-gel method. The characterization of the prepared nanoparticles were carried out by XRD, BET, SEM, and UV-Vis spectroscopy. Photocatalytic oxidation of methylene blue (MB) was investigated using V-doped and un-doped TiO_2 nanoparticles under visible light irradiation. The XRD results indicated that the prepared TiO_2 nanoparticles only contained anatase phase. The V dopant was not affecting the crystal phase structure of TiO_2. The small amount of dopant resulted in enhancement of visible light absorption, red shift, and the band gap of photocatalysts reduced from 3.0 eV to 2.1 eV. The optimal V dopant content is 0.2 %wt for pure TiO_2 sample.

1. Introduction

According to the development of the industrialization and the abuse of pollutants resulting from industrial wastes has been widely caused and has become a widespread concerned environmental problem. Currently, much effort has been focused on developing the semiconductor photocatalysts to degrade organic pollutants via the photocatalysis oxidation process. Titanium dioxide (TiO_2) appears as a promising catalyst due to its photostability, chemical inertness, powerful oxidizing power, high benefit-to-cost ratios, environmental friendly, and so on.[1] It is widely utilized in numerous commercial applications including as an opacifying agent in paints, plastics, paper textiles and inks, corrosion-resistant coatings, anti-bacterial agents, water and air purification, self-cleaning surfaces, food additives and as ultraviolet absorber in cosmetic products.[2,3] TiO_2 have been synthesized via hydrolysis, sol-gel, micro-emulsion or reverse micelles, flame pyrolysis, solvo/hydrothermal, chemical vapour deposition and physical vapour deposition. Among these techniques, sol-gel is preferable because its operating conditions are the closest to ambient temperature and pressure. However, the disadvantages to using TiO_2 as a photocatalyst is its large band gap energy between the conduction and valence bands (3.2 eV for anatase phase) and high carrier recombination rate.[4-6] Therefore, all kinds of attempts have

been made to reduce the band gap to effectively operate with visible light. To overcome the inherent weakness of TiO_2, numerous efforts have been devoted to increase its visible light absorption and prolong carrier lifetime.[7,8] The reported studies adopted methods including doping metals such as V, Cr, Fe into the TiO_2 lattice. Among these, V-doped TiO_2 was found to exhibit high photocatalytic activity, even in the visible region.[9-11]

In the present work, vanadium was used as a dopant to make the band gap energy of TiO_2 narrow. The un-doped and 0.2, 0.4 and 0.8wt% V-doped TiO_2 nanoparticles were prepared via a microwave assisted sol-gel method. The influence of V on TiO_2 crystallization was investigated. The prepared photocatalyst was applied to the photocatalytic degradation of MB in aqueous solution.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Titanium tetraisopropoxide (TTIP) 99.99%, and vanadium oxide (V_2O_5) were purchased from Fluka Sigma-Aldrich. Hydrochloric acid (HCl), ethanol and methylene blue (MB) were purchased from Alfar. TiO_2 aeroxide P-25 (purity 97%, average particle size of 30 nm and anatase to rutile ratio was 70:30) bought from Aeroxide (China) industries, was used as reference material for the characterization of synthesized catalysts without any further preliminary treatment. These chemicals were used as received without further purification. Water used in the preparation of TiO_2 was de-ionized water.

2.2 Preparation of TiO_2 photocatalysts

V-doped TiO_2 nanoparticles were prepared via a microwave-assisted sol-gel method using TTIP and V_2O_5 as the TiO_2 precursor and the vanadium source, respectively. Three series of samples of 0.2, 0.4 and 0.8 wt% V-doped TiO_2 have been prepared, starting from the same amounts of reactants, except water and vanadium oxide. In a typical synthesis, 10 mL of TTIP was added to 85 mL of ethanol under vigorous stirring and the suspension was stirred for 30 min at room temperature. The obtained mixture was adjusted to pH 2 by adding drop-by-drop 2 M HCl. The TiO_2 sol was heated under microwave oven at 180 W until TiO_2 gel was obtained. It was then dried in a microwave oven. The resulted dried TiO_2 were ground to fine powder. For comparison, un-doped TiO_2 was synthesized by the same approach without the incorporation of V precursor. The un-doped powders were noticed "T" and the V-doped ones were noticed "TV". The numbers corresponding to the concentration value of the dopant was added (e.g. TV0.2, TV0.4, TV0.8 were dopant concentration of 0.2, 0.4, and 0.8wt%, respectively).

2.3 Characterization of synthesized photocatalyst

The crystalline structure of the synthesized TiO_2 photocatalysts were performed on a X-ray diffractometer (XRD 6000) using Cu-K_α (λ=0.154 nm) radiation (40 kV/30 mA) with scan step increments of 0.002° and with a counting time of 1 s/step. The morphology and chemical composition of the synthesized TiO_2 catalysts were observed by Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL JSM-504LV). The specific surface area, pore size, and pore volume of the prepared TiO_2 samples was carried out by QUANTACHROME (Autosorb IQ) in nitrogen atmosphere at a bath temperature of 77.3 K. The specific surface area was calculated using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) adsorption procedure. The particle size of obtained catalysts were calculated by particle size distribution analyzer (Malvern, Mastersizer 2000). The absorbance thresholds and band gap energies of the prepared samples were observed by fiber optic spectrometer (Avaspec model)

2.4 Photocatalytic activity

The photocatalytic activity of synthesized undoped- and doped-TiO_2 photocatalysts was evaluated by monitoring the degradation of methylene blue (MB) under simulated light irradiation. 50 mg catalyst powder was dispersed in MB aqueous solution with an initial concentration of 1×10^{-6} M. The Philips lamp TUV F17T8 (50 W) was used as the light source. The suspension of catalysts in MB was stirred vigorously and stored for 30 min in the dark to establish adsorption-desorption equilibrium. The suspension was magnetically stirred during the light irradiation. A 5 mL of suspension was withdrawn from the system at a certain time interval during the experiment, and then was centrifuged to remove TiO_2 nanoparticles and measured by a Shimadzu (UV-1700 model) spectrophotometer at 664 nm which corresponds to the characteristic absorption peak of MB.

3. Results & Discussion

The XRD diffractograms of as-prepared TiO_2 catalysts with different doping ratios are plotted in Fig. 1. It can be observed in Figs. 1(a) – 1(d) that diffraction peaks always appear at 2θ = 25.4° (101), 37.8° (004), 48.5° (200), 54.0° (105), 55.4° (211), 62.9° (204), 68.9° (116), 70.3° (220), and 75.2° (215), and could be indexed to anatase phase of TiO_2 (JCPDS file No. 21-1272). XRD analysis confirmed that the as-synthesized V-doped TiO_2 are mainly anatase phases. The c/a ratio from XRD data of TV0, TV0.2, TV0.4 and TV0.8 are 2.4935, 2.4986, 2.5044 and 2.4966 respectively.

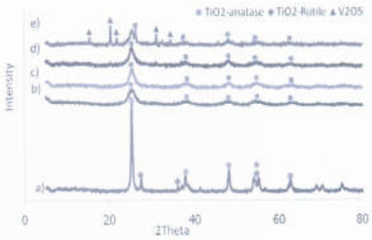


Figure 1. XRD patterns of (a) P-25, (b) as-synthesized TiO_2, (c) TV0.2 (d) TV0.4, and (e) TV0.8.

Table 1 shows the particle sizes and BET surface areas of the synthesized powders. The BET surface areas of as-synthesized undoped and V-doped TiO_2 were much higher than that of P-25 TiO_2. The particle size and BET surface areas of V-doped TiO_2 increased with increasing V content up to 0.4wt%, where after sharply decrease was observed. Because in TV0.8, The larger grains are aggregation with no sharp grain. Thus, It should over dopping of V leading to the reduction of efficient surface areas.

Table 1. Particle size and BET surface area of P-25 and V-doped TiO_2.

Sample	Particle size (nm)	BET (m^2/g)
P-25 TiO_2	4.57	65
TV 0	9.33	208
TV 0.2	22.66	215
TV 0.4	22.34	270
TV 0.8	18.31	189

Figure 2 shows SEM images of P-25, TV0, and TV 0.4. The results reveal that all samples mainly consisted of aggregated TiO_2 nanoparticles.

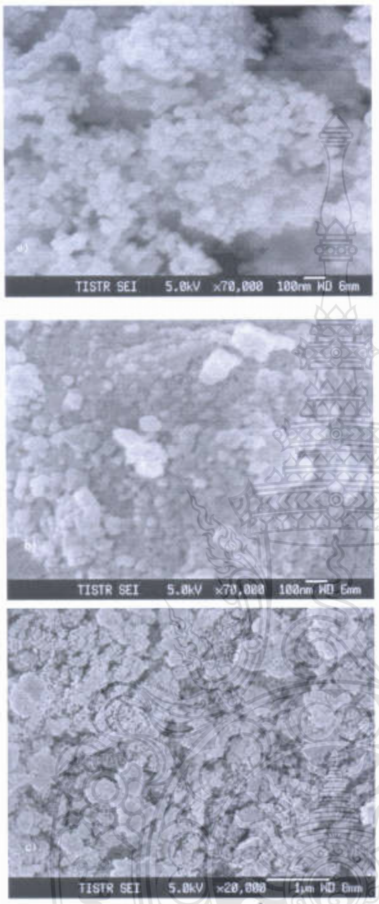


Figure 2. SEM images of (a) P-25 TiO_2, (b) TV 0, and (c) TV0.4.

Figure 3 shows UV-Vis absorption spectra of P-25, undoped- and V-doped TiO_2 samples. The onset of absorption for P-25, TV0, TV0.2, TV0.4, and TV 0.8 were observed at 409, 415, 590, 571, and 551 nm, respectively. The band gap energy values are shown in Table 2. Figure 3 and Table 2 show that P-25 and as-prepared TV0 absorb UV light due to the intrinsic bandgap, 3.03 and 2.99 eV, respectively, while TV0.2, TV0.4, and TV 0.8 have a strong absorbance in UV region and significantly extend the absorption threshold to the visible region due to the small amount of V modification, which would introduce a series of localized occupied states into the band gap of TiO_2 lattice. The results obtained, as shown in Table 2, indicated that the band gap energy of V-doped TiO_2 was gradually decreased with increase in the V content. The decrease in the band gap energy may have resulted from decrease in the Fermi level of the conduction band.[12]

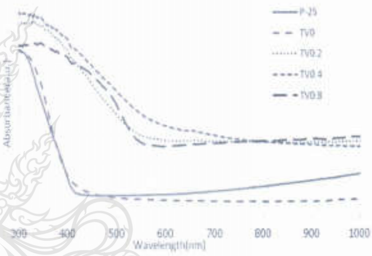


Figure 3. UV-Vis absorbance spectra of P-25, TV0, TV0.2, TV0.4 and TV 0.8.

Table 2 Band gap values of P-25 and as-synthesized V-doped TiO_2.

Sample	Band gap energy (eV)
P-25 TiO_2	3.03±0.05
TV 0	2.99±0.05
TV 0.2	2.10±0.05
TV 0.4	2.07±0.05
TV 0.8	2.25±0.05

The effect of dopant content on MB degradation was evaluated into solution with 1×10^{-6} M MB in aqueous suspended P-25, undoped- and 0.2-0.8 wt% V-doped TiO_2 under visible light irradiation. Figure 4 illustrates the photocatalytic activity for the degradation of MB. It is found that the amount of MB adsorbed onto V-doped TiO_2 in dark is higher than that of P-25 TiO_2 correspond to its larger surface area. Under the visible light irradiation, TV0 sample can degrade about 40% of the original MB. After 60 min irradiation, MB can be degraded by about 80% beyond the value (20%) for P-25 TiO_2 sample. Among all the synthesized photocatalysts, TV0.2 showed the highest photocatalytic activity. The photocatalytic activity of P-25 TiO_2 was found to be the lowest among the synthesized undoped and V-doped TiO_2 due to the large band gap energy of about 3.2eV, which is more active only in the UV region. Vanadium doping effectively improved the photocatalytic activity under visible light irradiation by keeping the band gap energy narrowing with an optimal vanadium doping of 0.2wt%.

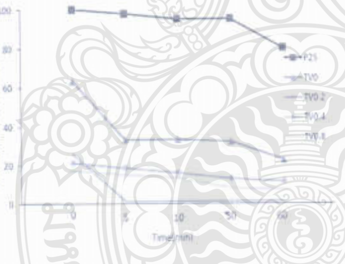


Figure 4. Performance of P-25, undoped and V-doped TiO_2 nanoparticles for photocatalytic degradation of MB under the irradiation of visible light.

4. Conclusion

In summary, undoped and V-doped TiO_2 nanoparticles were synthesized by a microwave assisted sol-gel method. V-doped TiO_2 exhibited better photocatalytic activity than P-25 and undoped TiO_2 for the degradation of MB in aqueous suspension of photocatalyst under visible light irradiation. Among all the synthesized photocatalysts, TV0.2 showed the highest photocatalytic activity. The V-doping effect led to enhancement of the electron-pair generation capacity of TiO_2. Therefore, optimum vanadium concentration was determined to be 0.2wt%.

Acknowledgements

This work was supported by the graduate program development under collaboration between Thailand Institute of Scientific and Technological Research and university. We also thankful to Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT) and Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) for providing instrumental facilities.

References

1. Henderson, M. A. *Surf. Sci. Rep.* **2011**, *66*, 185-297.
2. Xiaobo, C. *Chin. J. Catal.* **2009**, *30*(8), 839-851.
3. Serpone N.; Dondi, D; Albini, A. *Inorganica Chim Acta* **2007**, *360*(3), 794-802.
4. Chen, X.; Liu, L.; Yu, P.Y.; Mao, S.S. *Science* **2011**, *311*, 746-750.
5. Kapilashrami, M.; Zhang, Y.; Liu, Y.S.; Hagfeld, A.; Guo, J. Chem. Rev. **2014**, *114*, 9662-9707.
6. Zhang, P.; Wang, T.; Chang, X.; Gong, J. *Acc. Chem. Res.* **2016**, *49*, 911-921.
7. Asahi, R.; Morikawa, T.; Ohwaki, T.; Aoki, K.; Taga, Y. Science **2001**, *293*, 269-271.
8. Brancho, J.J.; Barlett, B.M. Chem. Mater. **2015**, *27*, 7207-7217.

9. Khan, M.; Song, Y.; Chen, N.; Cao, W. *Mater. Chem. Phys.* **2013**, *142*, 148-153.
10. Jaiswal, R.; Patal, N.; Kothari, D.C.; Miotello, A. Appl. Catal. B: Environ. **2012**, *126*, 47-54.
11. Dilshad, M.: Hideaki, Y. and Yasua, I. *Appl. Catal. A: General* **2007**, *325*, 276-282.
12. Dashora, A.; Patel, N.; Kothari, D.C.; Ahuja, B.L.; Miotello, A. *Solar Energy Mater. Cells* **2014**, *125*, 120-126.

Author	Pages
Thammasom, Thitinun	373
Thamnium, Sirikool	904
Thamyongkit, Patchanita	1131
Thanasubsin, Sudtida P.	248
Thanatsiri, Apicha	648
Thangsan, Poomsith	989
Thangthong, A-monrat	1636
Thaniyavarn, Jiraporn	356
Thaniyawan, Suthep	356
Thanmongkhon, Yoothana	1608, 1646
Thanoy, Amornthep	1100
Thaoklua, Rattana	770
Tharntada, Sirinit	1106
Theerapornkittikul, Thanyalak	349
thenmanee, Purachate	1662
Thepkhun, Panida	1646
Thessrimuang, Naruenart	1461
Thiamsinsangwon, Puttiporn	401
Thiendedsakul, Piriyaporn	1106
Thipsaeng, Lynn	837
Thipyapong, Khajadpai	113
Thirapanmethee, Krit	1091
Thiraphibundet, Pattara	1546
Thitilertdecha, Nont	950, 1067
Thitipramote, Natthawut	950, 1067
Tholaeng, Jitjutha	1412
Thongaied, Pawinee	1541
Thonganantakul, Oukrit	615
Thongkam, Montree	1227, 1285
Thongkhundam, Sangtawan	1360
Thongkon, Nisakorn	195
Thongkred, Paweena	571
Thongpanchang, Tienthong	893
Thongpat, Pongphak	418
Thongpin, Chanchai	1465, 1494, 1500
Thongsrigate, Sareerat	1291

Author	Pages
Thongsrikhem, Nutchanat	849
Thuamwong, Piyanan	866
Thummatudtho, Sudarat	547
Thumnak, Phakaphichchaya	264
Thumthanaruk, Benjawan	343, 349
Thungprasert, Siwat	643
Tiensing, Tinnakorn	108
Tippuwanan, Chaiwat	1465
Titawong, Kannika	222
Toboonpha, Somkiat	78
Tomapatanaget, Boosayarat	728
Tongkate, Pratoomrat	206
Tong-on, Siriporn	686
Tongpan, Nattasit	1111
Toochinda, Pisanu	384, 418, 1234, 1275, 1327, 1360
Toworakajohnkun, Natthawut	1117
Trangwachirachai, Korawich	1296
Treeweranuwat, Panudetch	275, 378, 718
Trichaiyaporn, Sommai	401, 1258
Troangjaroensub, Treerat	156
Tsutsumi, Ken	1198
Tubtimtong, Tanate	917
Tumcharern, Gamolwan	206
Tungasmita, Duangamol	879, 1263
Tungkamani, Sabaithip	1222, 1579, 1662, 1668
Tunyatarinun, Natpatsorn	302
Tusanaviroon, Amorn	1161
-U-	
Udnan, Yuthapong	57
Ummartyotin, Sarute	233,

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสิริพร ทองอ่อน
วัน เดือน ปีเกิด	12 กรกฎาคม 2528
ที่อยู่	60 หมู่ 1 ตำบลห้วยทราย อำเภอเมืองฯ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประวัติทำงาน	2551-ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
เบอร์โทรศัพท์	083-8447095
อีเมลล์	siriporn_t@tistr.or.th