



การศึกษาประสิทธิภาพของใยแก้วที่เคลือบด้วย TiO_2 ในการทำความสะอาดน้ำดื่ม
Study on Photocatalytic Efficiency of TiO_2 Coated Glass Fiber for
Cleaning Drinking Water

พีรวัส กงสง

Peerawas Kongsong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาประสิทธิภาพของใยแก้วที่เคลือบด้วย TiO_2 ในการทำความสะอาด
น้ำดื่ม

ผู้เขียน นายพีรวัส กงสง

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

(ดร.ชีวิตา สุวรรณชวลิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....

.....กรรมการ

(ดร.วิษณุ ราชเพชร)

(ดร.วิษณุ ราชเพชร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....

(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาประสิทธิภาพของใยแก้วที่เคลือบด้วย TiO_2 ในการทำความสะอาดน้ำดื่ม
ผู้เขียน นายพีรวัส คงสง
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย SiO_2 , SnO_2 , N และ Fe^{3+} สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล และเคลือบลงบนเส้นใยแก้วโดยวิธีจุ่มเคลือบและเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส นำเส้นใยแก้วที่ได้บรรจุในชุดปฏิกรณ์ปริมาตร 300 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลู กรดฮิวมิกและเชื้อ *E. coli* ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำดื่ม โดยได้ศึกษาตัวแปรที่สำคัญ คือ ชนิดและปริมาณของสารโด๊ปในไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณเส้นใยแก้ว กำลังของรังสียูวีหรือฟลูออเรสเซนซ์และอัตราการไหลของน้ำ ผลการวิเคราะห์เฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วย XRD พบว่า มีเฉพาะเฟสอะนาเทส จากการทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ที่อุณหภูมิการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส ให้ผลดีที่สุดและเวลาในการรับรังสี ยูวี 4 ชั่วโมง พบว่า ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ 83.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารโด๊ปมีค่าเท่ากับ 71.3 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำสูตรนี้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E. coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ ภายใต้แสง ยูวีในรอบที่ 5 ของการทดสอบ พบว่า สามารถฆ่าเชื้อได้ 97.0 และ 75.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E. coli* และสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ได้แก่ ปริมาณของเส้นใยแก้วที่เคลือบ กำลังของหลอดยูวีและอัตราการไหลของน้ำโดยพบว่า ภาวะที่ได้ผลดีที่สุด คือ ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม กำลังของหลอดไฟ 60 วัตต์ และอัตราการไหลของน้ำที่ 22-25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยผ่านชุดปฏิกรณ์ 5 รอบ สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ 100.0 และ 90.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ในแสงฟลูออเรสเซนซ์ ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ดีกว่าฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วขนาดจุก 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อเป็นอนุกรมจำนวน 10 หลอด โดยภายในหลอดแก้วแต่ละหลอดบรรจุเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ปริมาณ 60 กรัม แหล่งกำเนิดแสงยูวีเป็นหลอดแบล็คไลท์ 6 หลอด (กำลังรวม 60 วัตต์) พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ 54.16 มิลลิลิตร

ตอนที่ ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ 1 รอบ สามารถกำจัดเชื้อ *E.coli* และกรดฮิวมิกได้ 100 เปอร์เซ็นต์
เมื่อให้น้ำที่มีเชื้อโรค *E.coli* ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตรและกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10
มิลลิกรัมต่อลิตร

Thesis Title	Study on Photocatalytic Efficiency of TiO ₂ Coated Glass Fiber for Cleaning Drinking Water
Author	Mr. Peerawas Kongsong
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2010

Abstract

This research aimed to investigate the efficiency of glass fiber which has been coated by TiO₂ doping with SiO₂, SnO₂, N and Fe³⁺. TiO₂ films were prepared by sol-gel method and coated on glass fiber by using dip-coating. Then the films were calcined at various temperatures range from 400-600°C. The coated glass fibers were loaded into a 300 ml reactor in order to study their photocatalytic performance on degradation of methylene blue solution, humic acid and *E.coli* anti-microbial properties in drinking water. Many variables such as type and quantity of dopants in TiO₂ films, quantity of glass fibers loading in a reactor, irradiation power of UV or fluorescent lamps and flow rate of water were investigated. From XRD analysis, it was found that only anatase phases are formed at 400-600 °C. In addition, the best photocatalytic reaction was obtained from films calcining at temperature of 600 °C. The tests were done by means of methylene blue degradation under UV irradiation for 4 hours. It was found that TiO₂/3SnO₂/20N could degrade methylene blue by 83.6 %, while the pure TiO₂ was 71.3 %. Furthermore, the *E.coli* disinfection and humic acid degradation were experiment test under UV irradiation using a photocatalytic reactor filled with TiO₂/3SnO₂/20N films coated glass fibers. After 5 cycles, it was found that 97% of *E.coli* and 96% of humic acid were removed, respectively. Main factors affecting on *E.coli* disinfection efficiency and humic acid degradation of TiO₂/3SnO₂/20N films such as quantity of glass fibers loading, irradiation power of UV lamp and flow rate of water were studied. It was found that the best result was obtained at 90 g of glass fibers loading, 60 W irradiation power of UV lamp and flow rate of water at 22-25 ml/min which provide *E.coli* disinfection efficiency and humic acid degradation efficiency of 100.0% and 90.6%, respectively. However, for irradiation with fluorescent light, TiO₂/3SnO₂/0.3Fe³⁺ films seemed to exhibit higher *E.coli* disinfection and humic acid degradation efficiency than

TiO₂/3SnO₂/20N films. Furthermore, a prototype reactor was designed and constructed with serial connection of ten glass tubes which each tube was loaded with TiO₂/3SnO₂/20N films-glass fibers of 60 g, surrounded by 6 black light tubes of UV source (60 W power). It was found that this reactor can remove *E.coli* and humic acid contaminated in water 100% when the flow rate of water was fixed at 54.16 ml/min where the initial concentrations of bacteria and humic acid were 10³ CFU/ml and 10 mg/l, respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	4
1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	4
1.2.2 กระบวนการ โซล-เจล	16
1.2.3 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)	20
1.2.4 สารฮิวมิก (Humic substances)	21
1.2.5 สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane:THMs)	23
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
1.3.1 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก	25
1.3.2 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านการบำบัดน้ำ	29
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	35
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	35
2 วิธีการวิจัย	37
2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย	37
2.2 กระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์	38
2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	39

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้	45
2.5 กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i>	47
2.6 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้	49
2.7 การตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์ม	51
2.8 การออกแบบและการทดสอบชุดปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำ	52
3 ผลและการอภิปรายผล	53
3.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD	53
3.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	58
3.3 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-VIS)	62
3.4 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)	66
3.5 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้	72
3.6 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้	76
3.7 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้	84
3.8 การออกแบบและการทดสอบชุดปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำ	89
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	91
4.1 บทสรุป	92
4.2 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	102

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ก. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ	103
ข. ตารางแสดงจำนวนเชื้อเฉลี่ยของ <i>E.coli</i> ที่รับรังสียูวีและฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ	106
ค. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของกรดฮิวมิก ที่รับรังสียูวีและฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ	108
ง. ผลงานที่ตีพิมพ์	110
จ. เครื่องมือในการทดสอบการฆ่าเชื้อและสลายกรดฮิวมิก	117
ประวัติผู้เขียน	119

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณภาพน้ำบริโภคในครัวเรือนประเภทต่างๆ ในเขตเมืองและชนบท ปี พ.ศ. 2551	4
1.2 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง TiO ₂	7
1.3 มลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส	15
1.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสในการบำบัดสารมลพิษ	16
1.5 ส่วนประกอบและสมบัติของแก้วชนิดต่างๆ ที่ทำเป็นเส้นใยเสริมแรง	20
3.1 ขนาดผลึกที่คำนวณโดยใช้สมการของ Scherer ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส	57
3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	62
3.3 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	65
3.4 ความถี่และชนิดของการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิค FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	71
3.5 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง	76
3.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> และการสลายกรดฮิวมิกในน้ำ ในรอบที่ 5 ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลที่ 53.6 และ 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที	89
ก.1 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	103
ก.2 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	103
ก.3 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	105

รายการตาราง

รูปที่	หน้า
ก.4	105
เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ	
ข.1	106
ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ โดยควบคุม ปริมาณ เส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอด ยูวีขนาด 60 วัตต์	
ข.2	106
ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ โดย แปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว กำลังวัตต์ที่ใช้และอัตราการไหลของน้ำ	
ข.3	107
ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ โดยควบคุม ปริมาณ เส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอด ฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์	
ค.1	108
ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่ เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์	
ค.2	108
ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว กำลังวัตต์ที่ใช้และอัตราการไหลของน้ำ	
ค.3	109
ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ โดย ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์	

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์	5
1.2	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคไคต์	7
1.3	กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง	10
1.4	กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์	11
1.5	การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล	16
1.6	กระบวนการโซล-เจล	18
1.7	โครงสร้างของกรดฮิวมิก	23
1.8	กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO_2 โดยการโด๊ปด้วยเลนทานัมและไนโตรเจน	26
1.9	กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ ในคอมพอสิตฟิล์ม $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$	26
1.10	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทส และรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ Hurum และคณะ (2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์	28
1.11	แสดงการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วยไนโตรเจน	29
1.12	ชุดทดสอบของ Delai san	30
1.13	ชุดทดสอบที่ใช้หินภูเขาไฟเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์	31
1.14	ชุดทดสอบโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบน Cotton material	32
1.15	ชุดทดสอบของ Byrne	32
1.16	ชุดทดสอบของ Blazkova	33
1.17	ชุดทดสอบของ Peill	34
1.18	ชุดทดสอบของ Hatch	34
2.1	ภาพถ่ายของเส้นใยแก้วชนิด E-glass	37
2.2	การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล	41
2.3	การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล	42

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.4	43
การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ ด้วยวิธีโซล-เจล	
2.5	44
การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ด้วยวิธี โซล-เจล	
2.6	45
โครงสร้างของเมทิลีนบลู	
2.7	45
Spectrum การดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น $0.5 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-5}$ โมลาร์	
2.8	46
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู $0.2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-5}$ โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	
2.9	48
ขั้นตอนการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i>	
2.10	49
ชุดทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก	
2.11	50
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิก 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	
2.12	52
การลากเส้นเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	
3.1	55
XRD patterns ของฟิล์ม (ก) เส้นใยแก้ว (ข) TiO_2 (ค) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ (ง) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ (จ) $\text{TiO}_2/20\text{N}$ (ฉ) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส	
3.2	56
XRD patterns ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	
3.3	56
XRD patterns ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	
3.4	57
XRD patterns ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	
3.5	59
แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	
3.6	59
ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) 200 เท่า (ข) 500 เท่า และ (ค) 40,000 เท่า	
3.7	61
การกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	
3.8	61
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	
3.9	63
การดูดกลืนสเปกตรัมของผงสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	
3.10	64
การดูดกลืนสเปกตรัมของผงสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การดูคลื่นสเปกตรัมของผงสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	64
3.12 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส	65
3.13 แสดง FT-IR สเปกตรัมของผง TiO_2 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	66
3.14 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/5SiO_2$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	67
3.15 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/3SnO_2$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	67
3.16 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/20N$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	68
3.17 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	68
3.18 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/3SnO_2/0.3Fe^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	69
3.19 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/3SnO_2/0.5Fe^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	69
3.20 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/3SnO_2/0.8Fe^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	70
3.21 FT-IR สเปกตรัมของผง $TiO_2/3SnO_2/1.0Fe^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	70
3.22 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ ภายในเวลา 4 ชั่วโมงของการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	73
3.23 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ ภายในเวลา 4 ชั่วโมงของการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	74
3.24 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ ภายในเวลา 4 ชั่วโมงของการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	74
3.25 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ	75
3.26 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง	75
3.27 ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่ออนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์	78

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.28	ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว 30, 60 และ 90 กรัม ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์	79
3.29	ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันกำลังของหลอดยวี่ (ก) 20 (ข) 40 และ (ค) 60 วัตต์ ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม	79
3.30	ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำ 23.5, 53.6 และ 552.3 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์	80
3.31	ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดพลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์	80
3.32	ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ (ก) แสงยวี่เพียงอย่างเดียว (ข) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ค) TiO_2 (ง) $TiO_2/3SnO_2/20N$ และ (จ) $TiO_2/3SnO_2/0.3Fe^{3+}$ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์	81
3.33	ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว (ก) 30 (ข) 60 และ (ค) 90 กรัม ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์	82
3.34	ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันกำลังของหลอดยวี่ (ก) 20 (ข) 40 และ (ค) 60 วัตต์ ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม	82
3.35	ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันการไหลของน้ำ (ก) 23.5 (ข) 53.6 (ค) 552.3 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์	83

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.36	84
<p>ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ (ก) แสงยูวีเพียงอย่างเดียว (ข) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ค) TiO_2 (ง) $TiO_2/3SnO_2/20N$ และ (จ) $TiO_2/3SnO_2/0.3Fe^{3+}$ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ 60 วัตต์</p>	
3.37	86
<p>ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์</p>	
3.38	87
<p>ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว 30, 60 และ 90 กรัม ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์</p>	
3.39	87
<p>ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันกำลังของหลอดยูวี 20, 40 และ วัตต์ 60 ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม</p>	
3.40	88
<p>ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 0-5 รอบ โดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำ 22.1, 51.2 และ 542.9 มิลลิตรต่อนาที ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์</p>	
3.41	88
<p>ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์</p>	
3.42	90
<p>การออกแบบชุดปฏิกรณ์ ก) หลอดแก้ว ข) ภาพจากด้านบน ค) ภาพตัดขวางจากด้านข้าง ง) ภาพชุดปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์</p>	
3.43	91
<p>เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> และสลายกรดฮิวมิกของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ กัน</p>	
3.44	91
<p>ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ กัน ก) ปริมาณเชื้อตั้งต้น ข) 22.03 ค) 54.16 และ ง) 325.81 มิลลิตรต่อนาที</p>	
4.1	117
<p>เครื่องมือในการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> และสลายกรดฮิวมิก (ด้านบน)</p>	

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	เครื่องมือในการทดสอบการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> และสลายกรดฮิวมิก (ด้านข้าง)	117
4.3	ชุดต้นแบบเครื่องปฏิกรณ์ ก) หลอดไฟ ข) หลอดแก้ว ค) ภาพจากด้านบน ง) ภาพชุดปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

นอกจากอากาศที่เราหายใจ เป็นสิ่งที่มนุษย์ต้องการแล้ว น้ำสำหรับดื่ม ก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่เราจำเป็นต้องร่างกาย เพราะน้ำมีส่วนสำคัญในกระบวนการทำงานของร่างกาย โดยน้ำจะช่วยชำระล้างสารพิษในร่างกายและรักษาอุณหภูมิในร่างกายให้คงที่ น้ำดื่มจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในชีวิตประจำวันของเรา สุขภาพร่างกายของพวกเราจะสมบูรณ์แข็งแรงได้นั้น ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เราบริโภคเข้าไป ในทางตรงข้ามกัน ถ้าเรดื่มน้ำที่ไม่สะอาดมีสิ่งปนเปื้อน ไม่ว่าจะเป็นสารเคมีหรือเชื้อโรคเข้าไปก็จะเป็นอันตรายต่อร่างกายได้

การมีน้ำบริโภคที่สะอาดปลอดภัย นับเป็นความจำเป็นพื้นฐานของการดำรงชีวิต และการมีสุขภาพดี ซึ่งเป็นสิทธิที่ทุกคนจะได้รับอย่างเท่าเทียมกัน อย่างไรก็ตามในภาพรวมของประเทศประชาชนส่วนหนึ่งยังขาดแคลนน้ำสะอาดสำหรับบริโภค โดยความรุนแรงของการขาดน้ำสะอาดในชนบทสูงกว่าในเขตเมือง โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งมีหมู่บ้านที่ประสบภัยแล้งซ้ำซากเป็นประจำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการพัฒนาประเทศ ในปัจจุบัน ได้มีโครงการน้ำประปาดื่มได้ แต่จากการสำรวจของกองสุขาภิบาลอาหารและน้ำร่วมกับศูนย์อนามัยที่ 1-12 สำหรับปี พ.ศ. 2550 ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านที่ผ่านการรับรองเป็นน้ำประปาดื่มได้ในช่วง พ.ศ. 2543-2546 จังหวัดตามภูมิภาคต่างๆ จำนวน 110 ตัวอย่าง พบว่า คุณภาพน้ำไม่อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำบริโภคกรมอนามัย พ.ศ. 2543 ถึงร้อยละ 79.1 สำหรับ ปี พ.ศ. 2551 ก็ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำประปาต่างๆ ได้แก่ น้ำประปา น้ำบ่อตื้น น้ำบ่อบาดาล และน้ำฝน จังหวัดตามภูมิภาคต่างๆ 19 จังหวัด จำนวน 418 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 1.1 พบว่า คุณภาพน้ำไม่อยู่ในเกณฑ์ ถึงร้อยละ 82.3 จะเห็นได้ว่าภาพรวมของประเทศสถานการณ์น้ำบริโภคของครัวเรือนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภคกรมอนามัยค่อนข้างต่ำ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2553)

ปัจจุบันสารปนเปื้อนในน้ำมีแนวโน้มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากปัญหาการทิ้งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การทำการเกษตร ที่ส่งผลให้สารเคมีในแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้ปัญหาโลกร้อนก็ส่งผลให้เชื้อโรคสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะ *Escherichia coli* (*E.coli*) ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้เป็นสาเหตุการระบาดของโรคอาหารเป็นพิษในหลายประเทศทั่วโลก ผู้ติดเชื้อจะมีอาการท้องเสียถ่ายอุจจาระเป็นน้ำหรืออาการลำไส้ใหญ่อักเสบมี

เลือดออก (Haemorrhagic colitis, HC) คือปวดเกร็งอย่างรุนแรงในช่องท้อง ถ่ายเป็นเลือดสด ไม่มีไข้หรือมีไข้ต่ำผู้ป่วยที่ถ่ายเป็นเลือดสด โดยเฉพาะเด็กเล็กและผู้สูงอายุมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดอาการ Haemolytic uremic syndrome (HUS) ตามมา ในผู้สูงอายุอาจเกิด Thrombotic thrombocytopenic purpura (TTP) ร่วมด้วย ทำให้เสียชีวิตได้ ผู้ติดเชื้ออาจไม่แสดงอาการของโรคแต่สามารถถ่ายทอดเชื้อให้ผู้อื่นได้ (อรอนงค์ รัชตราชนชัย, 2551) ประเทศไทยก็ประสบปัญหาดังกล่าวเช่นกัน โดยมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติมีการศึกษาวิจัยน้ำดื่มตู้หยอดเหรียญในกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือนมีนาคม-มิถุนายน 2548 จำนวน 546 ตัวอย่าง จากผลการตรวจวิเคราะห์ พบว่า มีน้ำดื่มที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทางกายภาพ จำนวน 39 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 7.1 เนื่องจากมีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ได้มาตรฐาน ช้ำมีกลิ่น รส เป็นที่น่ารังเกียจ ส่วนน้ำดื่มที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยา มีจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด มากกว่า 500 โคโลนิต่อมิลลิลิตร จำนวน 203 ตัวอย่าง พบเชื้อ *E.coli* จำนวน 36 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 6.6 พบเชื้อ *P.aeruginosa* จำนวน 109 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 20 พบสาหร่ายจำนวน 7 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 1.3 ซึ่งจะเป็นอันตรายอย่างยิ่งถ้าเราดื่มน้ำที่ไม่ปลอดภัยดังกล่าวเข้าไป

การแก้ปัญหา น้ำดื่มที่มีสารปนเปื้อน โดยการใส่สารเคมีเพิ่มเข้าไปก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เช่น การใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม (Chlorination) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และราคาถูก ในปัจจุบัน พบว่า คลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำ กลายเป็นสารก่อมะเร็งชื่อว่า ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane: THMs) โดยสารอินทรีย์ที่พบมากที่สุดแหล่งน้ำผิวดินคือสารฮิวมิก (Humic substance) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ (Edzwald, 1993) ส่วนใหญ่พบในรูปของกรดฮิวมิก (Humic acid, HA) จากข้อมูลที่มีการศึกษา โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำจากท่อประปาบริเวณรอบกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2548 พบว่า มีค่าความเข้มข้นของสารไตรฮาโลมีเทนอยู่ในช่วง 40-115 ไมโครกรัมต่อลิตร (วรพจน์ กนกกันทพงษ์ และคณะ 2549) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) พบว่า มีหลายช่วงเวลาที่น้ำประปามีสาร THMs เกินอยู่ในระดับสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของสหรัฐอเมริกาซึ่งกำหนดไว้ที่ 80 ไมโครกรัมต่อลิตร และในอนาคตค่ามาตรฐานนี้จะลดลงเป็น 40 ไมโครกรัมต่อลิตร (USEPA, 2006) แสดงให้เห็นว่า ผู้บริโภคน้ำประปามีโอกาสเสี่ยงต่อการได้รับสารตกค้างเหล่านี้ในระดับที่เกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำดิบของระบบประปามาเติมคลอรีน ต้องมีการกำจัดกรดฮิวมิกออกก่อนเพื่อลดการเกิดสารก่อมะเร็ง และลดปัญหาสีและกลิ่นของน้ำ

การนำเทคนิคโฟโตแคตะไลติกมาประยุกต์ใช้สำหรับบำบัดน้ำดื่มก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งมีการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปีแล้ว โดยสารสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มี

สมบัติทางด้านโฟโตแคตะลิซิสที่ดี กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก เริ่มจากเมื่อมีแสงมากระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจาก Valence band ไปสู่ conduction band และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้น เรียกออกซิเจนตัวนี้ว่า Super oxygen ใน Valence band จะเกิดหลุมอิเล็กตรอน (hole (h^+)) และ hole (h^+) นี้ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำหรือความชื้นทำให้เกิด Hydroxyl radical ซึ่งอนุภาคทั้งสองนี้จะมีสมบัติในการออกซิเดชันสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ให้แตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามลำดับ (Agustina et al., 2005) นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติที่เรียกว่า Bactericidal effects ซึ่งหมายถึงมันสามารถฆ่าพวกแบคทีเรียและสลายแบคทีเรียที่ตายแล้ว รวมทั้งสารพิษที่เกิดขึ้นหลังจากการฆ่าแบคทีเรียเหล่านั้น ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีกว่าสารต่อต้านแบคทีเรียตัวอื่นๆ อีกทั้งเป็นสารที่เสถียรไม่เสื่อมสลาย แต่ยังคงสามารถทำงานได้ต่อไปเป็นระยะเวลาเวลานานตราบที่ยังคงมีแสง (พรนภา สุจิตวรกุล, 2548) กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก มีข้อดีในการบำบัดสารอินทรีย์ หรือ สารพิษบางชนิด ตลอดจนการฆ่าเชื้อโรค จะไม่มีสารเคมีที่อันตรายเข้าไปปนเปื้อนในระบบ โดยใช้เพียงแค่แสงกระตุ้นการทำงานเท่านั้น จึงมีแนวโน้มที่จะถูกประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในการทำความสะดวก น้ำดื่ม การฆ่าเชื้อโรคและการย่อยสลายสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำดื่ม โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกตรึงอยู่บนเส้นใยแก้ว ตลอดจนออกแบบต้นแบบเครื่องทำความสะอาดน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ ในการศึกษาจะสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดผลึกระดับนาโนโดยได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลประสิทธิภาพของฟิล์ม เช่น อุณหภูมิในการสังเคราะห์ ชนิดและปริมาณสาร โด๊ป เป็นต้น นอกจากนั้นยังได้ศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยแก้วในชุดปฏิกิริยา อัตราการไหลของน้ำและกำลังของแสงยูวีที่ใช้ในระบบต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและย่อยสลายกรดฮิวมิก

ตารางที่ 1.1 คุณภาพน้ำบริโภคในครัวเรือนประเภทต่างๆ ในเขตเมืองและชนบทปี พ.ศ. 2551

แหล่งน้ำ	จำนวน ตัวอย่าง	คุณภาพน้ำ			
		ทางกายภาพ เคมี แบคทีเรีย			
		อยู่ในเกณฑ์ จำนวน	ร้อยละ	ไม่อยู่ในเกณฑ์ จำนวน	ร้อยละ
น้ำประปาเขตเมือง	87	34	39.1	53	60.9
น้ำประปาหมู่บ้าน	66	16	24.2	50	75.8
น้ำบ่อบาดาลเขตเมือง	11	1	9.1	10	90.9
น้ำบ่อบาดาลเขตชนบท	23	0	0	23	100.0
น้ำบ่อดินเขตเมือง	27	1	3.7	26	96.3
น้ำบ่อดินเขตชนบท	31	3	9.7	28	90.3
น้ำฝนเขตเมือง	66	9	13.6	57	86.4
น้ำฝนเขตชนบท	107	10	9.3	97	90.7
รวม	418	74	17.7	344	82.3

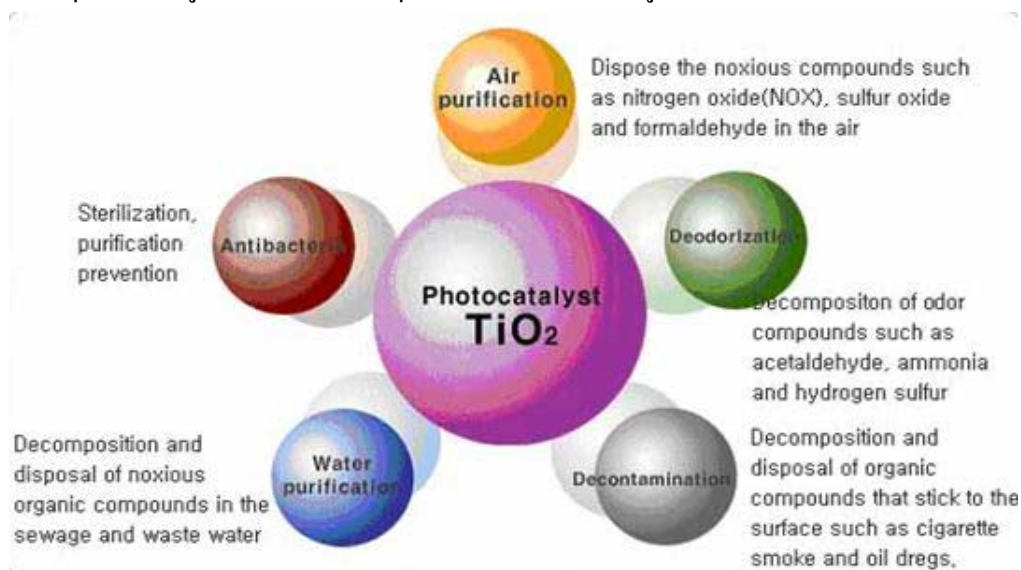
ที่มา: จากรายงานสถานการณ์น้ำสะอาดเพื่อการบริโภคในประเทศไทย กองสุภาพิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือไทเทเนียเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรกของตารางธาตุ ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ และราคาไม่แพงมาก (รูปที่ 1.1) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์

ทางด้านกรมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์

(ที่มา: <http://www.onlinemarket.com.au/whatisnew/photocatalyst/:15/02/2554>)

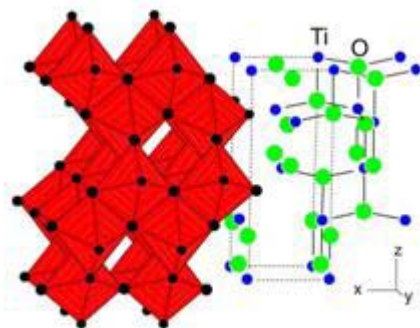
นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูง ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซิน และสารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction กระบวนการสังเคราะห์สาร Fischer-Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ (SO_2) เป็นต้น

1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

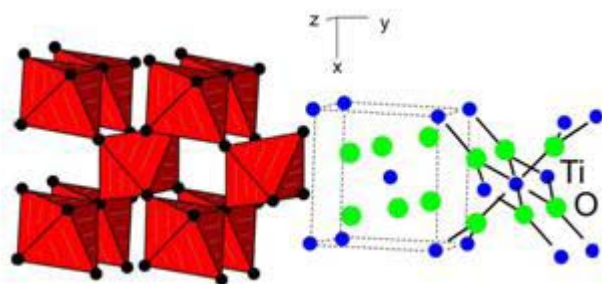
ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรก ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบบ่อยมีโครงสร้าง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 1.2 คือ รูไทล์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) อะนาทาสมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และบรูคไคต์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก

(Orthorhombic) (ตารางที่ 1.2) อะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 อิเล็กตรอน โวลต์) อะนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ (Yang et al., 2002) ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ คืออัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก จะให้ผลปฏิกิริยาดีมากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเป็นคู่กัน เช่นในระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ จากการศึกษาของ Yang และคณะ พบว่า ระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ เป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีเนื่องจาก Quantum yield สูง ความแตกต่างของแถบการนำใน TiO_2 และ SnO_2 ส่งผลให้มีการแยกของ Photoinduce e^- -hole pair และยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะไปป้องกันการรวมตัวกลับกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอน และหลุมประจุบวกที่ทำให้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย

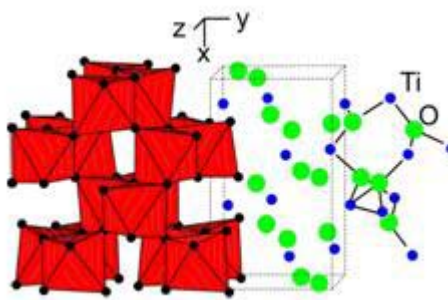
(ก) อะนาเทส



(ข) รูไทล์



(ค) บรูคไคต์



รูปที่ 1.2 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาทาส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคไคต์
(ที่มา: <http://www.staff.aist.go.jp/.../english/itscgallery-e.htm>: 19/11/2553)

ตารางที่ 1.2 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง TiO₂

Material name		Rutile				
Composition		TiO ₂				
System		Tetragonal				
Temperature (°C)		25				
$a(\text{Å}), b(\text{Å}), c(\text{Å})$		4.593(2)	4.593(2)	2.959(2)		
$\alpha(\text{deg}), \beta(\text{deg}), \gamma(\text{deg})$		90	90	90		
Unit cell volume (Å ³)		62.42				
D_x (g/cm ³)		4.25				
Space group		$P4_2/mnm$ (No.136)				
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	$2a$	1	0	0	0	0.42(6)
O	$4f$	1	0.3051(7)	0.3051(7)	0	0.6(6)

ที่มา: Meagher, E.P; Lager, G.A. *The Canadian Mineralogist*. 1979, 17, 77.

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)

Material name			Anatase			
Composition			TiO ₂			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			3.7842(13)	3.7842(13)	9.5146(15)	
α (deg), β (deg), γ (deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			136.3			
D_x (g/cm ³)			3.89			
Space group			I ₄ /amd (No.141)			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	4a	1	0	0	0	0.390(63)
O	8e	1	0	0	0.2081(2)	0.613(90)

ที่มา: Horn, M.; Schwerdtfeger, C.F.; Meagher, E.P. *Zeitschrift für Kristallographie*. 1972, 136, 273

Material name			Brookite			
Composition			TiO ₂			
System			Orthorhombic			
Temperature (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			9.174(2)	5.449(2)	5.138(2)	
α (deg), β (deg), γ (deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			257			
D_x (g/cm ³)			4.13			
Space group			Pbca (No.61)			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	8c	1	0.1289(1)	0.0972(1)	0.8628(1)	0.37(3)
O	8c	1	0.0095(4)	0.1491(5)	0.1835(5)	0.46(6)
O2	8c	1	0.2314(4)	0.1110(4)	0.5366(6)	0.53(7)

ที่มา: Meagher, E.P; Lager, G.A. *The Canadian Mineralogist*. 1979, 17, 77.

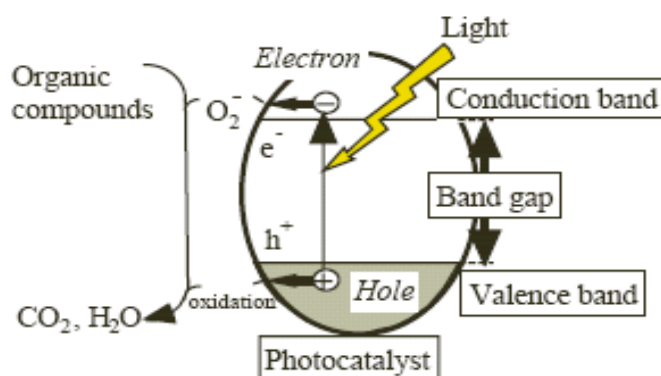
โครงสร้างผลึกอะนาเทส รูไทล์ และบรูคไคต์ สามารถแสดงได้ในรูปของ TiO_2 ที่เป็นปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกัน และจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไคต์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล (แสดงดังรูปที่ 1.2)

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิด ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาเทส สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส (ธรรมนุญ ศรีทวงค์, 2551) นับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม) หรือเซรามิกที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าว ได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก ในการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทส และรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษา กันโดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมโดยปกติ นั้น โครงสร้างผลึกอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่า โครงสร้างผลึกรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกรูไทล์ หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ (เช่น อะนาเทส 70-75 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 30-25 เปอร์เซ็นต์) มีรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทส โดยมีตัวแปรหลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของ แต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมาก คือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (ธรรมนุญ ศรีทวงค์, 2551)

ลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจน ในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้น จะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการ

เกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบคอนดัคชัน (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว (รูปที่ 1.3)



รูปที่ 1.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง (ที่มา: <http://believerwoman.wordpress.com/2007/08/01/what-is-hydrosynthetic-photocatalyst:28/11/2553>)

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงาน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอะนาเทส และรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแตกต่างกันคือ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับ โครงสร้างผลึกอะนาเทส และ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับ โครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่าง

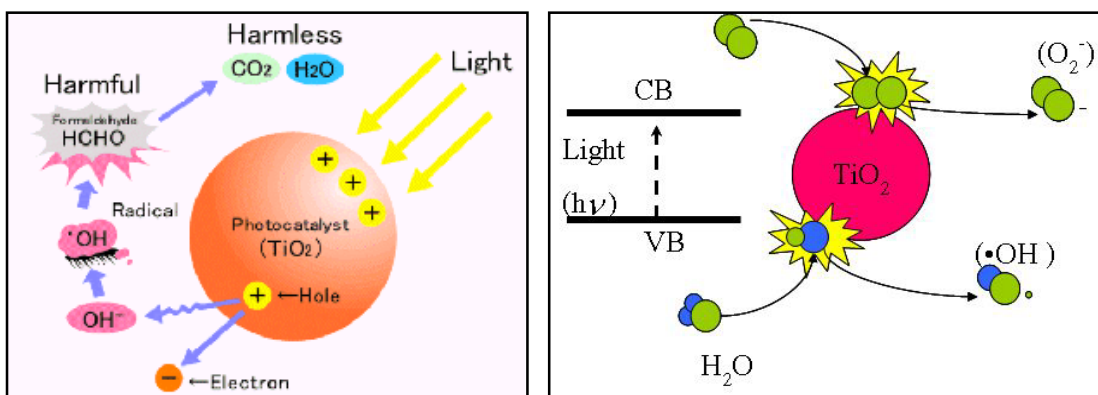
กัน โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (ธรรมนบุญ ศรีทะวงศ์, 2551)

2) ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic effect)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตแคตะไลสต์ จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ หลักการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเมื่อวัสดุโฟโตแคตะไลสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้น และจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำทำให้ในแถบเวเลนซ์เกิดหลุมประจุบวกขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O₂⁻) ดังแสดงในสมการ (1.1)-(1.3) โดยในที่นี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตแคตะไลสต์



ไฮดรอกซิลเรดิคัล และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

(ที่มา: www.antonio.licciulli.unile.it: 10/01/2553)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกใช้เป็นโฟโตแคตะลิสต์ (Photocatalyst) อย่างแพร่หลาย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นพิษ มีสมบัติทางเคมีที่เสถียรและมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูง มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างรุนแรง ในขณะที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) สูงด้วย มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มที่เคลือบด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า 0 องศา ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างในผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์หลุด เกิดหลุมประจุบวกขึ้นซึ่งหลุมประจุบวกจะตอบสนองต่อผิวของออกซิเจนอะตอมและเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล จากปรากฏการณ์นี้จึงมีการนำไปใช้งานทางด้านต่างๆ เช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้องหรือการป้องกันจากหมอกจับกระจกรถยนต์ตอนอากาศเย็น (Kanai et al., 2004; Hubbell et al., U.S. Patent 0159309, 2005)

การศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นเฟสอะนาเทส เป็นไปอย่างกว้างขวาง มีการใช้ตัวได้ปลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการศึกษาที่เน้นใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมและการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแคตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกไปศึกษาการทำลายเชื้อโรคและกำจัดเซลล์มะเร็ง ซึ่งเป็นโรคที่มีอัตราการตายของคนมาเป็นอันดับต้นๆ (Blake et al., 1999) รูปแบบของโฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้งาน อาจอยู่ในรูปผง หรืออยู่ในรูปฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุที่ต้องการทดสอบก็ได้

3) ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) และความเข้มของแสง (Bing-Nan et al., 1999; Fox & Duley, 1993; Stafford et al., 1996; Tang et al., 1997; Venkatadri and Perter, 1993)

1. ค่าพีเอช

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำและมีค่าเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลาง (Point of zero charge)

คือ 6-6.3 และไฮดรอกซิลจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส เมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 3 และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้แถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 มิลลิโวลต์ต่อหนึ่งหน่วยพีเอช

2. ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และเร่งให้เกิดปฏิกิริยากำจัดสารปนเปื้อนและทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลาย จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสลดลง เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสง และปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ทั้งนี้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชันส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

3. อุณหภูมิ

จากข้อมูลทางจลศาสตร์ อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียสเขียนได้ดังนี้

$$K = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, นาที⁻¹ (Reaction rate constant, min⁻¹)

A = แฟกเตอร์ความถี่, นาที⁻¹ (Frequency factor, min⁻¹)

E_a = พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล (Activation energy, J mole⁻¹)

R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (Absolution temperature, K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากการความชันของกราฟลอการิทึมที่พล็อตระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (K) กับค่า 1/T (Reutergadh and langphasuk, 1997; Serpone and Pelizzetti, 1989)

$$\ln K = \frac{E_a}{RT} + \ln A$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมกันใหม่ ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และความถี่ในการชนกันของโมเลกุลก็มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e^-_{cb} ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ ออกซิเจนจึงเป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และออกซิเจนจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอีกด้วย

5. ความเข้มของแสง (Light intensity)

เนื่องจากความเข้มของแสง คือพลังงานต่อหน่วยเวลานั้นคือ อนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ (ν) จะมีพลังงาน (E)= $h\nu$ หรือคิดเป็น 1 ควอนตัม ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานแสง โดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_t ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \frac{\text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ}}{\text{พลังงานของแสง 1 โฟตอน}} \\ &= E_t/h\nu \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \frac{\text{ความเข้มแสง}}{h\nu}$$

การกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e^-_{cb} และ h^+_{vb} ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ระดับความเข้มแสงต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง (Ollis et al., 1991; Tseng et al., 1991) ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) เป็นสัดส่วนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) มีความยาวคลื่นระหว่าง 100 ถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งแสงแดดประกอบด้วยความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. อัลตราไวโอเลตซี (Ultraviolet C) มีความยาวคลื่น 100-290 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้โดยมากจะถูกดูดซับโดยก๊าซโอโซนในบรรยากาศ ฉะนั้นแสงอัลตราไวโอเลตมาถึงโลกจะอยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่น 290-400 นาโนเมตร

2. อัลตราไวโอเลตบี (Ultraviolet B) มีความยาวคลื่น 290-320 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวเกรียมแดดและผิวหนังอักเสบ เป็นตัวหลักที่ทำให้ผิวแก่ก่อนวัย และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้เร็วขึ้น

3. อัลตราไวโอเลตเอ (Ultraviolet A) มีความยาวคลื่น 320-400 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวคล้ำแดดโดยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน แต่ไม่ทำให้เกิดการอักเสบ

4. แสงสีขาวยังมีความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร

5. อินฟราเรด (Infrared) มีความยาวคลื่น 800-1,700 นาโนเมตร (Bolton et., 1994)

4) การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสในการบำบัดมลพิษ

กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการกำจัดสารพิษ และเป็นที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษที่มีความอันตรายจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้มีได้หลากหลายดังแสดงในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 มลสาร (Pollutant) ที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส

(Hoffman et al., 1995; Yang et al., 2006)

ประเภทของมลสาร	benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, phenols, trichloroethylene และ สารระเหยจำพวก halogenated hydrocarbon, polychlorinated biphenyls (PCBs), dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), dioxins, สารฆ่าแมลง และสารปราบศัตรูพืช, ลิกนิน, สารลดแรงตึงผิว humic acids (HA)
มลสารอนินทรีย์	cyanide, hydrogen sulfide, mercury, cadmium, chromium (Cr^{+6}), sulfite, manganese, lead, zinc, copper, arsenic
เชื้อโรค	<i>Escherichia coli</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Fecal coliform</i>

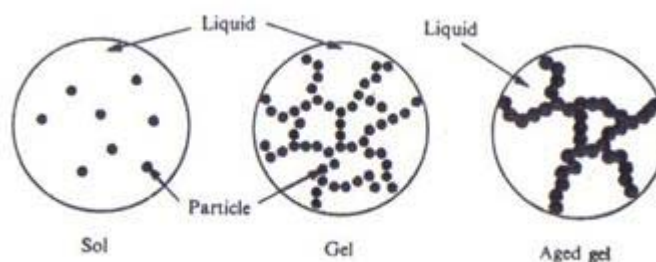
ตารางที่ 1.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสในการบำบัดสารมลพิษ (Hoffman et al., 1995)

ชนิดของตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - การฆ่าเชื้อโรค - การย่อยสลายปราบศัตรูพืช - กำจัดมลสารอินทรีย์ - ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ - ย่อยสลายสี - สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> - ลดกลิ่นภายในอาคาร - ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	<ul style="list-style-type: none"> - บำบัดสารฆ่าแมลง - ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในการบำบัดสารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์มากกว่าที่จะใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่เป็นสารอนินทรีย์ รวมถึงนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคด้วย ดังแสดงได้ในตารางที่ 1.4 (สุจิตรา นาวารัตน์, 2553)

1.2.2. กระบวนการ โซล-เจล

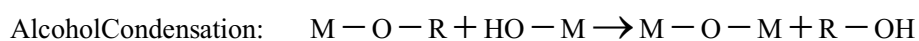
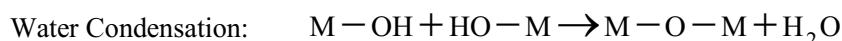
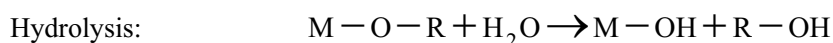
กระบวนการผลิตด้วยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกแก้วและโดยเฉพาะวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” แสดงดังรูปที่ 1.5



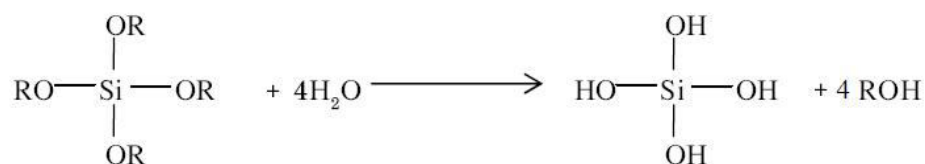
รูปที่ 1.5 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

(ที่มา: <http://phys.suwan.ac.kr/jgyoon/lab/solgel.ht>; Brinker and Scherer, 1990: 1/01/2553)

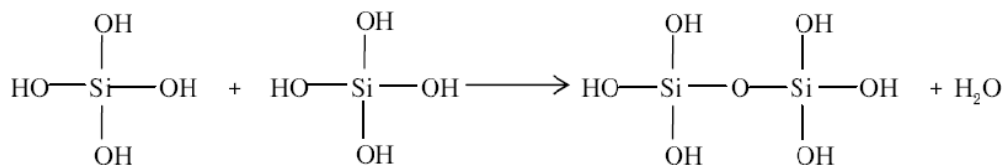
ปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นเป็นน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการข้างล่าง มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในภาวะที่ต่างกันทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทนกลุ่มอัลคอกซิล (Alkoxy group)



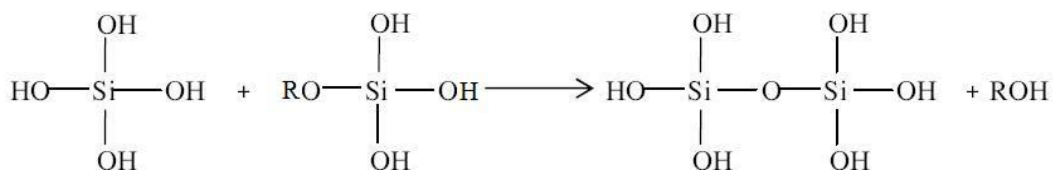
ขั้นตอนแรกของการทำโซล-เจล คือผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะบางชนิดที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วนอัลคอกไซด์ (Alkoxide) ชนิดอื่น เช่น อะลูมินาต (Aluminate) ไทเทเนต (Titanate) และบอร์เรต (Borate) มีใช้กันแพร่หลาย และมักใช้ร่วมกับ TEOS เช่น Si(OR)_4 ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS) C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำดังสมการ



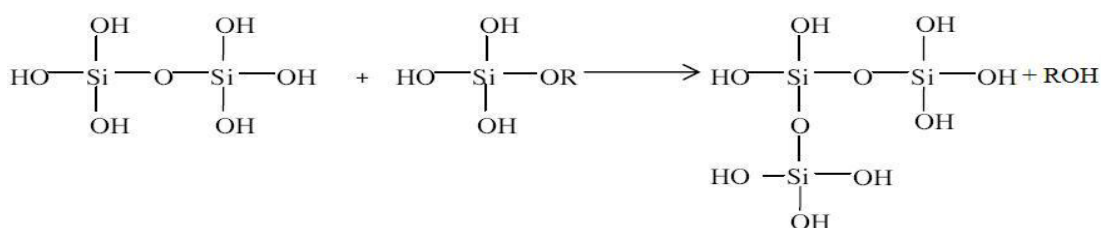
และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นในน้ำ



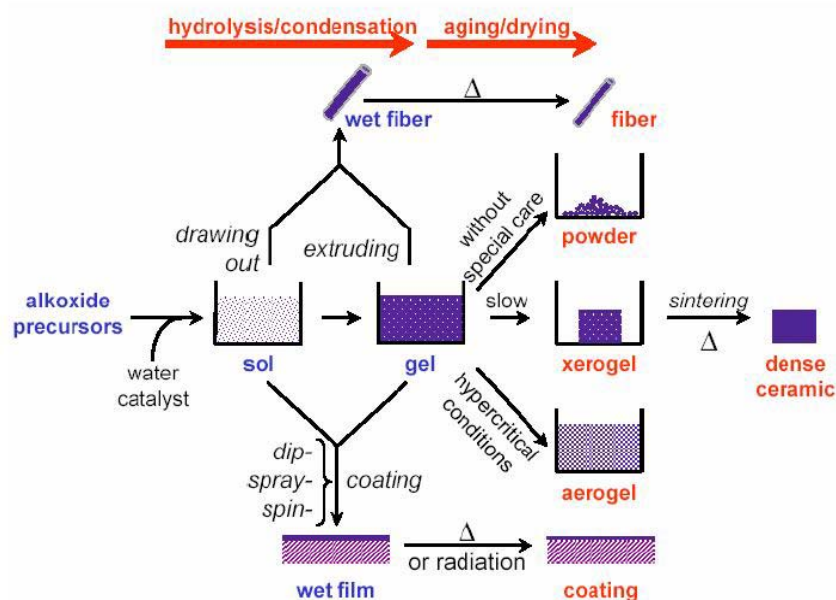
หรือ การควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควมนั่นต่อไปจนกลายเป็นโครงตาข่ายซิลิกา (Silica network) อยู่ในสถานะที่เรียกว่า เจล จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า พอลิคอนดีนเซนชัน



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็น โซล หรือ เจล เมื่อเข้าสู่ภาวะทำให้แห้งจะ ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) และฟิล์มเคลือบ (Coating film) เป็นวัสดุพิเศษสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป (รูปที่ 1.6)



รูปที่ 1.6 กระบวนการ โซล-เจล

(ที่มา: <http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.html> :11/01/2551)

วิธี โซล-เจล ประกอบด้วยการเตรียมสารละลายเนื้อเดียวกัน เปลี่ยนสารละลายเป็นโซล สำหรับ TEOS ปฏิกิริยาจะเริ่มด้วยการไฮโดรไลซิสกลุ่ม Alkoxyyl หนึ่งหรือมากกว่าของโมเลกุล TEOS ในการผลิตจะใช้น้ำและแอลกอฮอล์ 2 โมเลกุลประกอบด้วย OH-group จะถูกพอลิเมอไรซ์โดยกำจัดน้ำออก ทำให้เกิดการฟอร์มตัวด้วยพันธะ Si-O-Si และเมื่อต่อกับกลุ่มอื่นก็จะได้เป็นพันธะ Si-O-Si-O-Si การซ้ำกระบวนการทำให้ได้โมเลกุลเป็นเส้นยาวหรืออนุภาคเป็น 3 มิติที่โมเลกุลเส้นตรงและอนุภาคละเอียดประกอบด้วยพันธะซ้ำๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 1.6

ข้อดีของวิธีโซล-เจล

- ทำให้เกิดพันธะบางๆ ระหว่างวัสดุฐาน (Substrate) กับตัวสารเคลือบ
- สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้
- สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่ายๆ และที่มีรูปร่างซับซ้อน
- ทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง
- มีความบริสุทธิ์สูง
- ความเป็นเนื้อเดียวกัน
- เตรียมได้ด้วยอุณหภูมิต่ำ

การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พงลเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้ว (รูปที่ 1.6) สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสงและการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจล จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารและวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัว หรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่ หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมียูจำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจล จะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลสามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมลักษณะและสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจล เป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคได้จริง (เล็ก สีคง, 2547)

1.2.3 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

เส้นใยแก้ว ผลิต โดยให้แก้วหลอมหยดผ่านรูเล็กๆ และดึงให้ยืดออกด้วยพวยอากาศ แก้วมาตรฐานที่ใช้สำหรับเสริมแรงในวัสดุผสม คือ แก้วชนิด E ชนิดโบโรซิลิเกต ในกรณีที่ต้องการสมรรถนะเชิงกลสูงขึ้นไปจะใช้แก้วชนิด R และชนิด S สำหรับทนต่อกรดและด่างจะใช้แก้ว ECR และ AR แก้วชนิด C จะทนต่อสารเคมีใช้เป็นวัสดุผสมชนิด GRP ในการทำโครงสร้างและบุผนังด้านในจะใช้แก้วชนิด E และ ECR ชนิดเส้นใยต่อเนื่อง ส่วนประกอบของแก้วชนิดต่างๆ ที่ใช้สำหรับทำเส้นใยแก้วที่กล่าวแล้ว แสดงดังตารางที่ 1.5 เส้นใยแก้วที่ผลิตจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-25 ไมครอน จะทำเป็นเกลียว ซึ่งมีความแข็งแรงถึง 5 GPa เส้นใยแก้วขนาดสั้นใช้สำหรับเป็นฟิลเลอร์ในเรซินพอลิเมอร์สำหรับการหล่อพิมพ์ กลุ่มของเส้นใยอาจถูกสานเป็นรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการเสริมแรงหรืออาจจัดเป็นรูปแบบต่างๆ

สำหรับเส้นใยที่จัดเรียงแบบสุ่มต่อเนื่องและเส้นใยขนาดสั้น จะต้องใช้ไบเดอร์เพื่อให้เส้นใยเกาะติดกับเนื้อเมทริกซ์ของวัสดุผสม ไบเดอร์สำหรับเส้นใยแก้วชนิด E ได้แก่ PVA-อิมัลชันสำหรับแก้วชนิด C ได้แก่ พอลิเอทิลีน หรือ พอลิสไตรีน สำหรับเมทริกซ์ชนิดอีพ็อกซี หรือ พอลิเอสเทอร์ ส่วนใหญ่ไม่ต้องใช้ไบเดอร์ (เล็ก สีคง, 2547)

ตารางที่ 1.5 ส่วนประกอบและสมบัติของแก้วชนิดต่างๆ ที่ทำเป็นเส้นใยเสริมแรง (เล็ก สีคง, 2547)

	ส่วนประกอบ (% โดยน้ำหนัก)						
	A	C	E	ECR	R	S	AR
SiO ₂	72.0	64.6	52.4	58.4	60.0	64.4	61.0
Al ₂ O ₃	1.2	4.1	14.0	11.0	25.0	25.0	0.5
CaO	10.0	13.4	17.2	22.0	9.0	-	5.0
MgO	2.5	3.3	4.6	2.2	6.0	10.3	0.05
Na ₂ O, K ₂ O, Li ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.9	-	-	14.0
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	0.09	-	-	-
BaO	-	0.9	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	3.0	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	-	-	-	13.0
TiO ₂	-	-	-	2.1	-	-	5.5
Fe ₂ O ₃	0.3	-	0.4	0.26	-	-	0.5
ความถ่วงจำเพาะ	2.45	2.45	2.56	2.6	2.58	2.49	2.74

ตารางที่ 1.5 (ต่อ)

	ส่วนประกอบ (% โดยน้ำหนัก)						
	A	C	E	ECR	R	S	AR
ดัชนีหักเหแสง	1.512	1.520	1.548	-	-	1.523	1.561
ความแข็งแรงดึงของเส้นใยเส้นเดียว (GPa)	3.1	-	3.6	3.4	4.4	4.5	2.5
มอดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย (GPa)	72.0	-	76.0	73.0	85.0	86.0	80.0
จุดอ่อนตัว (องศาเซลเซียส)	700	690	850	900	990	1000	860

1.2.4 สารฮิวมิก (Humic substances)

สารฮิวมิกจัดอยู่ในกลุ่มสารอินทรีย์ในธรรมชาติที่ละลายอยู่ในน้ำ (Organic contaminants) โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

1) Natural organic matter (NOM) ประกอบด้วย Humic substances, Microbial exudations และสารอินทรีย์อื่นที่ละลายในน้ำจากแหล่งกำเนิด เช่น เนื้อเยื่อของพืชและของเสียจากสัตว์

2) Synthetic organic chemicals (SOCs) ประกอบด้วย ยาฆ่าแมลง Volatile organic chemicals (VOCs) และสารเคมีสังเคราะห์ตัวอื่น

3) Chemical by-product and additives ที่เข้ามาหรือเกิดขึ้นในน้ำระหว่างการบำบัด (Treatment system) หรือในระบบการจ่ายน้ำ (Distribution system)

แต่กลุ่มที่สำคัญคือ NOM เนื่องจากในกลุ่มนี้มีสารฮิวมิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ ซึ่งสารนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก มีรูปร่างไม่แน่นอน มีต้นกำเนิดจากการสลายตัวของซากพืช สารฮิวมิกนั้นมียู่ทั่วไปในดิน ในน้ำและแหล่งน้ำธรรมชาติ ในตะกอนของคลอง หนอง บึง ทะเลสาบและมหาสมุทร แหล่งพรุ (Peat bog) ลิกไนต์ ถ่านหิน ชนิดต่างๆ ในปัจจุบันได้ พบว่า อินทรีย์วัตถุในดินจะเป็นสารฮิวมิกประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในธรรมชาตินั้นมีสารฮิวมิกเป็นส่วนประกอบประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นทั้งน้ำจืดและมหาสมุทรมีสารฮิวมิกอยู่เป็นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้อันเป็นสาเหตุของการเกิดสีในน้ำที่เป็นสีเทที่ไม่สามารถกำจัดได้ง่าย ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานสำหรับความเข้มข้นสารฮิวมิกที่ยอมรับเป็นอนินในน้ำได้ แต่ในบางประเทศ เช่น สาธารณรัฐเช็ก มีการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารฮิวมิกที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มต้องมีค่าไม่เกิน 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Christopher, 1992)

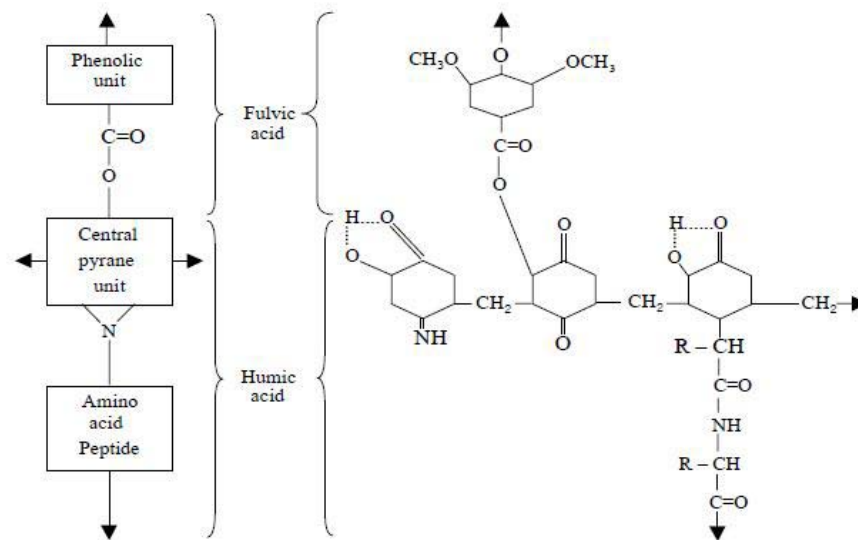
สารฮิวมิก สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. กรดฮิวมิก (Humic acid) เป็นส่วนที่พบมากของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน มีสมบัติละลายได้ในน้ำ แต่ไม่ละลายในภาวะที่เป็นกรดที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2 หรือ Ethyl alcohol
2. กรดฟัลวิก (Fulvic acid) เป็นส่วนที่อยู่ในดินมีสมบัติละลายได้ทั้งในสารละลายกรดและด่าง
3. ฮิวมิน (Humin) มีสมบัติไม่ละลายทั้งในสารละลายกรดและด่าง

กรดฮิวมิก (Humic acid)

กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งได้จากกระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติ พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นสาเหตุทำให้เกิดสีเหลืองหรือสีชาของน้ำ การเกิดปฏิกิริยาหรือการรวมตัวเป็นสารประกอบนี้ไม่เป็นที่แน่ชัด แต่ละโมเลกุลของกรดฮิวมิกมีโครงสร้างที่ซับซ้อนไม่แน่นอน Stevenson, (1982) ได้ศึกษา พบว่า กรดฮิวมิกมีโครงสร้างดังรูปที่ 1.7 ซึ่งกลุ่มของ Functional group ที่ยื่นออกมาตามพื้นผิวของมันจะเป็นส่วนที่คลอรีนอิสระจะมาทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็น Trihalomethane โครงสร้างกรดฮิวมิกอาจต่างกันได้แต่จะมีลักษณะสมบัติคล้ายกันเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันประกอบย่อยภายใน โมเลกุล เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่เอไมด์ (Amide) และฟีนอล (Phenolic) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงไม่กี่ร้อยไปจนถึงหมื่น สามารถจับตัวกันได้ตามธรรมชาติกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นไป ประจุเป็นลบอันเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันประกอบย่อย เมื่อมีค่าพีเอชสูงขึ้นเสถียรภาพโมเลกุลจะสูงขึ้น เนื่องจากการแยกกันของหมู่ฟังก์ชันประกอบย่อยและเป็นผลจากการที่มีประจุลบเพิ่มมากขึ้นในสารละลาย ในสารประกอบที่เป็นกรดหมู่ฟังก์ชันเอไมด์จะรับประจุบวกทำให้กรดฮิวมิกกลายเป็นประจุบวกแต่ในสารละลายที่เป็นกลางหรือเบสหมู่คาร์บอกซิลจะสูญเสียประจุบวกทำให้มีประจุเป็นลบ กรดฮิวมิกมีลักษณะที่สำคัญคือ จะไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยสารอินทรีย์

กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกที่เกิดจากการย่อยสลายพืชต่างๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดสีเทาที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ที่มีความคงตัวสูงการกำจัดออกจากน้ำไม่สามารถทำได้ โดยง่ายสีของน้ำจึงสัมพันธ์กับปริมาณสารฮิวมิกที่ละลายอยู่ในน้ำ (Wang, 1990) จากการศึกษาของ ราชนิธีระพิทยาตระกูล (2545) โดยสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำ 48 ตัวอย่าง จากจุดเก็บแม่น้ำลำตะคอง 24 จุด นำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หากรดฮิวมิก แล้วเติมคลอรีนความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์หา THMs หลังจากกำจัดคลอรีนที่เหลือก็พบความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณ THMs จากการทดสอบค่าทางสถิติได้สมการเชิงเส้น (Linear equation) $Y=8.633+7.083X$ (Y=ปริมาณไตรฮาโลมีเทน (THMs) หน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลิตร, X=ปริมาณกรดฮิวมิก หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร)



รูปที่ 1.7 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (Tinsley, 1979)

การกำจัดกรดฮิวมิกในน้ำ

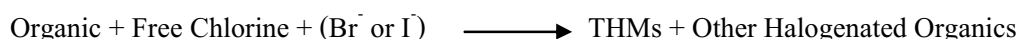
เนื่องจากกรดฮิวมิกในน้ำมีโทษตามที่ได้กล่าวมา จึงต้องกำจัดออกซึ่งมีหลายวิธีที่ใช้ในการกำจัดที่สำคัญ ได้แก่

1. การตกตะกอน (Coagulation) ด้วยโลหะหนักที่มีหลายวาเลนซ์ เช่น ไอออนเหล็ก อะลูมิเนียม อาจใช้สารเคมีเสริม (Coagulant aids) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาของสารแอกกูแลนต์เกิดเร็วขึ้นหรือสมบูรณ์ขึ้น เช่น พอลิเมอร์ หรือ พอลิอิเล็กโทรไลต์
2. การดูดซับ (Adsorption) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) อาจมีการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารส้มหรือปูนขาวแล้วตามด้วยการดูดซับ (Weber et al., 1983)
3. การกรองโดยตรงด้วยการใส่ Polyelectrolyte และการกรองด้วยทรายกรอง (Scheuch, 1981)
4. การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Yang et al., 2006)

1.2.5 สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane: THMs)

THMs เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของ Oxidation treatment กับสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติเกิดเป็นสารประกอบ Halogen มีคาร์บอน 1 ตัวเป็นองค์ประกอบ มีสูตรเคมีทั่วไปคือ CHX_3 ตำแหน่งของ X อาจแทนที่ด้วย ฟลูออรีน (F) คลอรีน (Cl) โบรมีน (Br) ไอโอดีน (I) หรือทุกตัวรวมกัน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด THMs มีหลายปัจจัย ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของ Bromide และ Iodide สภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ปริมาณและชนิดของคลอรีนที่ใช้ และ

คุณลักษณะและความเข้มข้นของสารตั้งต้น สารที่สำคัญในกลุ่มนี้ที่พบมากในน้ำประปามี 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (Chloroform; CHCl_3) โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane; CHCl_2Br) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane; CHClBr_2) และ โบรโมฟอร์ม (Bromoform; CHBr_3) ในน้ำดื่มส่วนใหญ่เกิดจาก ปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอรีนอิสระกับสารอินทรีย์ ในน้ำธรรมชาติ เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟัลวิค สามารถเขียนสมการแสดงปฏิกิริยาการเกิดไตรฮาโลมีเทนได้ ดังนี้



THMs เป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอโรฟอร์ม ซึ่งมีรายงานการทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง และสารที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลอโรฟอร์มจัดเป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพ ปกติมนุษย์จะได้รับคลอโรฟอร์มได้จาก อาหาร อากาศและน้ำ เมื่อได้รับเข้าไปในร่างกายจะดูดซึมคลอโรฟอร์มได้ดีบริเวณปากและช่องท้อง จะถูก Metabolize ไปเป็น CO_2 Chlorite ion และ Phosgene ซึ่ง Phosgene ที่เกิดขึ้นคือสารก่อมะเร็ง (Onodera, 1985)

ในการลด THMs ในน้ำประปาภายหลังการทำคลอรีนชัน อาจทำได้โดยการใช้ Activated carbon ในรูปเกล็ดหรือผงเพื่อการดูดซับหรือใช้สารฆ่าเชื้อชนิดอื่นๆ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ และ โอโซน เป็นต้น อีกทั้งสามารถให้การกรองได้อีกด้วย และจากการศึกษาของ วัฒนชัย เหมืองทอง (2536) พบว่า การกรองสัมผัสอากาศโดยใช้ถาดบรรจุถ่านไม้หลายชั้นซ้อนกันมีประสิทธิภาพในการลด THMs โดยเฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การกรองด้วย Granular activated carbon มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 92.02 เปอร์เซ็นต์ การลดสารตั้งต้นของ THMs โดยการสลายกรดฮิวมิกด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลด THMs ในน้ำได้ (เปียรรัตน์ สาระวงศ์, 2545)

1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Titanium dioxide (TiO_2) มีสมบัติทางเคมีที่ดีหลายอย่างเช่น มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เช่น จากสารจำพวกกรด ก๊าซคลอรีนหรือจำพวกเกลือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ด้วยสมบัติเหล่านี้ TiO_2 จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ มากมาย (Fujishima. et al., 2000) เช่น การนำ TiO_2 มาประยุกต์ใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อย่างการสังเคราะห์ TiO_2 กับ AgNO_3 ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำโดยวิธี Chemical reduction method เพื่อต้องการให้เป็น TiO_2/Ag แล้ว

นำมาทดลองยับยั้งหรือฆ่าแบคทีเรีย *E.coli* ผลคือ TiO_2 สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดีแต่ Ag/TiO_2 ก็สามารถยับยั้งได้ดีกว่าที่มี TiO_2 อย่างเดียวถึง 50 เปอร์เซ็นต์

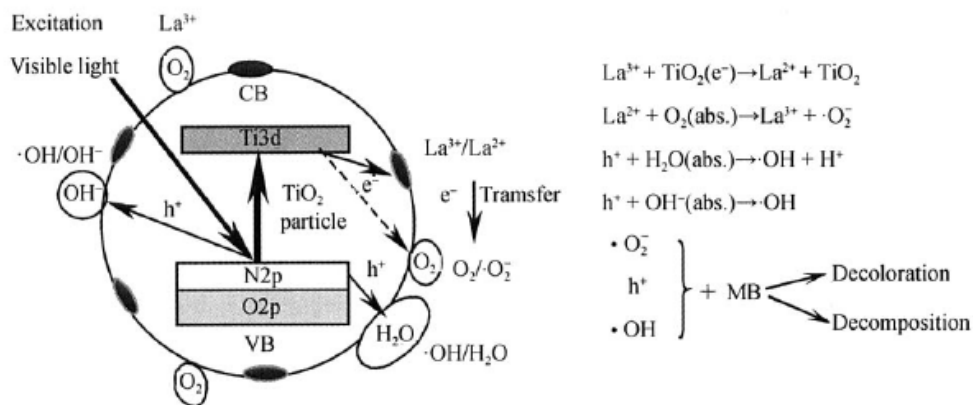
วิธีการเตรียมอนุภาคหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน เตรียมได้หลายวิธีได้แก่วิธี Hydrothermal, CVD (Chemical vapor deposition), PVD (Physical deposition), EPD (Electrophoresis deposition) และวิธีโซล-เจล การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล-เจล เป็นวิธีที่ง่ายและราคาไม่แพง ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ของไทเทเนียมไดออกไซด์โพรพอกไซด์ บิส (เพนเทนไดโอเนต) และ 1,3-โพรเพนไดออล โดยเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมเฟสและขนาดอนุภาคของสารสังเคราะห์ เพราะอุณหภูมิในการเผามีผลต่อโครงสร้างของผลึกและพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเฟสอะนาเทสเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงถึง 700 องศาเซลเซียส โครงสร้างของผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์เกือบทั้งหมด ส่วนการสังเคราะห์ ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนที่อุณหภูมิต่ำ (180-240 องศาเซลเซียส) ทำได้โดยการเติมสารละลายเพื่อลดแรงตึงผิวในกรณีที่ใช้ Titanium iso-propoxide เป็นการใส่สารตั้งต้นต่ออัตราส่วนน้ำหนักสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อัตราส่วนน้ำหนักดังนี้ คือ 15/100, 25/100 และ 35/100 ฟิล์มตกตะกอนโดยใช้วิธี Spray deposition สมบัติเป็นผลึกระดับนาโนและมีลักษณะพรุนหลังจากการทำอบผนึก การเตรียมอนุภาคระดับนาโนและฟิล์มสามารถใช้เป็น Gas sensing ใช้งานทางด้านชีววิทยาและ Photo-electrodes เพื่อทำ Dye-sensitized solar cell (Rao et al., 2007)

1.3.1 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

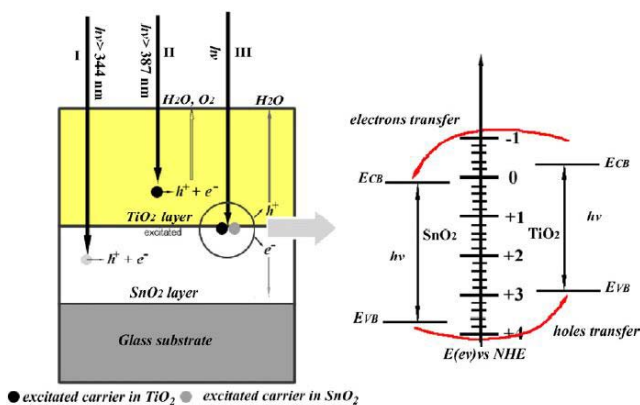
1) การโด๊ปด้วยโลหะหรือโลหะ การเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการโด๊ปด้วยโลหะและอโลหะเป็นวิธีที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของการโด๊ปโลหะและอโลหะได้มีการอธิบายไว้หลายๆ โมเดลด้วยกัน แตกต่างกันไปตามชนิดของตัวโด๊ป

Liu และคณะ (2007) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่โด๊ปด้วยไนโตรเจน (N) และแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน (La, N) พบว่า โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์โด๊ปแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน คือ เฟสอะนาเทส และเกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสกับรูไทล์เมื่อโด๊ปด้วยไนโตรเจนอย่างเดียว ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออก

ไซต์ได้ปด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยไนโตรเจนอย่างเดียว เนื่องจากขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนเล็กกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยไนโตรเจน การได้ปด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนมีกลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก แสดงดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO₂ โดยการได้ปด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน (Liu et al., 2007)



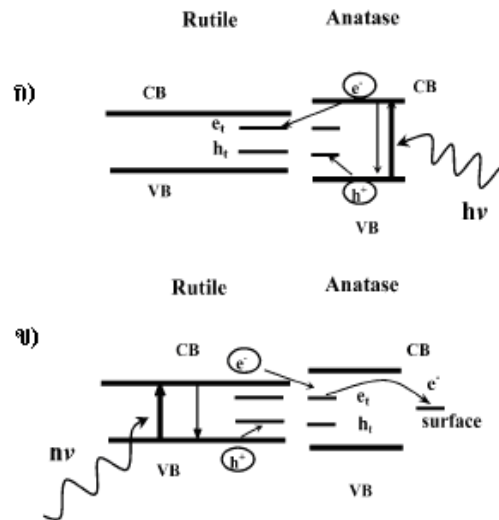
รูปที่ 1.9 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุในคอมพอสิตฟิล์ม SnO₂/TiO₂ (Hou et al., 2007)

Hou และคณะ (2007) อธิบายกลไกการได้ป SnO₂ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งแถบช่องว่างพลังงานของ SnO₂ เท่ากับ 3.80 อิเล็กตรอนโวลต์ และ TiO₂ (อะนาเทส) เท่ากับ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ (Sayilkan et al., 2007) กว้างกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นตำแหน่งแถบการนำของ SnO₂ มีค่าต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 1.9 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสงยูวีที่มากพอ อิเล็กตรอนจะหลุดจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบการนำสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำของ SnO₂ ซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าได้และจะถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของ

SnO_2 ทำให้ลดระยะเวลาในการกลับมารวมตัวของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกในไทเทเนียมไดออกไซด์ มีผลให้หลุมประจุบวกที่เกิดบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

2) การทำให้เกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์

การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง ก็คือ การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเฟสผสม ระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างอะนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 75:25 ซึ่งผลิตโดยวิธีไฮโดรไลซิส Tetra-isopropyl-orthotitanate ด้วยวิธีการทำให้ชิ้นงานแน่นขึ้น (Densification) ภายใต้ความดัน 1500-4000 กิโลปาสกาล (Zhao et al., 2007) จากเดิมเรารู้ว่าเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีที่สุด แต่จากการศึกษาและทดลองจากงานวิจัยหลายๆ งาน พบว่า เฟสผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้สูงเช่นกัน กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเฟสผสม อาจเกิดจากเมื่ออิเล็กตรอนของเฟสอะนาเทสถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นจนข้ามช่องว่างไปสู่แถบการนำไฟฟ้า แต่มีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้อีก แต่เมื่อมีเฟสรูไทล์อยู่ด้วย รูไทล์จะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) (Hurum et al., 2003) สามารถป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้เร็ว ซึ่งกลไกแสดงดังรูปที่ 1.10ก หรืออาจพิจารณากลับกันตามรูปที่ 1.10ข โดยเมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์จะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทส (3.20 อิเล็กตรอน โวลต์) แต่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำไฟฟ้าแล้วกลับมารวมกับหลุมประจุบวกในแถบเวเลนซ์ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีเฟสอะนาเทสผสมอยู่ด้วย อะนาเทสจะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้และในที่สุดอิเล็กตรอนปรากฏผิวทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้

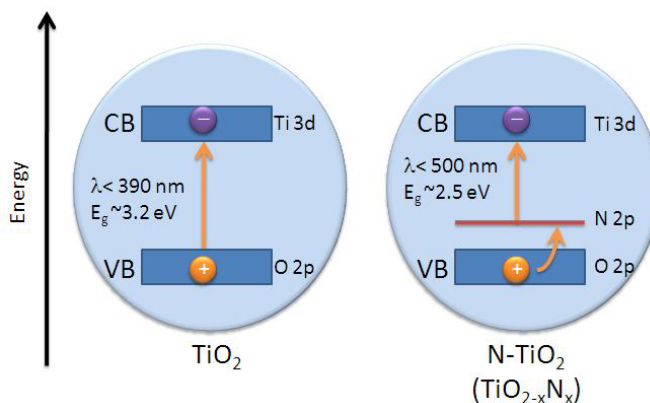


รูปที่ 1.10 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทส และรูไทล์ (ก)

แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ Hurum และคณะ (2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์

3) การลดช่องว่างของแถบพลังงาน

การใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องการแสงยูวีในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่น่าสนใจคือแสงในช่วง Visible light เพราะสามารถใช้ในร่มหรือแสงอาทิตย์ในที่แจ้ง จึงเริ่มมีการศึกษาเรื่องนี้ในปี 2001 โดยนักเคมีชื่อ Asahi เขาได้ทำการศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วยไนโตรเจน ผลทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับแสงยูวี และ Visible light ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 390-500 นาโนเมตร การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเติมไนโตรเจนลงไป ได้อธิบายโดย Nakoto (2004) และ Trie (2003) การเติมไนโตรเจนทำให้แถบช่องว่างพลังงานแคบลงเนื่องจากในชั้นออบิทัลของ 2p-N มีช่องว่างที่น้อยกว่าออบิทัลของ 2p-O ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดจาก 2p-O ไปยัง 2p-N และกระโดดต่อไปยัง 3d Ti ทำให้สามารถลดพลังงานในการกระตุ้นได้ โดยแสดงดังรูปที่ 1.11 Michael, (2009) มีการศึกษาการโด๊ปไนโตรเจนของ Jiaqing และคณะ (2009) โดยวิธี Hydrothermal แหล่งไนโตรเจน คือ Guanine carbonate ได้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่น 350-500 นาโนเมตร มีการทดสอบปฏิกิริยาภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ พบว่า ที่ 7 ชั่วโมง สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ 95.1 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแหล่งไนโตรเจน ที่ต่างกันของ Geng และคณะ (2000) โดยใช้แหล่งไนโตรเจน จาก Triethylamine, Ethyl amine, Ammonium hydroxide พบว่า การใช้ Triethylamine ได้ผลปฏิกิริยาดีที่สุดภายใต้ Visible light โดยสามารถลดช่องว่างของแถบพลังงานจาก 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ เหลือ 2.91 อิเล็กตรอนโวลต์



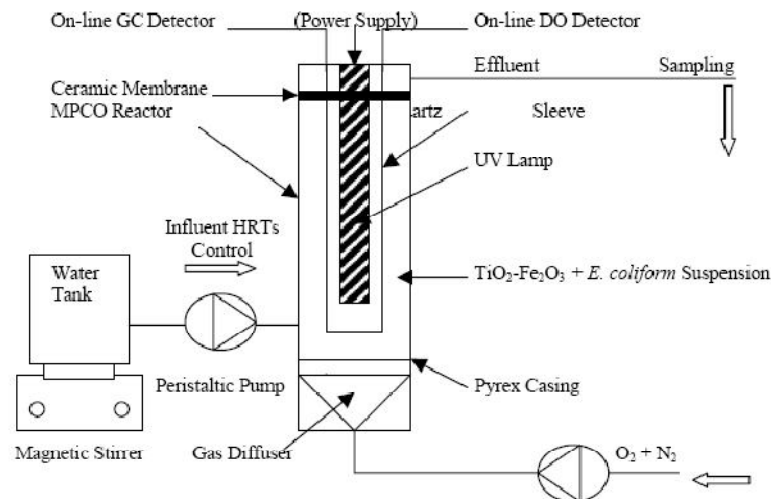
รูปที่ 1.11 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วยไนโตรเจน
(ที่มา: <http://photochemistryportal.net/home/index.php/2009/09/30/metal-oxide-photocatalysis:17/01/2554>)

1.3.2 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านการบำบัดน้ำ

การนำเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ อาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปี หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตแคตะไลซิส เริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้อิเล็กตรอนที่หลุดไปและหลุมประจุบวก (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน และมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกันหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่หลุมประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO_2) และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่นๆ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ หลังจากปฏิกิริยาผ่านไปหลายขั้นตอน ในอีกทางหนึ่งอิเล็กตรอนสามารถลดปริมาณโลหะบางชนิดที่ละลายอยู่ด้วยได้

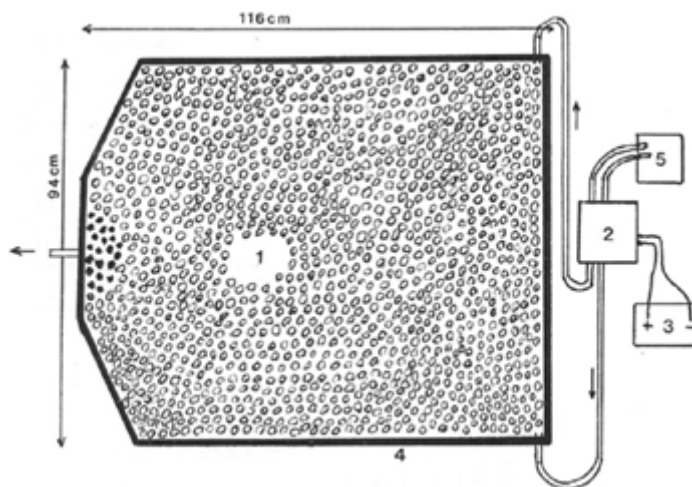
การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่ นำ *E.coli* มาทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติก เพราะ *E.coli* เป็นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุการระบาดของโรคอาหารเป็นพิษในหลายประเทศทั่วโลก ผู้ติดเชื้อจะมีอาการท้องเสีย ในช่วงแรกๆ ของการศึกษา ไม่มีการโด๊ปสารใดๆ ลงไปทำให้ประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกไม่ค่อยดี San และคณะ (2003) ได้ศึกษาการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย Fe^{3+} โดยเติมลงไปลงในน้ำโดยตรงและเพิ่ม O_2 และ N_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ

ปฏิกิริยา การศึกษา พบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 30 นาที ในเริ่มต้น ใช้ *E. coli* 10^8 โคโลนีต่อมิลลิเมตร ใช้หลอดยูวีขนาด 11 วัตต์ ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร โดยมี ชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 ชุดทดสอบของ Delai san (Delai san et al., 2003)

Paleologou และคณะ (2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่มีเฟสของอะนาเทส:รูไทล์ 75:25 ขนาดอนุภาค 21 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50 ตารางเมตรต่อกรัม ร่วมกับหลอดยูวีขนาด 9 วัตต์ กับการใช้คลอรีน รังสียูวี-C ขนาด 11 วัตต์ และ Ultrasound irradiation พบว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ร่วมกับหลอดยูวีขนาด 9 วัตต์ ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ดีที่สุด ใช้เวลา 20 นาที สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ 75 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับหลอดไฟยูวีในการฆ่าเชื้อ *E. coli* ก็ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากหลอดไฟ จึงมีแนวคิดในการใช้แสงจากดวงอาทิตย์ในการศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกเพื่อลดการใช้พลังงาน Subrahmanyam และคณะ (2008) ก็ได้ศึกษาการใช้แสงจากดวงอาทิตย์แทนหลอดยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อฆ่าเชื้อ *E. coli* ในน้ำ โดยเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนหินภูเขาไฟ เตรียมโดยนำหินภูเขาไฟจุ่มแช่ในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 แล้วนำไปอบด้วยความร้อน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 30 wt% ใช้เวลา 4 ชั่วโมง สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 1.13

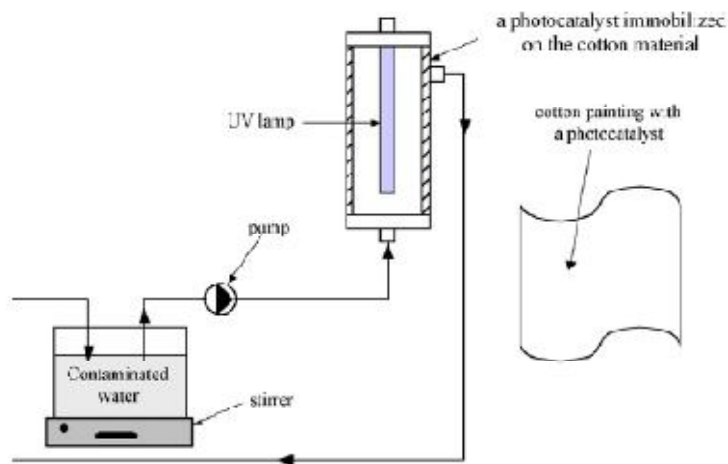


รูปที่ 1.13 ชุดทดสอบที่ใช้หินภูเขาไฟเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Subrahmanyum et al., 2008)

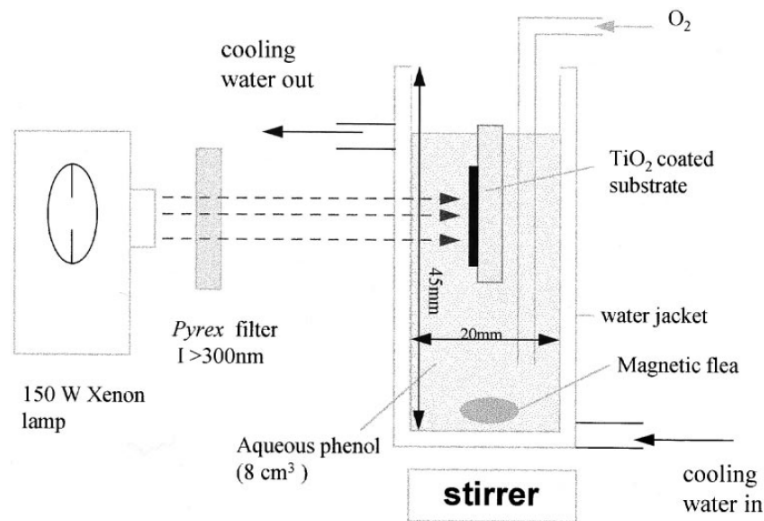
นอกจาก *E.coli* แล้วยังมีการศึกษาในเชื้อโรคชนิดอื่นๆ อีก เช่น Lonnen et al., (2005) ได้ทำการศึกษาเชื้อโรคหลายชนิด เช่น Bacterial, Fungal และ Protozoan ชนิดต่างๆ โดยใช้วิธี SPC-DIS coating ผลการทดลอง พบว่า การใช้แสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ดีกว่าการใช้แสงอาทิตย์อย่างเดียวถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงจากอาทิตย์ และการใช้แสงอาทิตย์อย่างเดียวจะให้ประสิทธิภาพต่ำในการสลายพวก Protozoa

ในการบำบัดน้ำเสียเราสามารถใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ละลายลงในน้ำได้เลย แต่ในการบำบัดน้ำดื่ม ควรเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุต่างๆ เพื่อไม่ให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือปนอยู่ในน้ำ จึงมีการศึกษาโดยการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนวัสดุต่างๆ เช่น พอลิเมอร์ โลหะ แก้ว และเส้นใยแก้ว เป็นต้น ในการสลายสารอินทรีย์และเชื้อโรคชนิดต่างๆ แบบต่อเนื่องหลายๆ รอบเพื่อลดเวลาและเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา Zhang และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษา โดยนำ PVA fiber เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเตรียมสารละลายด้วยวิธีโซล-เจล ผลการทดลอง พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยึดเกาะพอลิเมอร์ได้ดี โดยทดลองหลายๆ ครั้ง หลังจากครั้งที่ 7 เป็นต้นไปประสิทธิภาพยังอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยทดสอบกับเมทิลลินบลูนอกจากนี้ Tryba และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ Cotton material เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ST-01 แล้วได้ปัดด้วย Fe โดยใส่สารประกอบ FeC_2O_4 ในอัตราส่วน $TiO_2:FeC_2O_4$ 10:1 เมาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบโดยนำไปสลายฟีนอล ในน้ำโดยมีชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1.14 ส่วน Byrne และคณะ (1998) ก็ทำการศึกษาการ

สลายฟีนอล ในน้ำเช่นกัน แต่ใช้ TiO_2 เคลือบลงบน Stainless steel 304, Ti-4V-6Al, titanium foil และเคลือบลงบนแก้ว โดยวิธี Electrophoretic coating และ spray coating พบว่า วิธี Electrophoretic coating จะได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า แต่จะเกิดรอยแตกบนชิ้นงานชุดทดสอบนี้แสดงดังรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.14 ชุดทดสอบโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบน Cotton material (Tryba et al., 2008)

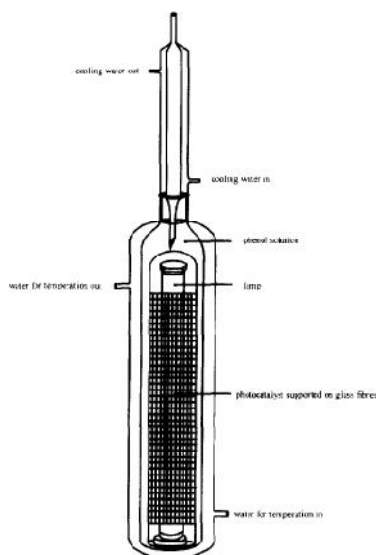


รูปที่ 1.15 ชุดทดสอบของ Byrne (Byrne et al., 1998)

การใช้พอลิเมอร์มีจุดด้อย คือ ไม่สามารถเผาที่อุณหภูมิสูงได้ จึงมีการศึกษาโดยการใช้เส้นใยแก้ว ซึ่งเส้นใยแก้วสามารถเผาที่ได้อุณหภูมิสูง Kuo และคณะ (2007) ทำศึกษาโดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาเคลือบลงบนเส้นใยแก้วเพื่อแยกก๊าซ CO ออกจากอากาศ โดยเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของ โซล-เจล โดยเพิ่ม Nano-gold ลงไปด้วยแล้วเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส พบว่า สามารถสลาย CO ไปเป็น CO_2 หมดภายในเวลา 15 นาที นอกจากนี้ Yu และ

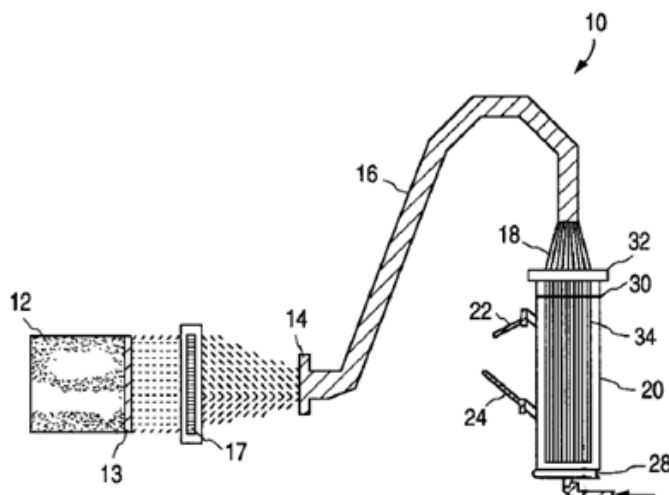
คณะ (2006) ก็ได้ศึกษาประสิทธิภาพไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว เพื่อสลาย NO ให้เป็น NO₂ โดยนำเส้นใยแก้วจุ่มในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้ประสิทธิภาพในการสลาย NO ดีกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้มีการนำเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปโซล-เจล ด้วยวิธีจุ่มเคลือบเพื่อสลายสารต่างๆ เช่น Blazkova และคณะ (1998) ได้ศึกษาการย่อยสลายฟีนอล ด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย แพลทินัม โดยมีชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1.16 Piscopo และคณะ (2000) Benzamide Chungsiriporn และคณะ (2008) และ San และคณะ (2003) โทลูอิน (Toluene) เป็นต้น

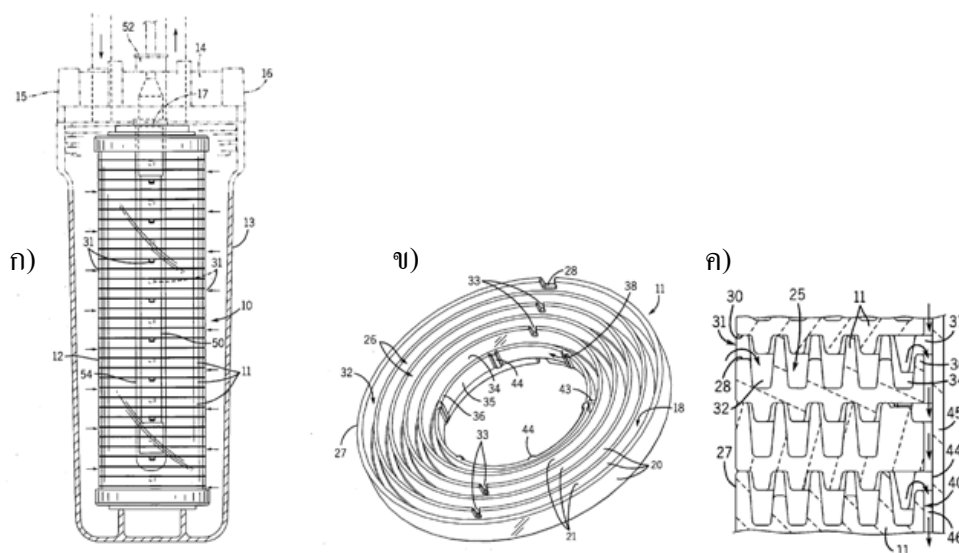


รูปที่ 1.16 ชุดทดสอบของ Blazkova (Blazkova et al., 1998)

ข้อมูลเกี่ยวกับการจดสิทธิบัตรของชุดทดสอบในการบำบัดน้ำของ Peill และคณะ (2009) ได้ออกแบบชุดทดสอบโดยใช้แก้วควอตซ์ ที่บรรจุใยแก้วนำแสงไว้ภายในแก้วควอตซ์และเส้นใยแก้วเคลือบด้วยสารละลายที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ P-25 ส่วนแก้วควอตซ์นำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 500 องศาเซลเซียส ทดสอบด้วยสาร 4-chlorophenol แสดงชุดทดสอบดังรูปที่ 1.17 ส่วนชุดทดสอบของ Hatch และคณะ (2006) ในชุดทดสอบประกอบด้วยจานไทเทเนียมที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 1.18 แสดงภาพจากด้านบน (ข) ภาพจากด้านข้าง (ค) มีหลอดยวี่อยู่ตรงกลางของชุดทดสอบ โดยให้น้ำไหลจากจานบนลงมาถึงจานล่างแสดงดังรูปที่ 1.18ค



รูปที่ 1.17 ชุดทดสอบของ Peill (Peill et al., 2009)



รูปที่ 1.18 ชุดทดสอบของ Hatch (Hatch et al., 2006)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการย่อยสลายกรดฮิวมิกในน้ำโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P-25 ในการย่อยสลายกรดฮิวมิกในน้ำควบคู่กับสารตัวอื่น (Yang et al., 2006) ในการศึกษาได้ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P-25 ควบคู่กับ Cr(VI) จากผลการศึกษา พบว่า การย่อยสลายกรดฮิวมิกได้ดีที่สุดเมื่อเป็นระบบสองสารมากกว่าระบบเดี่ยว ปริมาณผงที่มากขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดฮิวมิก นอกจากนี้มีการทดสอบโดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้น 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถย่อยสลายกรดฮิวมิกได้ดีที่สุด Li และคณะ (2002) ทำการศึกษาในทำนองเดียวกันแต่ใช้ระบบสารที่มีการเติมไอออนของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดฮิวมิก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผงไทเทเนียมไดออกไซด์

P-25 1 กรัมต่อลิตร โดยควบคุมพีเอช 3, 5, 7 และ 9 พบว่า ที่พีเอชต่ำๆ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีที่สุดในเวลา 2.5 ชั่วโมง เมื่อมีการควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะดีกว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ และในระบบที่มีไอออนของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะดีกว่าระบบที่มีกรดฮิวมิกอย่างเดียว ต่อมามีการศึกษาระบบที่มีกรดฮิวมิกและ As(III) (Emmanuel et al., 2009) ในระบบนี้ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P-25 ปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร As(III) 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อมามีการศึกษาโดยสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล-เจล เคลือบบนถ่านกัมมันต์ โดยปกติถ่านกัมมันต์สามารถย่อยสลายสารฮิวมิกได้อยู่แล้ว ในการทดลอง พบว่า สามารถย่อยสลายกรดฮิวมิกได้ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีขึ้นด้วย โดยใช้อุณหภูมิเผา 300, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชในการทดลอง พบว่า ที่พีเอชต่ำๆ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะสูงกว่าที่พีเอชสูงๆ ในการทดลองควบคุมพีเอชที่ 4.2, 7.3, 9.1 และ 11.0 (Xue et al., 2010)

งานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปด้วย Fe^{3+} , N, SiO_2 และ SnO_2 ด้วยวิธี โซล-เจล แล้วเคลือบบนเส้นใยแก้วด้วยวิธีจุ่มเคลือบและศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโดยการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้วด้วยวิธีจุ่มเคลือบ
2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมสารเคลือบบนเส้นใยแก้ว
3. เพื่อศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำดื่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เทคนิคในการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเคลือบบนเส้นใยแก้วโดยวิธี โซล-เจล และจุ่มเคลือบ แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำดื่ม

2. ทำให้ทราบถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมสารเคลือบบนเส้นใยแก้ว
3. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำดื่ม
4. สามารถออกแบบต้นแบบเครื่องทำความสะอาดน้ำดื่มให้บริสุทธิ์

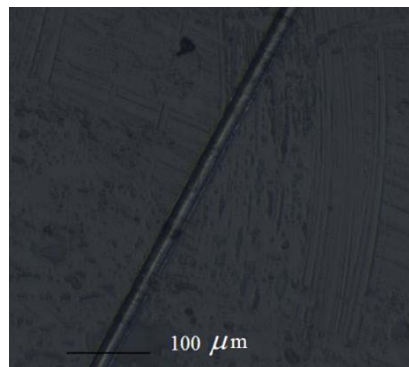
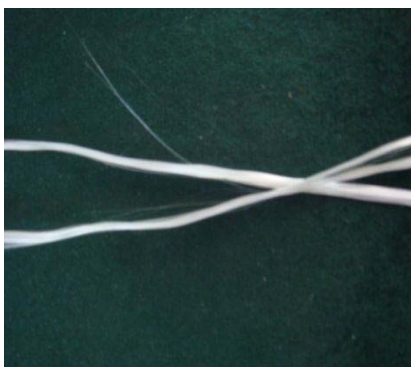
บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 สังเคราะห์และเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารโด๊ปด้วยวิธีการ โซล-เจล นำโซลที่ได้จากการสังเคราะห์เคลือบลงบนเส้นใยแก้วด้วยวิธีจุ่มเคลือบ ภาพเส้นใยแก้วแสดงดังรูปที่ 2.1 หลังจากนั้นนำเส้นใยแก้วที่เคลือบแล้วเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส นำเส้นใยแก้วที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค XRD, SEM และ EDS ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยนำเส้นใยแก้วที่ได้ไปทดสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูภายใต้รังสียูวี ตรวจสอบการย่อยสลายสีโดยการวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย UV-Visible Spectrometer และนำเส้นใยแก้วที่เคลือบไปทดสอบปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ

การสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของฟิล์มเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผา ปริมาณของสารโด๊ป Fe^{3+} และชนิดของสารโด๊ป เพื่อปรับปรุงให้ได้สมบัติโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีขึ้น โฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบอยู่บนเส้นใยแก้ว แล้วนำฟิล์มที่เคลือบแล้วไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายของเส้นใยแก้วชนิด E-glass

2.2 กระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

ก) การเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (T) ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) (99.95% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้น ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) จนครบ 30 นาที กวนที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง นำโซลที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สักส่วนโดยโมลของ TTIP:C₂H₅OH เท่ากับ 1:82 อัตราส่วนโดยโมล (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ นำโซลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาภายใต้ภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิค่า LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.2

ข) การเตรียมสารเคลือบ TiO₂/5SiO₂ (TSi) ใช้ TTIP ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก จนครบ 30 นาที กวนที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง นำโซลที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สักส่วนของ TTIP:C₂H₅OH เท่ากับ 1:82 อัตราส่วนโดยโมล (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบ TiO₂/5SiO₂ ในกรณีนี้ใช้ปริมาณของ TEOS 5 mol% นำโซลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาภายใต้ภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิค่า LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผง TiO₂/5SiO₂ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.3

ค) การเตรียมสารเคลือบ TiO₂/3SnO₂/Fe³⁺ (TSnFe) ใช้ TTIP ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร หลังจากนั้นได้ 3 mol% ของ Tin (IV) chloride pentahydrate (SnCl₄.5H₂O) (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) และ Ferric chloride anhydrous (FeCl₃.6H₂O) กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) จนครบ 30 นาที กวนที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง นำโซล

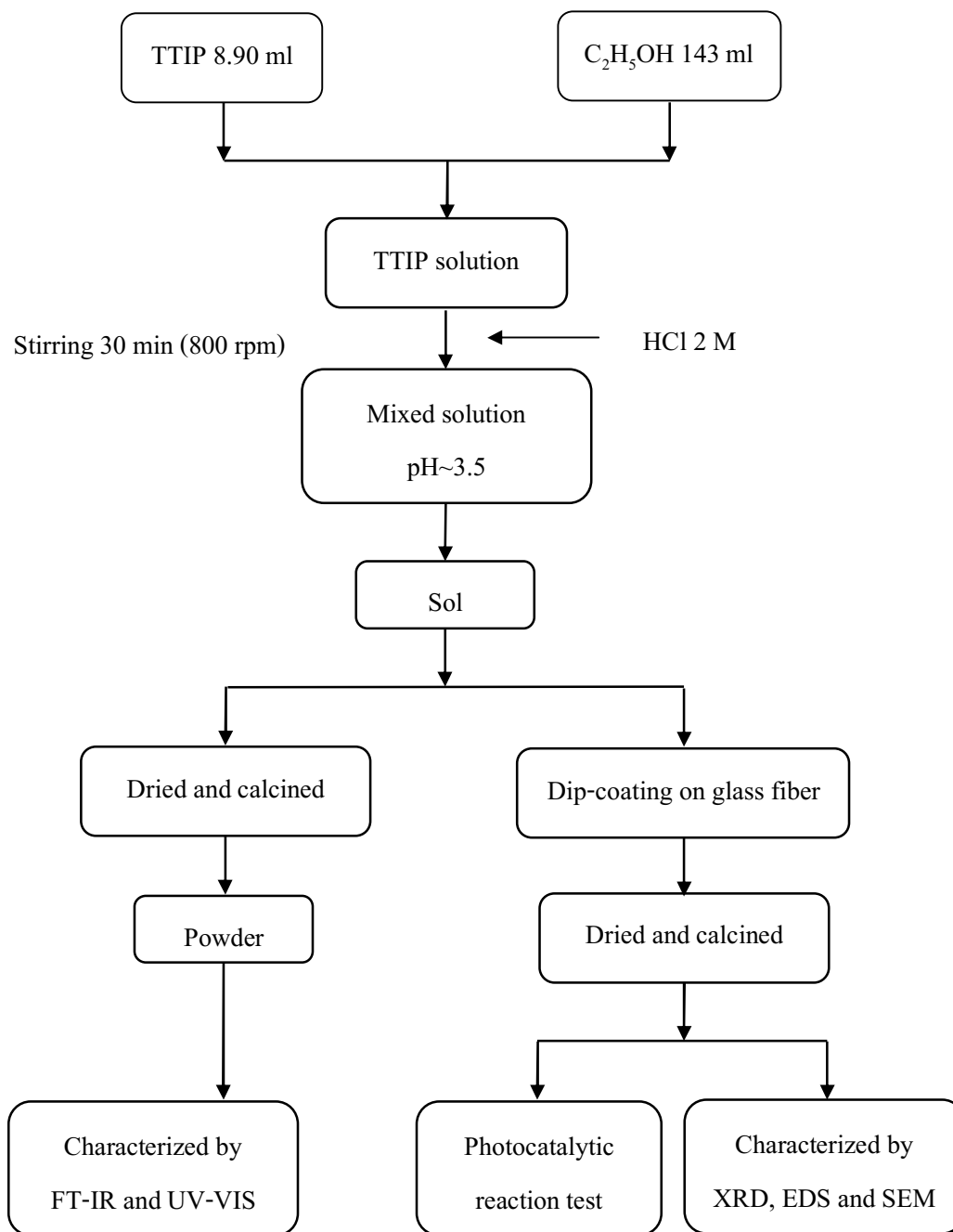
ที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สัดส่วนของ TTIP:C₂H₅OH เท่ากับ 1:82 อัตราส่วนโดยโมล (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบ TiO₂/3SnO₂/Fe³⁺ ในกรณีนี้ทำการแปรผันปริมาณของ Iron (III) Chloride (0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 mol%) นำโซลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิต่ำ LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผง TiO₂/3SnO₂/Fe³⁺ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.4

ง) การสังเคราะห์สารเคลือบ TiO₂/3SnO₂/20N (TSnN) เติมแอมโมเนียมคาร์บอเนต (NH₄)₂(CO₃) 20 mol% ลงในกรดแอซติก Glacial acetic (CH₃COOH) 10 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาทีจนแอมโมเนียมคาร์บอเนตละลายหมดใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ละลายในเอทานอล หลังจากนั้นเติม 3 mol% Tin (IV) chloride pentahydrate (SnCl₄.5H₂O) (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) กรณีไม่เติม Tin (IV) chloride pentahydrate (TN) ไม่เติม (NH₄)₂(CO₃) (TSn) กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายต่อด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก จนครบ 30 นาที กวนที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง นำโซลที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สัดส่วนของ TTIP:C₂H₅OH เท่ากับ 1:82 อัตราส่วนโดยโมล (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบ TiO₂/3SnO₂/20N นำโซลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิต่ำ LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผง TiO₂/3SnO₂/20N ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.5

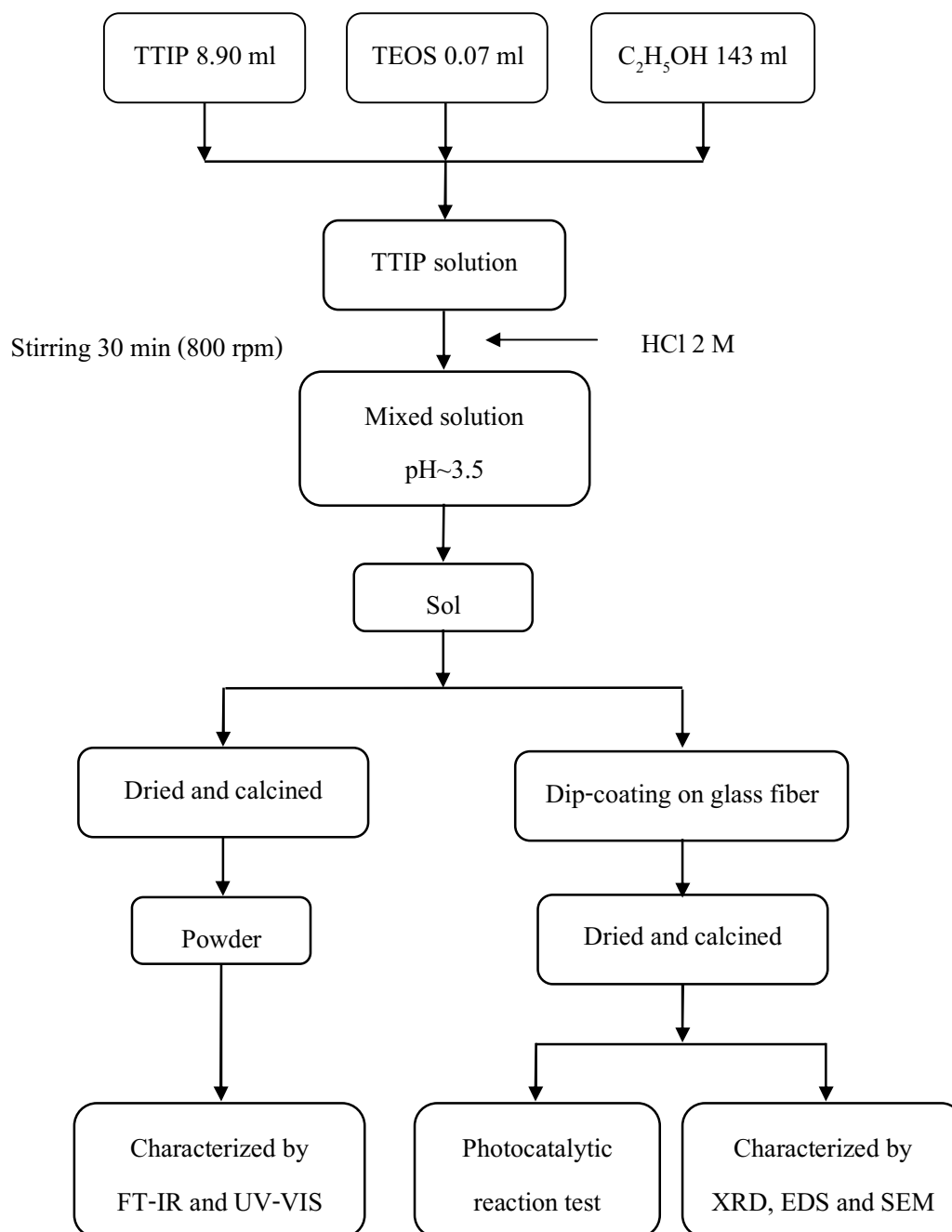
2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

สารเคลือบที่อยู่ในภาวะโซลหลังจากสังเคราะห์เสร็จแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในการเคลือบใช้วิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass เป็นวัสดุฐาน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 ไมโครเมตร ก่อนการเคลือบทำความสะอาดเส้นใยแก้วโดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคราบไขมันที่ผิวของเส้นใย หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น รอกจนแห้ง แล้วทำการเคลือบเส้นใยแก้วด้วยสารเคลือบที่เตรียมไว้ โดยในชั้นแรกเคลือบด้วยสูตร TiO₂/5SiO₂ เพื่อช่วยการยึดเกาะของชั้นฟิล์มที่ต้องการ ยกเว้นสูตร TiO₂ ที่เคลือบด้วยสารเคลือบชนิดเดียวกันทั้งสองชั้น ต่อมาเคลือบเส้นใยแก้วอีกครั้งด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ ที่ต้องการ การเคลือบฟิล์มในชั้นที่สองไม่ควรรอให้ฟิล์มในชั้นแรกแห้ง

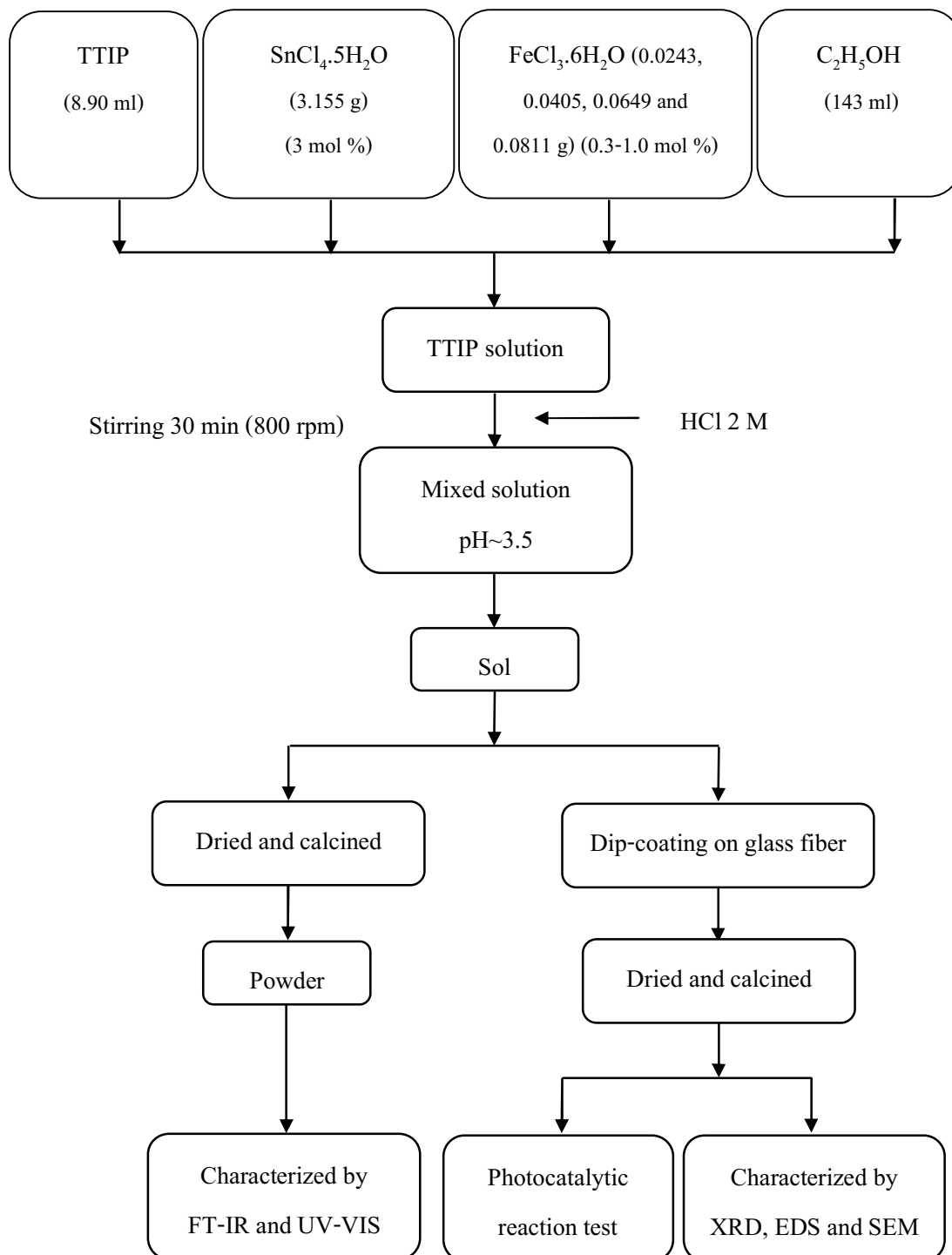
มากจนเกินไปเพราะจะทำให้ฟิล์มมีการแยกชั้นกัน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยแก้วไปล้างในน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดส่วนเกินที่ติดอยู่ที่ผิวให้หลุดออกไป แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



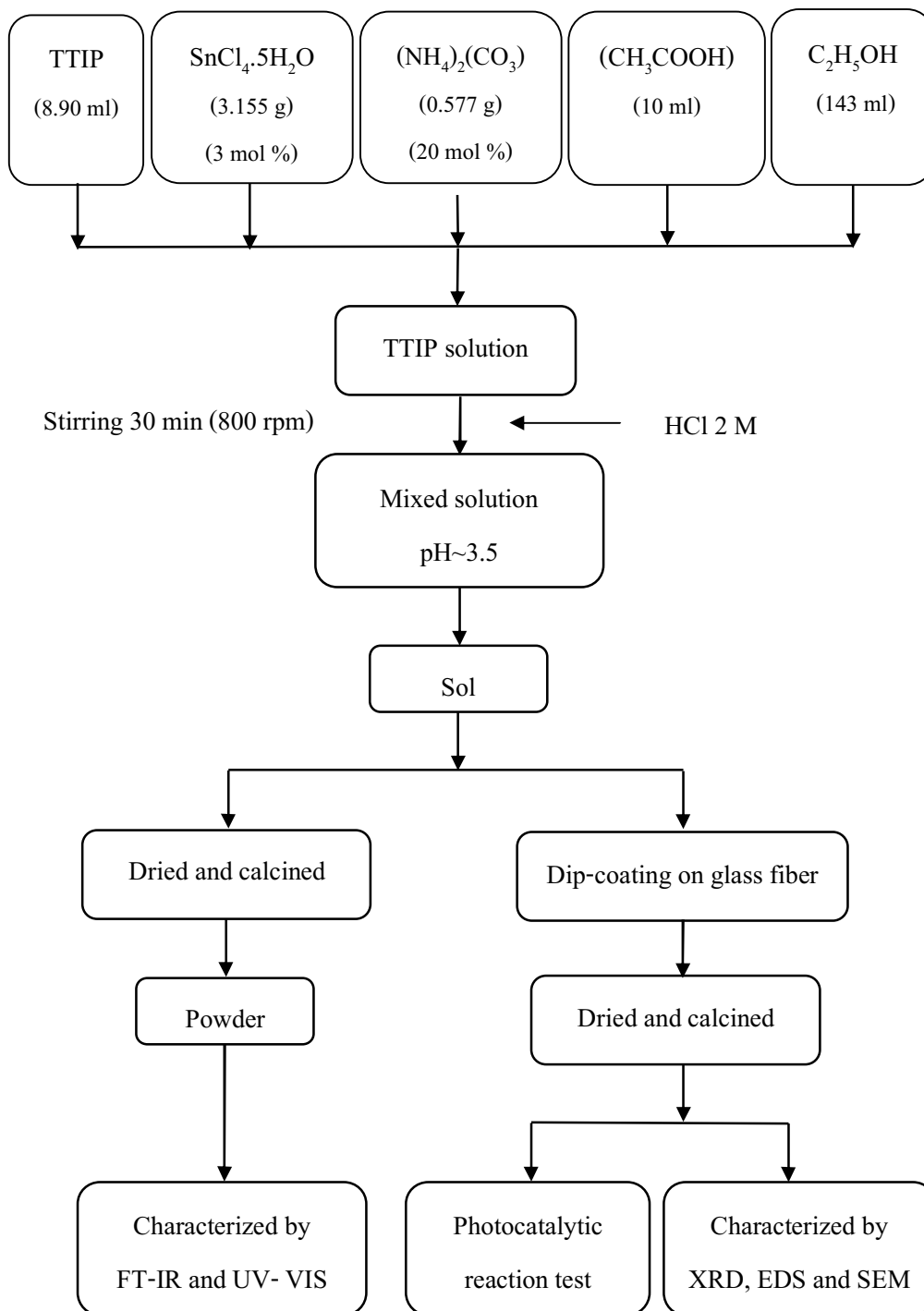
รูปที่ 2.2 การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO₂ ด้วยวิธีโซล-เจล



รูปที่ 2.3 การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล



รูปที่ 2.4 การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ ด้วยวิธีโซล-เจล

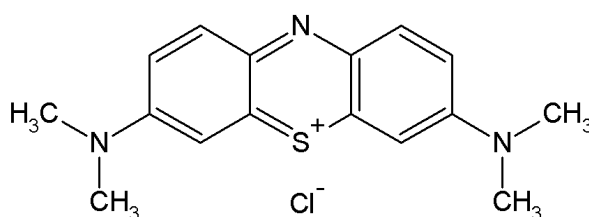


รูปที่ 2.5 การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ด้วยวิธีโซล-เจล

2.4 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

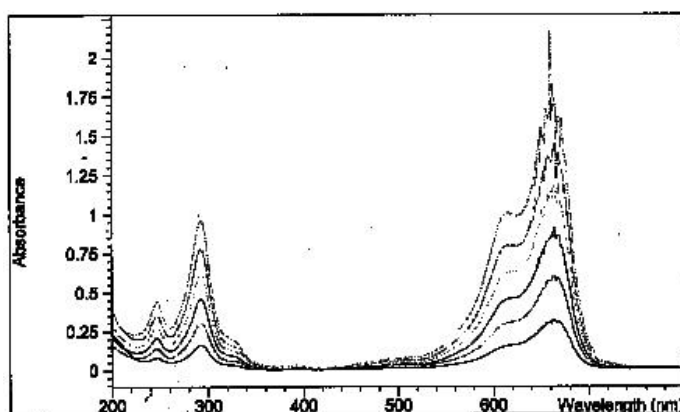
ก) การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐาน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการนำไปวิเคราะห์ผลโดยเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีโครงสร้างตาม รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นอยู่ในช่วง $0.2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-5}$ โมลาร์ วัดการดูดกลืนแสงโดย Ultraviolet-visible spectrophotometry ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ในการวัด Absorbance ของเมทิลีนบลู แสดงดัง รูปที่ 2.7



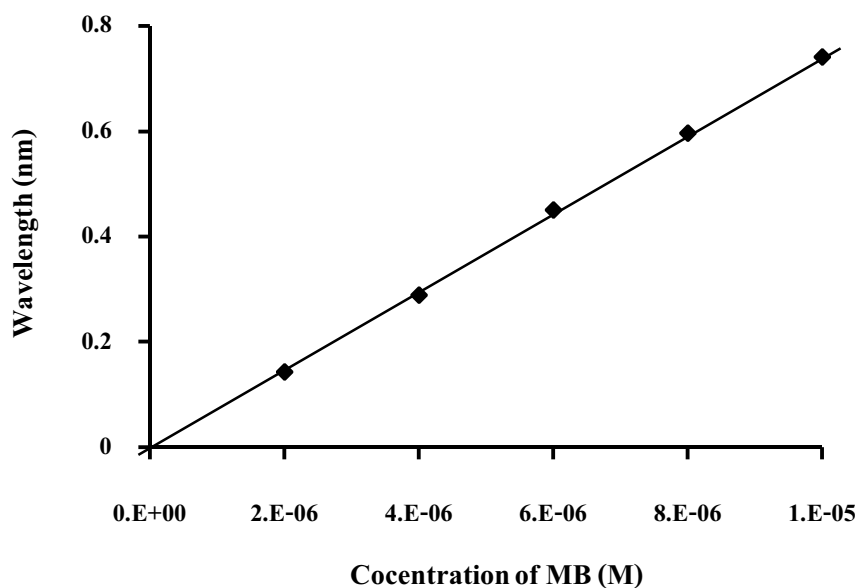
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเมทิลีนบลู

(ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Methylene_Blue.gif: 14/04/2553)



รูปที่ 2.7 Spectrum การดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น $0.5 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-5}$ โมลาร์

กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูในช่วง $0.5 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-5}$ โมลาร์ แสดงดัง รูปที่ 2.8 ซึ่งเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นกับค่า Absorbance มีค่าความถูกต้องของกราฟ $R^2 = 0.9994$ เพื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวีที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู $0.2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-5}$ โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

ข) ปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติก ในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูอยู่ในรูปของเส้นใยแก้วที่ผ่านการเคลือบมาแล้ว ในการทดสอบใช้เส้นใยที่เคลือบ 1 กรัม ต่อ สารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ 50 มิลลิลิตร นำเส้นใยแก้วที่เคลือบและ สารละลายเมทิลีนบลูใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีขนาด 50 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 โดยความยาวคลื่นในย่านยูวี (310-400 นาโนเมตร) เป็น เวลา 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer แล้วบันทึกผล เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เมื่อ เวลาเพิ่มขึ้น การทดลองภาวะละ 3 ตัวอย่าง

การคำนวณหา %Degradation ของเมทิลีนบลูโดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.1)

$$\% \text{Degradation} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \% \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์

C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)

2.5. กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli*

จากการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู จึงนำสูตรสารเคลือบ TiO_2 , $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ มาทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli*

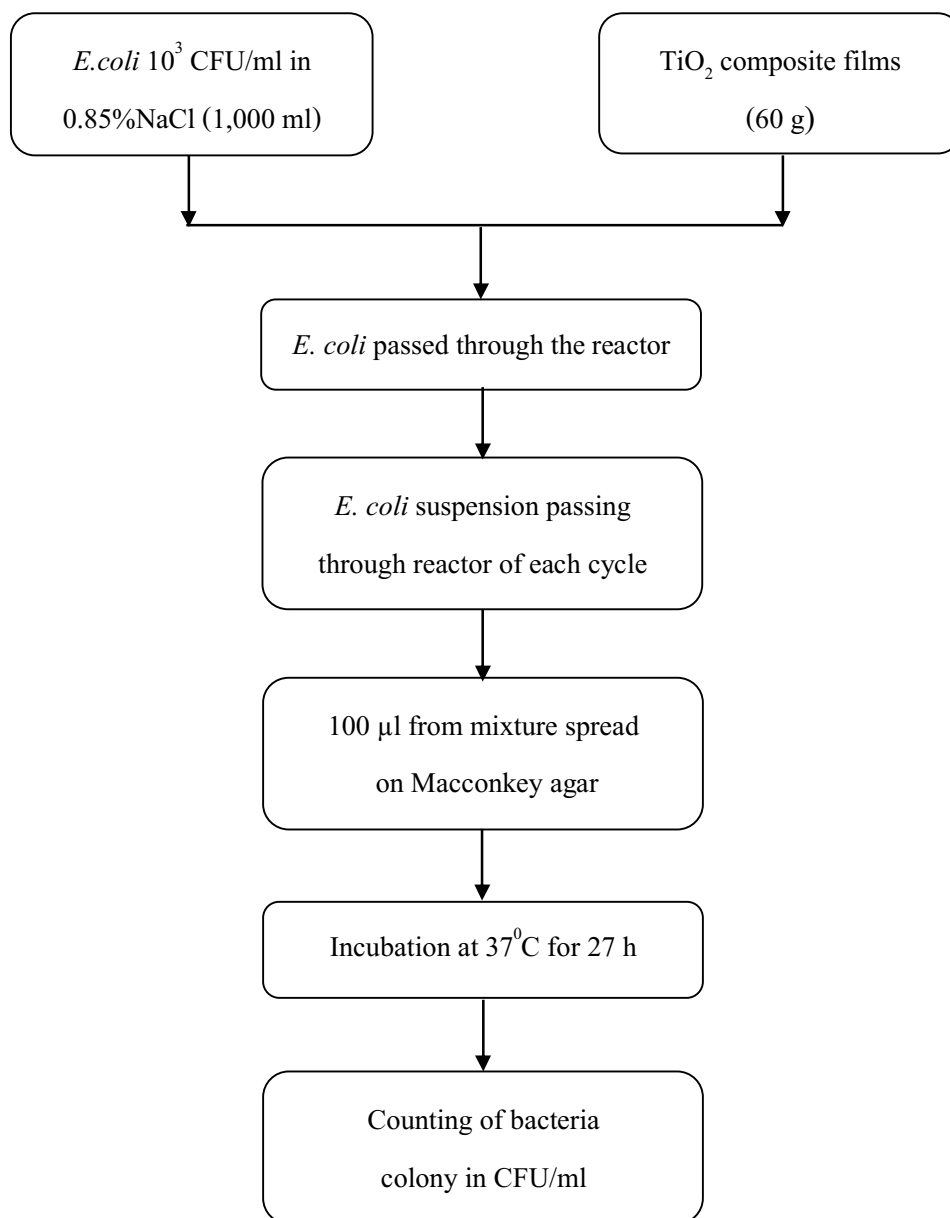
เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบคือ *E.coli* เริ่มต้นนำเชื้อ (ได้การอนุเคราะห์จากภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์) ใส่ลงในหลอดที่มีอาหารเหลว (trypticase soy broth) แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมเชื้อแบคทีเรียลงใน 0.85% NaCl (9 มิลลิลิตร) โดยใช้วิธี Serial dilution method แล้วนำ 0.1 มิลลิลิตร ไปหยดบนอาหารแข็ง Macconkey โดยใช้เทคนิค Spread plate เจือจางจำนวนเชื้อให้อยู่ในช่วง 30–300 หลังจากที่เรา รู้ความเข้มข้นเชื้อตั้งต้นแล้ว นำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร โดยมีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร นำน้ำที่มีเชื้อ *E.coli* ที่มีความเข้มข้นเชื่อดังกล่าวไปผ่านชุดปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยใช้แสงยูวีขนาด 60 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 โดยความยาวคลื่นย่านยูวี (310-400 นาโนเมตร) ข้างในหลอดบรรจุเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ 60 กรัม หลังจากน้ำผ่านชุดปฏิกรณ์แต่ละรอบ (1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ) ก็ดูดเชื้อที่ผ่านการรับแสง 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.9 หลังจากนั้นทำการบันทึกผลโดยการถ่ายรูปและนับจำนวนเชื้อที่เหลือ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โดยมีการควบคุมปริมาณของเส้นใยที่บรรจุในหลอดทดสอบ (30, 60 และ 90 กรัม) กำลังของแสงยูวีที่ใช้ (20, 40 และ 60 วัตต์) อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชุดปฏิกรณ์ โดยควบคุมการไหลโดยปรับวาล์ว เปิด-ปิด ให้มีอัตราไหล 3 ระดับและทดสอบกับแสงฟลูออเรสเซนต์

การคำนวณหา % Disinfection ของ *E.coli* โดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.2)

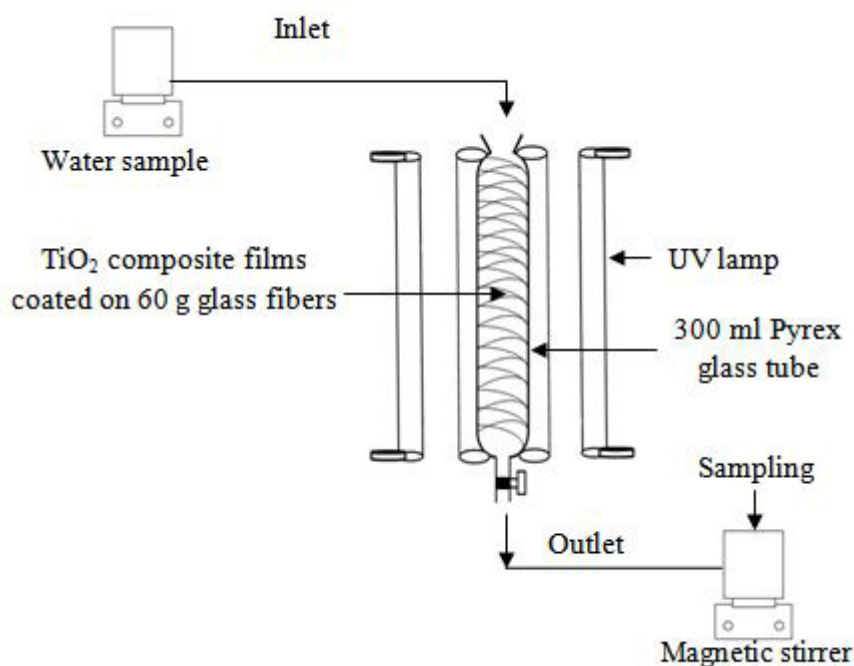
$$\% \text{Disinfection of } E.coli = \frac{N}{N_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร

N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบ โคโลนีต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli*



รูปที่ 2.10 ชุดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

2.6 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

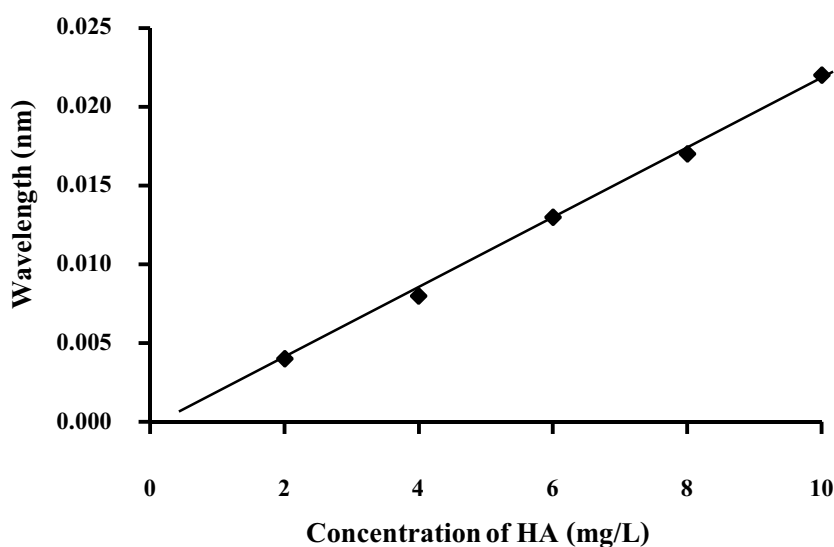
จากการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู นำสูตรสารเคลือบ TiO₂, TiO₂/3SnO₂/0.3Fe³⁺ และ TiO₂/3SnO₂/20N มาทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิก

การวิเคราะห์หากรดฮิวมิก (Humic acid)

1. เตรียมสารละลายกรดฮิวมิก (Fluka 99%) ผงสีน้ำตาลความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น (ใช้กรดฮิวมิก ของ Fluka Chemie AG CH-9471 Switzerland Fluka 53680 ขนาด 10 กรัม) ในการเตรียมสาร นำผงกรดฮิวมิกที่ชั่งแล้วมาวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง นำสารที่ติดอยู่ที่กระดาษกรองไปอบในตู้อบ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที คำนวณปริมาณของกรดฮิวมิกที่สามารถละลายน้ำได้จากปริมาณสารเริ่มต้นลบด้วยปริมาณสารที่ตกค้าง

2. เตรียมสารละลายมาตรฐาน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการนำไปวิเคราะห์ผล โดยเตรียมสารละลายกรดฮิวมิก ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. นำสารละลายกรดฮิวมิกแต่ละความเข้มข้นมาวัดด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยใช้ Blank เป็นน้ำกลั่น พล็อตค่า Absorbance ของกรดฮิวมิก (เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer จะทำ Cal.Curve อัตโนมัติ) กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮิวมิก 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้น กับค่า Absorbance มีค่าความถูกต้องของกราฟ $R^2 = 0.9985$ เพื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวี แต่ละรอบของการทดสอบ



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิก 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

4. เตรียมสารละลายของกรดฮิวมิกที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมได้ไปผ่านชุดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.9 โดยใช้แสงยูวีขนาด 60 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 โดยความยาวคลื่นในย่านยูวี (310-400 นาโนเมตร) ข้างในหลอดบรรจุเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ 60 กรัม หลังจากนำผ่านชุดปฏิกิริยาดังกล่าว (1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ) นำน้ำตัวอย่างที่ต้องการวัดมาตรวจด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ก็จะได้ค่าความเข้มข้นกรดฮิวมิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดฮิวมิก โดยมีการควบคุมปริมาณของเส้นใยแก้วที่บรรจุในหลอดทดสอบ (30, 60 และ 90 กรัม) กำลังของแสงยูวีที่ใช้ (20, 40 และ 60 วัตต์) อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชุดปฏิกิริยา ควบคุมการไหลโดยการปรับวาล์วเปิด-ปิด ให้มีอัตราไหล 3 ระดับและทดสอบกับแสงฟลูออเรสเซนซ์

การคำนวณหา HA remaining% ของกรดฮิวมิกโดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.2)

$$\text{HA remaining} \left(\frac{A}{A_0} \right) \% = \frac{(A)}{A_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ A_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
 A คือ ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก ณ เวลาทดสอบ มิลลิกรัมต่อลิตร

2.7 การตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์ม

1) X-ray diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟสและคำนวณหาขนาดของสารเคลือบ โดยใช้สมการ Scherer ดังสมการที่ (2.4)

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร)
 β คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)
 θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

2) เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของฟิล์มและวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายอยู่บนฟิล์มด้วยวิธี X-ray mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM; JEOL JSM-5800LV)

3) Ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-VIS)

UV-VIS spectroscopy (UV-2401, Shimadzu, Japan.) ถูกใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของผงที่สังเคราะห์และคำนวณแถบช่องว่างแถบพลังงานของ TiO_2 , $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$, $\text{TiO}_2/20\text{N}$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ ซึ่งแปรผันปริมาณ Fe^{3+} 0.3-1.0 mol% โดยใช้ BaSO_4 เป็นตัวอ้างอิงแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อสะดวกในการวัด ลากเส้นความชันสัมผัสกับเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (Zhang et al. 2000)

ช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

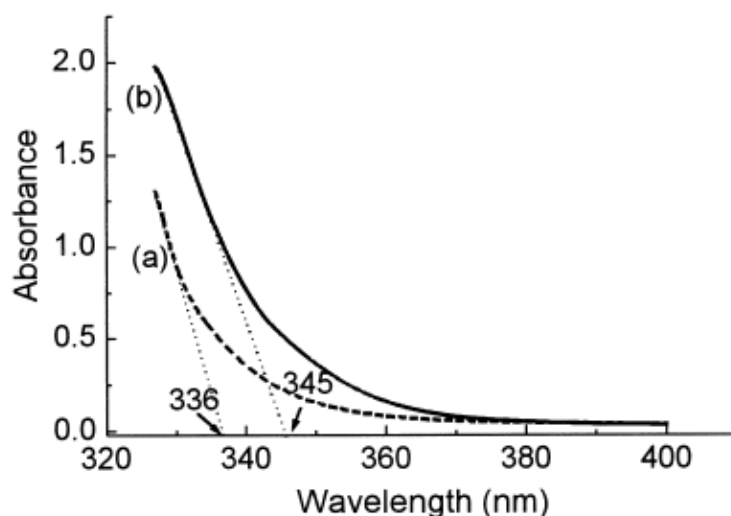
$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,239.8}{\lambda} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_g คือ แถบช่องว่างแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.67×10^{-34} จูลวินาที)

c คือ ความเร็วของแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

λ คือ ความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (นาโนเมตร)



รูปที่ 2.12 การลากเส้นเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Zhang et al., 2000)

4) Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)

Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR, Bruker Equinox 55) มีการบันทึกสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อใช้ดูหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันในผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้

2.8 การออกแบบและการทดสอบชุดปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำ

หลังจากที่มีการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อและการย่อยสลายกรดซิวมิก นำผลการทดสอบไปออกแบบชุดปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำ โดยนำข้อมูลของภาวะที่ดีที่สุดไปออกแบบ หลังจากนั้นจึงนำชุดปฏิกิริยาไปทดสอบกับเชื้อ *E. coli* และกรดซิวมิก

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

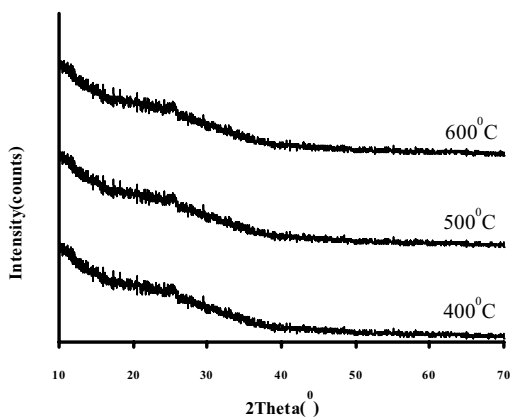
ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้วโดยวิธีจุ่มเคลือบ ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมสารเคลือบบนเส้นใยแก้ว และเพื่อศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำดื่ม โดยได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผา ชนิดสารได๊ปและปริมาณของสารได๊ป Fe^{3+} ที่มีผลต่อเฟสอะนาเทส ขนาดผลึกและลักษณะผิวเคลือบ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสำหรับการฆ่าเชื้อ *E.coli* และการสลายกรดฮิวมิกในน้ำ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD

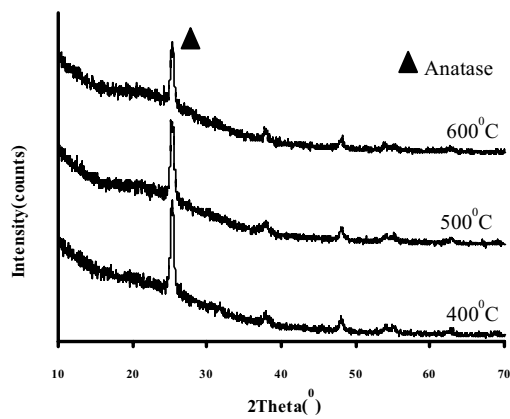
จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว เมื่อได๊ปด้วย SiO_2 , SnO_2 , N และ SnO_2 ร่วมกับ N ดังแสดงดังรูปที่ 3.1 ส่วนสูตรที่ได๊ปด้วย SnO_2 ร่วมกับ Fe^{3+} ดังแสดงดังรูปที่ 3.2-3.4 โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่า เกิดเฉพาะเฟสอะนาเทสเท่านั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 3.1 ฟิล์มที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (แสดงดังรูปที่ 3.1ข) พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสูงของพีคอะนาเทสลดลงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจาก เริ่มมีการเปลี่ยนเฟสจากอะนาเทสไปเป็นรูไทล์บางส่วนแต่เนื่องจากยังมีปริมาณน้อยอยู่จึงไม่พบพีคของรูไทล์ ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได๊ปด้วย SiO_2 (แสดงดังรูปที่ 3.1ค) และ SnO_2 (แสดงดังรูปที่ 3.1ง) พีคที่เกิดขึ้นจะสูงและแคบ แสดงว่าเฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นมีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากผลึกมีขนาดใหญ่ (ตารางที่ 3.1) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเผาที่ต่างกัน พบว่า อุณหภูมิไม่ค่อยมีผลกับความเป็นผลึกของเฟสอะนาเทสมากนัก ส่วนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได๊ปด้วย N (แสดงดังรูปที่ 3.1จ) และ N ร่วมกับ SnO_2 (แสดงดังรูปที่ 3.1ฉ) พบว่า พีคที่เกิดขึ้นจะต่ำแต่ยังมีฐานที่แคบอยู่ เปรียบเทียบกัน พบว่า การได๊ปด้วย N ทำให้ความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากมีขนาดผลึกที่เล็กทำให้เกิดผลึกมากทำให้การจัดเรียงไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อเผาจะทำให้การจัดเรียงตัวอะตอมใหม่ ทำให้เป็นผลึกที่สมบูรณ์หรือมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได๊ปด้วย SnO_2 ร่วมกับ Fe^{3+} โดยแปรผันปริมาณ Fe^{3+} พบว่า อุณหภูมิ

เผา 400 องศาเซลเซียส (แสดงดังรูปที่ 3.2) เฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นมีฐานพีคที่กว้างและต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กให้สูงขึ้นทำให้พีคยิ่งต่ำลงแสดงว่า Fe^{3+} ไปขัดขวางการเป็นผลึกของเฟสอะนาเทส ที่อุณหภูมิเผา 500 องศาเซลเซียส (แสดงดังรูปที่ 3.3) ความเป็นผลึกของเฟสอะนาเทสสูงขึ้นโดยปริมาณ Fe^{3+} ที่สูงขึ้นไม่ค่อยมีผลต่อความเป็นผลึก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีมากกว่า ส่วนเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (แสดงดังรูปที่ 3.4) เฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นมีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำจากฐานพีคที่ค่อนข้างกว้างและต่ำ จะเห็นได้ว่าเฟสอะนาเทสที่มีการโด๊ปด้วย Fe^{3+} มีความเป็นผลึกน้อยเนื่องจาก Fe^{3+} ไปขัดขวางการเกิดเฟสอะนาเทสและส่วนใหญ่ยังคงโครงสร้างอสัณฐานอยู่ เมื่อพิจารณาฟิล์มที่โด๊ปด้วย SiO_2 , SnO_2 และ N พบว่า ที่อุณหภูมิเผา 600 องศาเซลเซียส เฟสอะนาเทสจะสูงขึ้น บ่งบอกว่าส่วนที่เติมเข้าไปทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้น

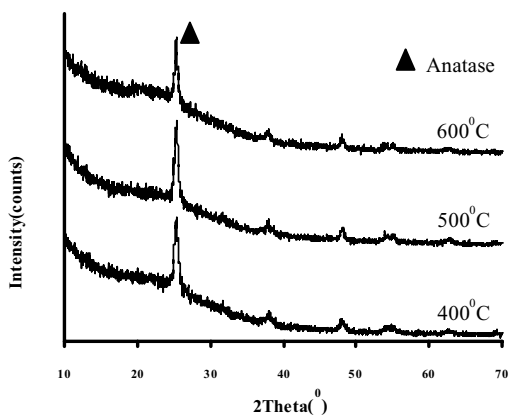
จากตารางที่ 3.1 เมื่อพิจารณาขนาดผลึกที่คำนวณจากพีคที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สูตรของ Sherrer พบว่า ขนาดผลึกส่วนใหญ่เท่ากับ 17.2 นาโนเมตร ส่วนการโด๊ปด้วย N สามารถทำให้ผลึกมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการโด๊ปด้วยตัวอื่น ฟิล์ม $TiO_2/20N$ และ $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คำนวณขนาดผลึกได้เพียง 7.6 และ 7.8 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ขนาดผลึกโตขึ้นเป็น 14.2 และ 11.9 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นก็มีผลให้ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นในฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2$ และ $TiO_2/3SnO_2/0.3Fe^{3+}$ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้เกรนของไทเทเนียมไดออกไซด์โตขึ้น แต่ในสูตรที่เติม Fe^{3+} 0.5, 0.8 และ 1.0 mol% พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ขนาดผลึกเล็กลง อาจเกิดจาก Fe^{3+} ที่มากพอไปยับยั้งการเติบโตของเกรนของไทเทเนียมไดออกไซด์และที่อุณหภูมิเผา 600 องศาเซลเซียส การโด๊ป Fe^{3+} ส่งผลทำให้ขนาดผลึกเล็กลง เพราะ Fe^{3+} ไปยับยั้งการเติบโตของผลึกอะนาเทส



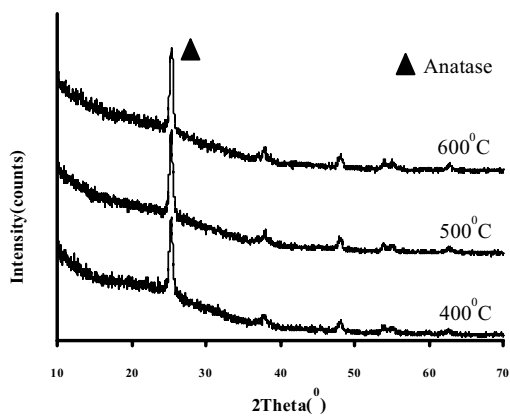
(ก) GF



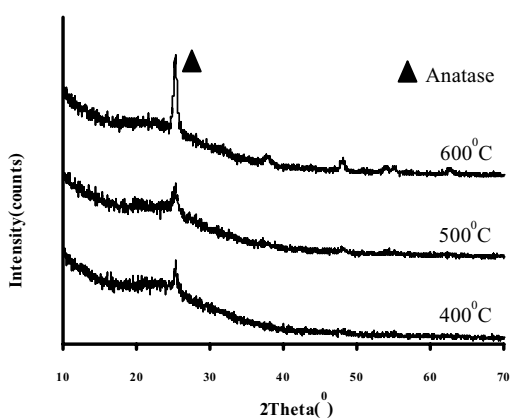
(ข) T



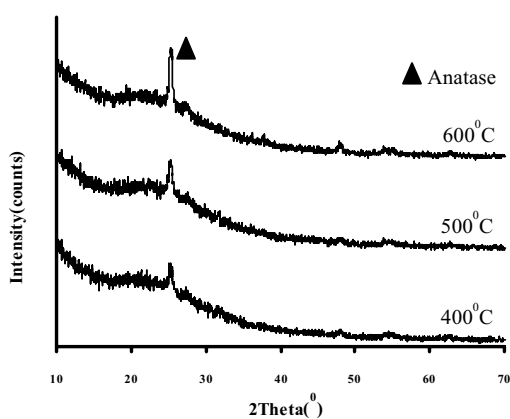
(ค) TSi



(ง) TSn



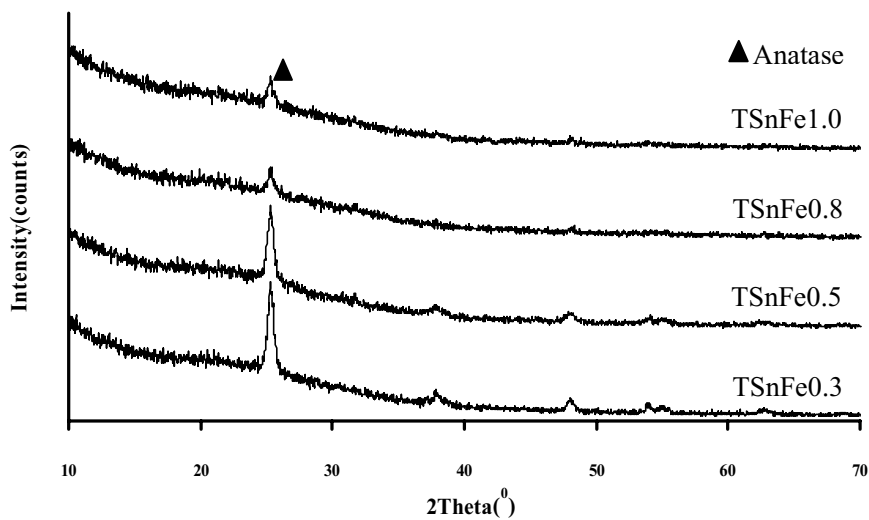
(จ) TN



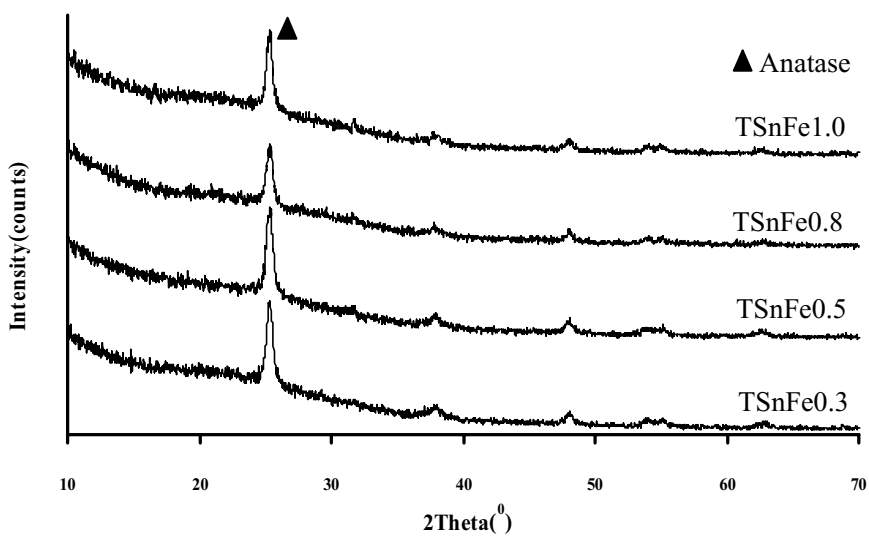
(ฉ) TSnN

รูปที่ 3.1 XRD patterns ของฟิล์ม (ก) เส้นใยแก้ว (ข) TiO_2 (ค) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ (ง) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$

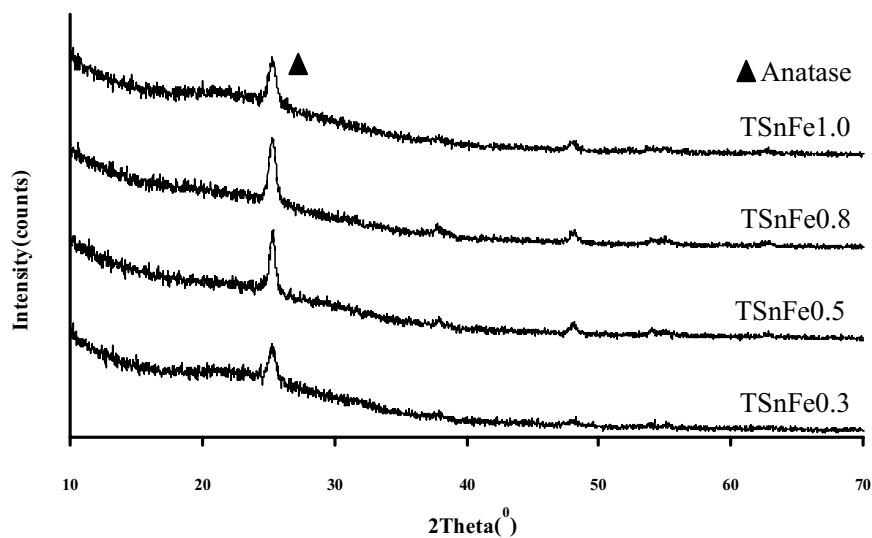
(จ) $\text{TiO}_2/20\text{N}$ (ฉ) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.2 XRD patterns ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 XRD patterns ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 XRD patterns ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.1 ขนาดผลึกที่คำนวณโดยใช้สมการของ Scherer ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	ขนาดผลึก (nm)		
	400 °C	500 °C	600 °C
TiO_2	19.7	17.2	17.2
$\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$	17.2	17.2	17.2
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$	17.2	17.2	23.0
$\text{TiO}_2/20\text{N}$	10.1	7.6	14.2
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$	15.1	7.8	11.9
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$	17.2	17.2	23.0
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$	17.2	13.8	13.8
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.8\text{Fe}^{3+}$	17.2	17.2	13.8
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/1.0\text{Fe}^{3+}$	23.0	23.0	13.8

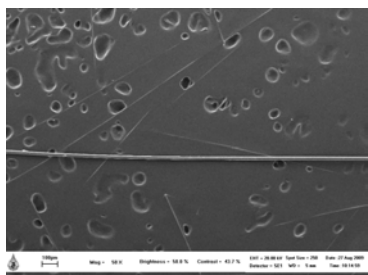
3.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(SEM)

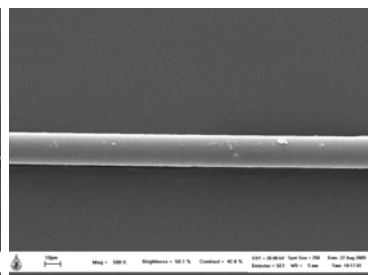
ผลการวิเคราะห์ลักษณะผิวของเส้นใยแก้วซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5ก-ค โดยใช้กำลังขยายที่ต่างกัน คือ 50, 500 และ 35,000 เท่า ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า พื้นผิวมีลักษณะเรียบ ส่วนรูปที่ 3.5ง เป็นฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ ลักษณะพื้นผิวจะเป็นเม็ดเล็กๆ ผิวจะไม่เรียบ เนื่องจากเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกรนมีการโตขึ้น ขนาดเกรนประมาณ 60-80 นาโนเมตร รูปที่เหลือจะเป็นฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ (รูปที่ 3.5จ), $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ (รูปที่ 3.5ฉ), $\text{TiO}_2/20\text{N}$ (รูปที่ 3.5ช), $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ (รูปที่ 3.5ซ) และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ (รูปที่ 3.5ณ) ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจะค่อนข้างเรียบ เมื่อถ่ายภาพตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ แสดงดังรูปที่ 3.6 จากรูปที่ 3.6 สามารถหาความหนาของฟิล์มได้ประมาณ 400-500 นาโนเมตร

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มโดยวิธี X-ray mapping แสดงดังรูปที่ 3.7ก-จ พบว่า การกระจายตัวของธาตุ Ti และ O มีการกระจายทั่วชิ้นงาน ส่วนสูตรที่มีการได้ป SnO_2 และ Fe^{3+} เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยมากทำให้ไม่สามารถแสดงผล X-ray mapping แต่สำหรับการกระจายตัวของ SiO_2 บนผิวตัวอย่างไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากสารเติมเป็นสารชนิดเดียวกับวัสดุฐานที่เป็นเส้นใยแก้ว ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณของ SiO_2 เป็นส่วนผสมหลักอยู่แล้ว ดังนั้นในการตรวจสอบจะพบ SiO_2 ที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว ส่วนรูปที่ 3.8 จะแสดงพิกของธาตุต่างๆ ที่กระจายอยู่บนเส้นใยแก้วที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ จากกราฟ พบว่า พิกของธาตุ Ti จะค่อนข้างต่ำ เนื่องจากรังสีเอ็กซ์จะทะลุผ่านไปยังวัสดุฐาน ผลจากกราฟ พบว่า วัสดุฐานประกอบไปด้วยธาตุ Si, C, O, Al และ Ca นอกจากนี้ยังพบธาตุ N เป็นพิกต่ำๆ อยู่ด้วยในฟิล์ม $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อนำพิกที่ได้ไปคำนวณในเชิงปริมาณ ผลแสดงในตารางที่ 3.2 จากตาราง พบว่า ปริมาณธาตุ Ti พบมากที่สุด 4.64 wt% จากฟิล์ม $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ เนื่องจากสารที่ได้ปเป็นธาตุสารประกอบที่มีอยู่บนเส้นใยแก้วทำให้การเคลือบจะดีกว่าสารเคลือบสูตรอื่น รองลงมาคือฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ พบว่า มีปริมาณธาตุ Ti 4.27 wt% ส่วนฟิล์มที่มีปริมาณธาตุ Ti น้อยที่สุดคือ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ อาจจะเป็นเนื่องมาจากการเคลือบติดที่ไม่ดีของฟิล์ม ส่วนปริมาณธาตุ N ที่พบจากฟิล์ม $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ คือ 1.13 และ 1.15 wt% ตามลำดับ

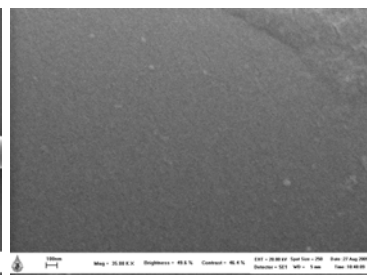
(ก) GF 50X



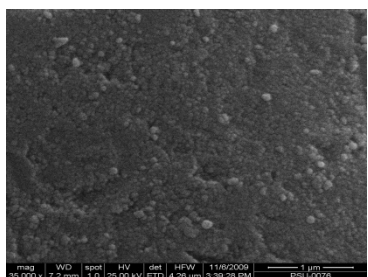
(ข) GF 500X



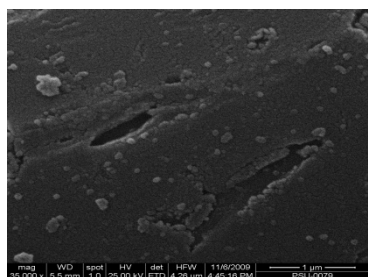
(ค) GF 35,000X



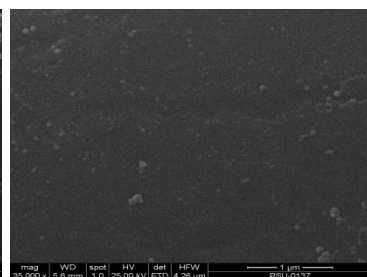
(ง) T 35,000X



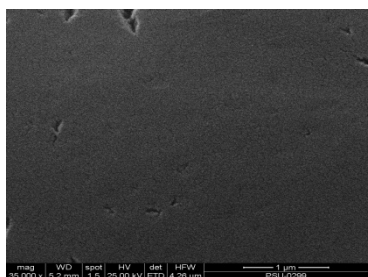
(จ) TSi 35,000X



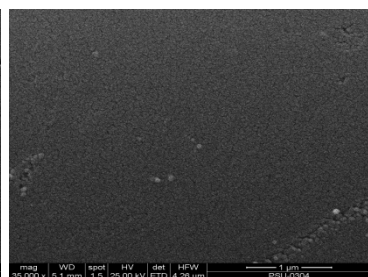
(ฉ) TSn 35,000X



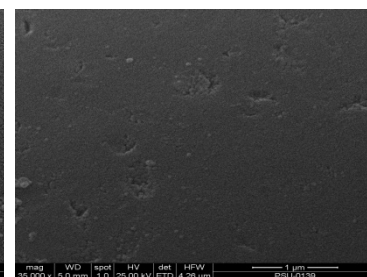
(ช) TN 35,000X



(ซ) TSnN 35,000X

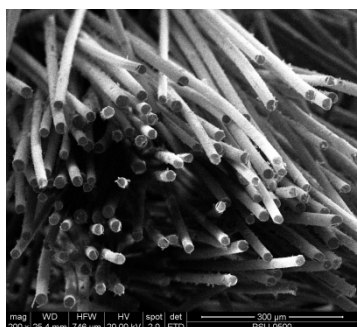


(ฌ) TSnFe0.3 35,000X

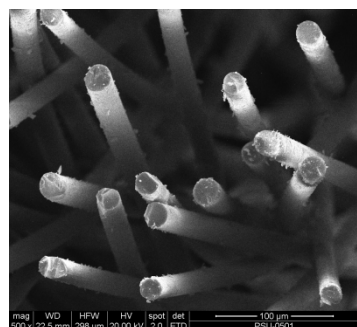


รูปที่ 3.5 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

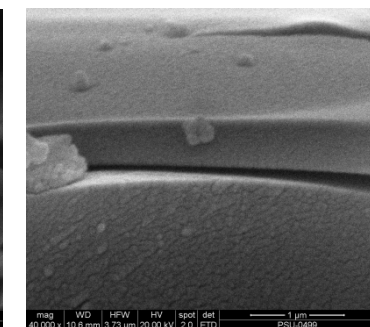
(ก)



(ข)

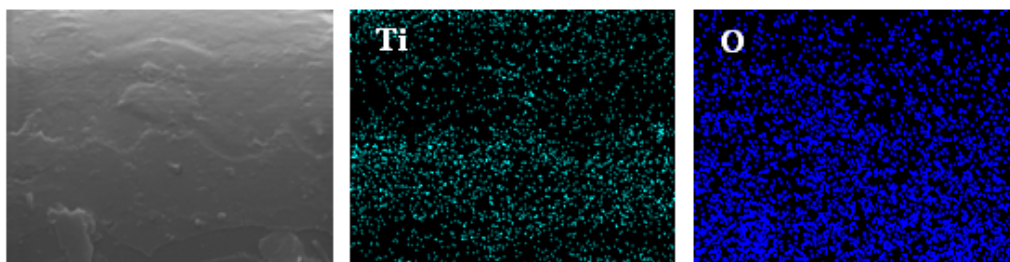


(ค)

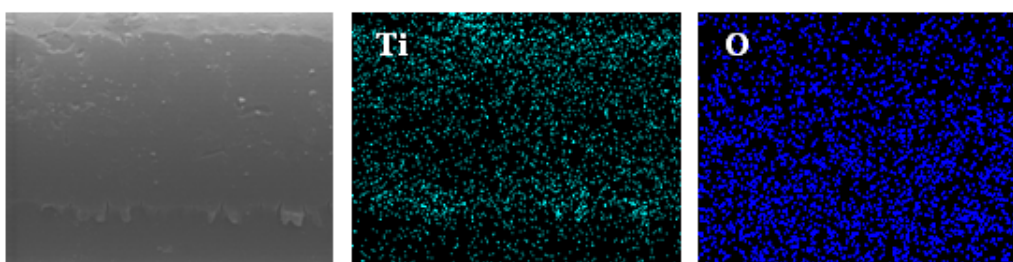


รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตร $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) 200 เท่า (ข) 500 เท่า และ (ค) 40,000 เท่า

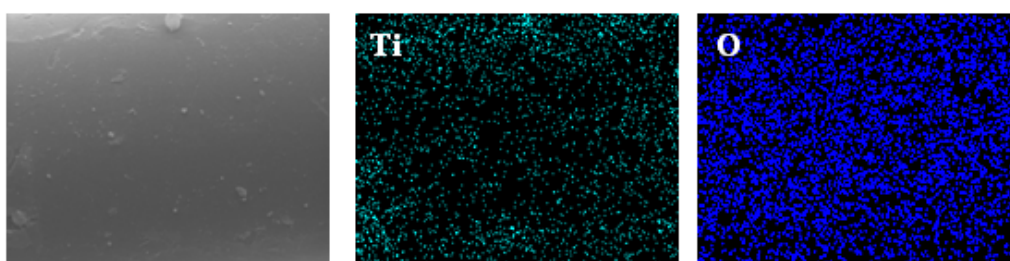
(n) T



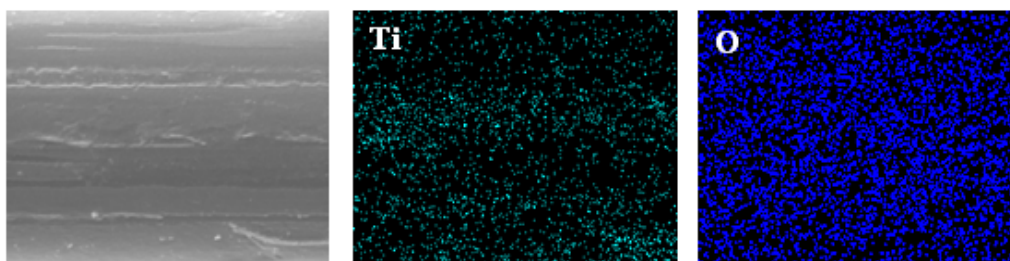
(o) TSi



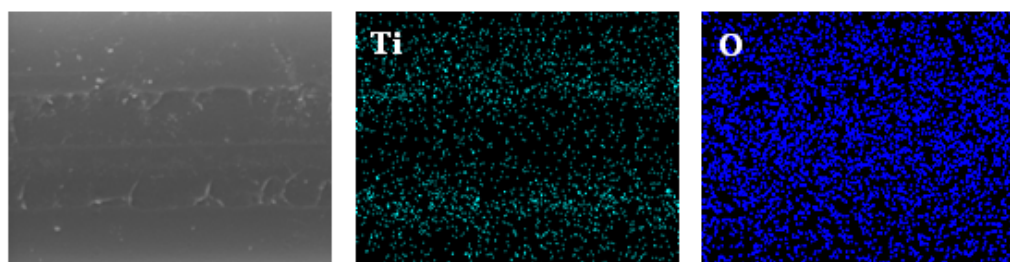
(p) TSn



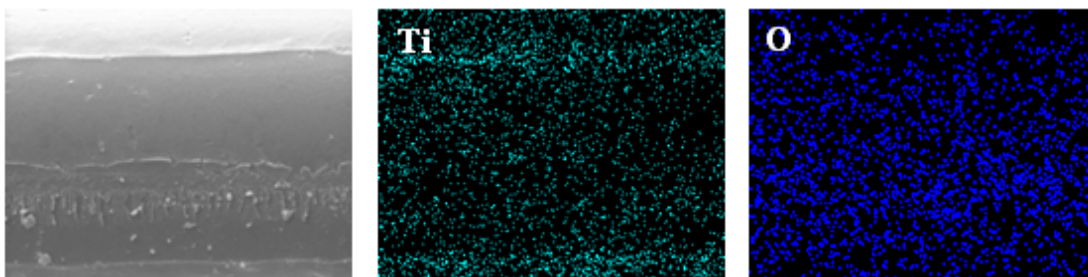
(q) TN



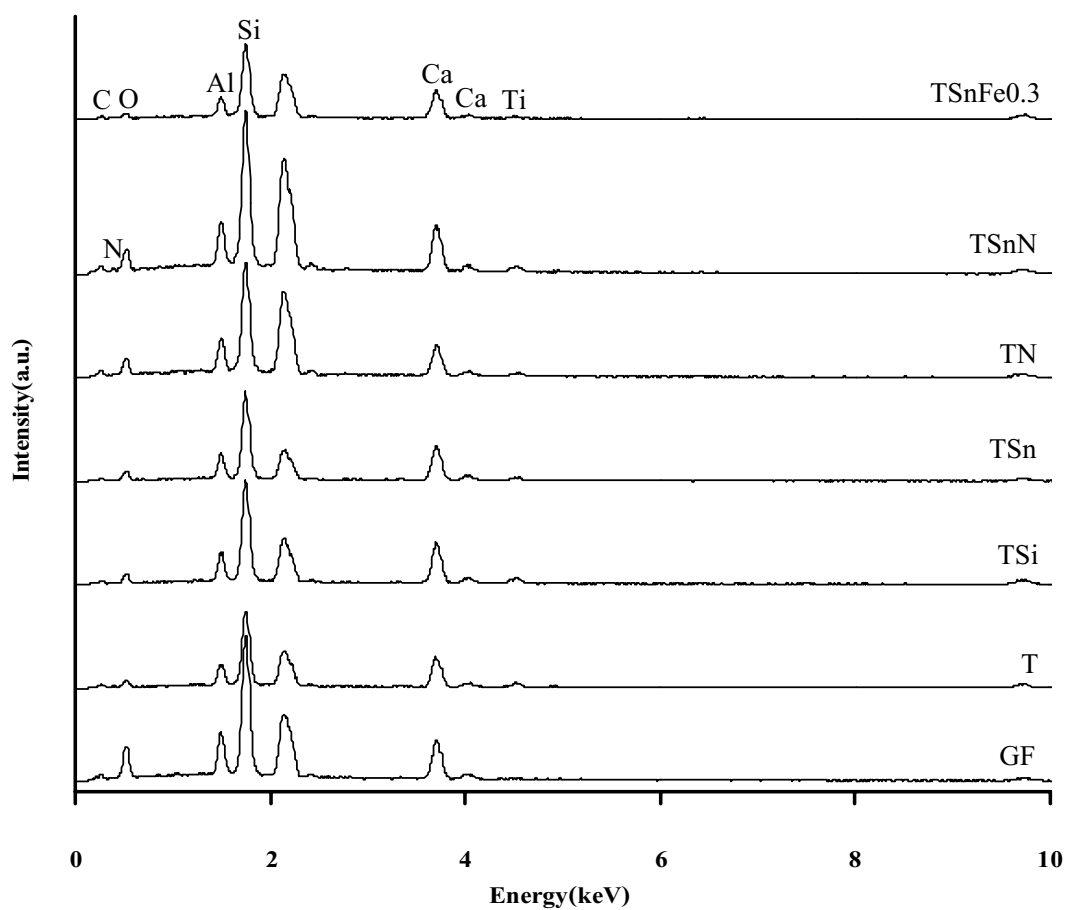
(r) TSnN



(ฉ) TSnFe0.3



รูปที่ 3.7 การกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ



รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	ปริมาณธาตุ (wt%)						
	Ti	O	C	Al	Si	Ca	N
Glass fibers	-	22.77	8.26	13.21	34.97	20.79	-
TiO ₂	3.59	19.59	11.70	8.96	34.75	21.41	-
TiO ₂ /5SiO ₂	4.63	15.20	13.54	8.92	34.65	23.05	-
TiO ₂ /3SnO ₂	3.28	18.32	10.20	9.22	35.27	23.71	-
TiO ₂ /20N	3.45	15.89	10.94	8.99	34.17	25.42	1.13
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	4.27	15.90	08.97	8.63	34.48	26.59	1.15
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	2.97	14.89	14.86	9.15	36.30	21.83	-

3.3 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Ultraviolet- visible spectrophotometer (UV-VIS)

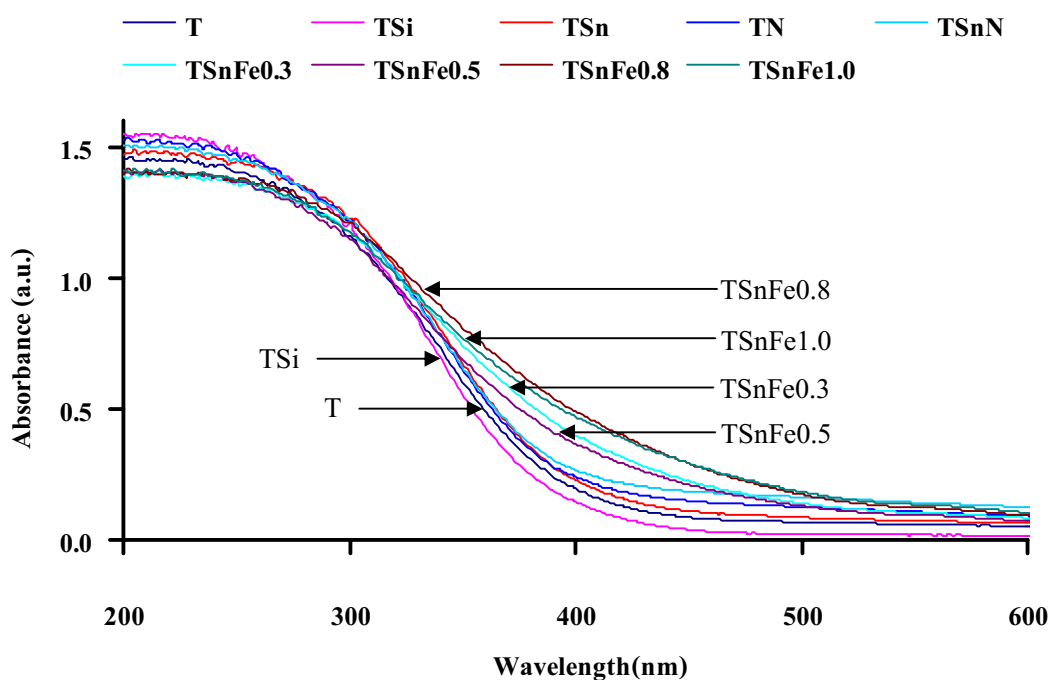
UV-VIS spectroscopy ถูกใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของผงที่สังเคราะห์และคำนวณหาแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของผง TiO₂, TiO₂/5SiO₂, TiO₂/3SnO₂, TiO₂/20N, TiO₂/3SnO₂/20N และ TiO₂/3SnO₂/Fe³⁺ ซึ่งแปรผันปริมาณ Fe³⁺ 0.3-1.0 mol% โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.11 ในการทดสอบใช้ BaSO₄ เป็นตัวอ้างอิงแถบพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อสะดวกในการวัด ลากเส้นความชันสัมผัสกับเส้นโค้งของสเปกตรัมที่ได้ แล้วนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยใช้สมการของ Plank ซึ่งช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 3.3 และแสดงการเปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 3.12

ผลการทดสอบพบว่า ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผงสูตร TiO₂, TiO₂/5SiO₂, TiO₂/3SnO₂, TiO₂/20N และ TiO₂/3SnO₂/20N มีผลจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 408-419 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 2.96-3.04 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งผลการได้ไป SiO₂, SnO₂ และ N ช่วยให้เลื่อนไปยัง Visible light เล็กน้อย สำหรับผงที่มีการได้ไปร่วมกันระหว่าง SnO₂ และ Fe³⁺ 0.3-1.0 mol% พบว่า จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 430-448 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 2.77-2.88 อิเล็กตรอน โวลต์

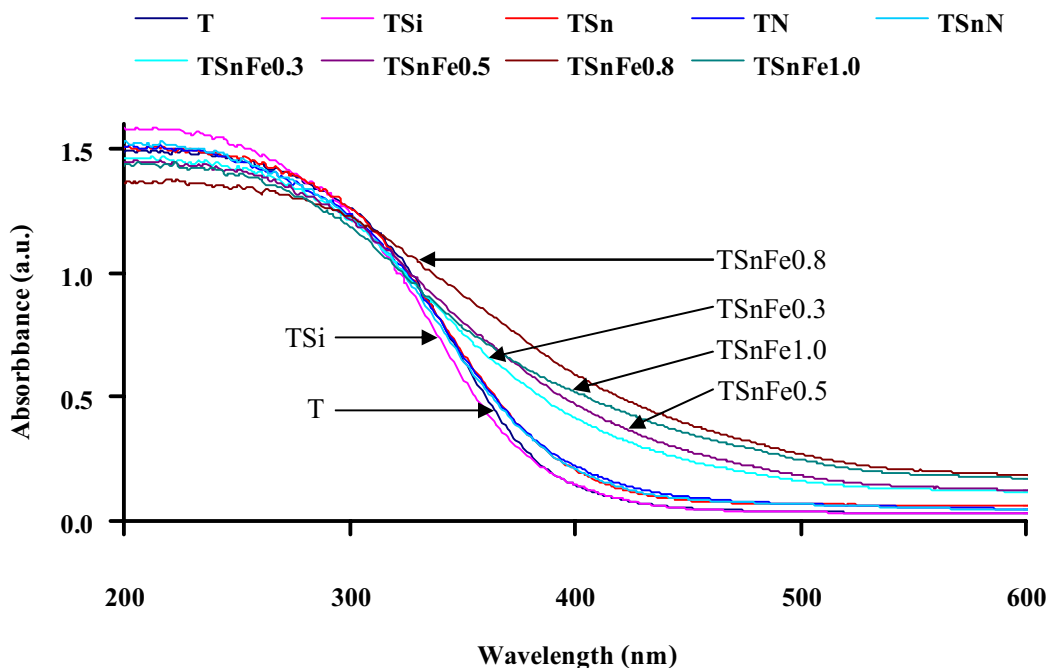
ผลการทดสอบที่อุณหภูมิเผา 500 องศาเซลเซียส พบว่า ผงสูตร $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$, $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ มีผลจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 401-422 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 2.94-3.09 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับผงที่มีการได้ไป SnO_2 และ Fe^{3+} 0.3-1.0 mol% พบว่า จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 438-470 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 2.64-2.83 อิเล็กตรอนโวลต์

ผลการทดสอบที่อุณหภูมิเผา 600 องศาเซลเซียส พบว่า ผงสูตร $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$, $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ผลไม่แตกต่างจากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีผลจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 405-419 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 2.96-3.06 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับผงที่มีการได้ไป SnO_2 และ Fe^{3+} 0.3-1.0 mol% พบว่า จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 451-477 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 2.60-2.75 อิเล็กตรอนโวลต์

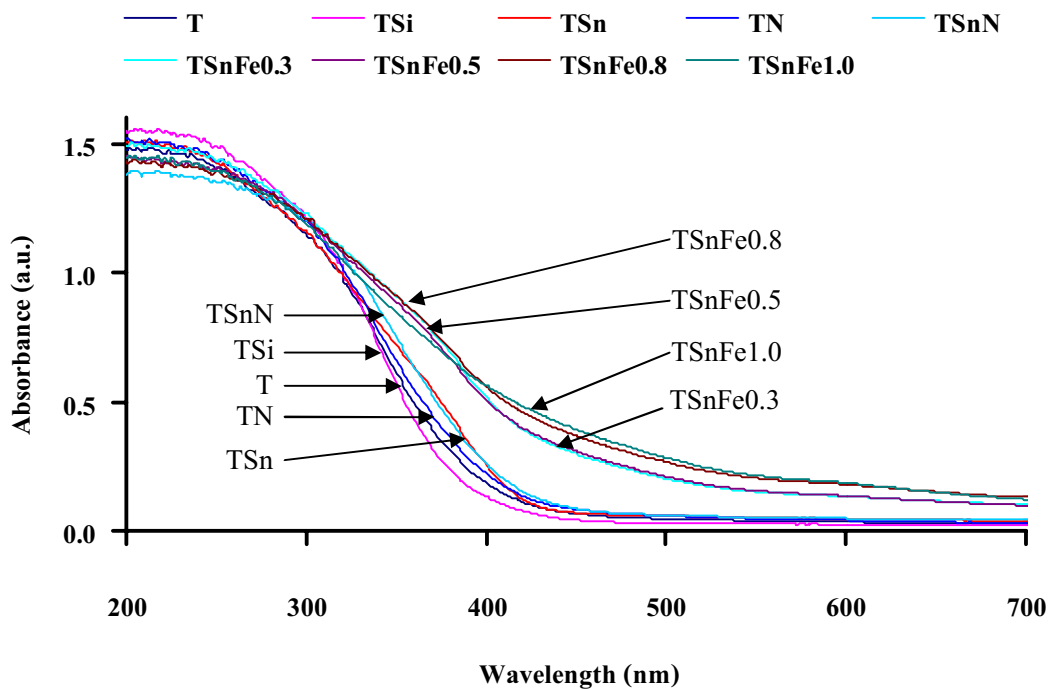
จากผลดังกล่าว พบว่า การได้ไป Fe^{3+} สามารถช่วยให้มีการดูดกลืนความยาวคลื่นเลื่อนไปทาง Visible light โดยปริมาณ Fe^{3+} ที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้เลื่อนไปยัง Visible light มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการเลื่อนไปยัง Visible light มากขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยให้เกิดการแพร่ของสารที่ได้ไปลงไปใน ส่วนผงสูตร TiO_2 , $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$, $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ พบว่า อุณหภูมิเผาไม่คอยมีผลมากนัก



รูปที่ 3.9 การดูดกลืนสเปกตร้าของผงสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



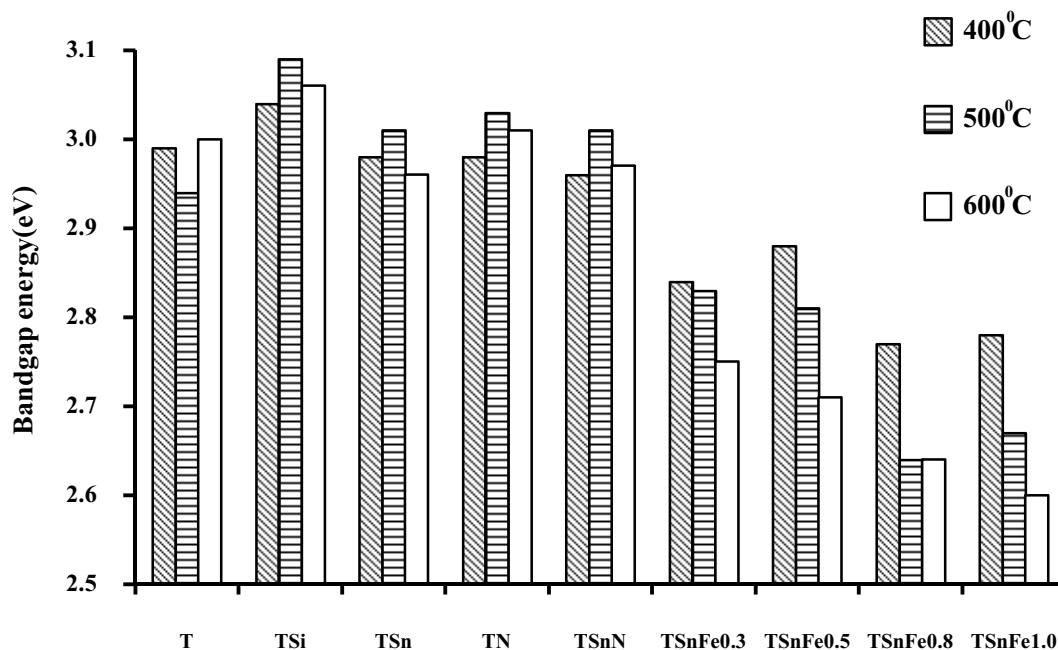
รูปที่ 3.10 การดูดกลืนสเปกตรากของผงสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.11 การดูดกลืนสเปกตรากของผงสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.3 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

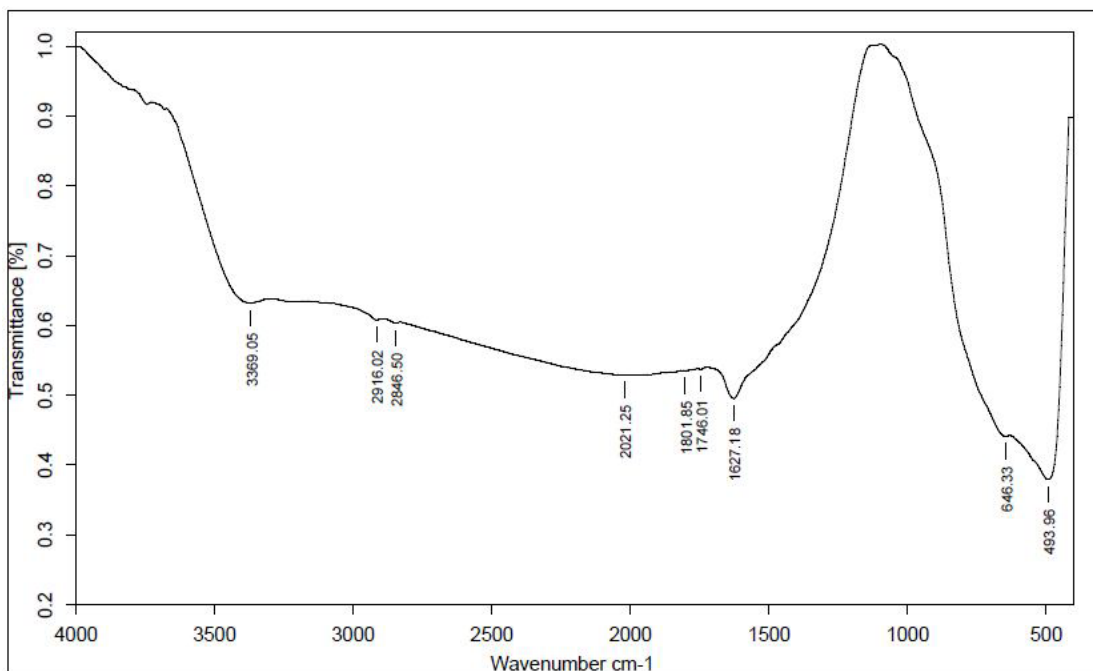
ชนิดของผง	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)		
	400 °C	500 °C	600 °C
TiO ₂	2.99	2.94	3.00
TiO ₂ /5SiO ₂	3.04	3.09	3.06
TiO ₂ /3SnO ₂	2.98	3.01	2.96
TiO ₂ /20N	2.98	3.03	3.01
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	2.96	3.01	2.97
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	2.84	2.83	2.75
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.5Fe ³⁺	2.88	2.81	2.71
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.8Fe ³⁺	2.77	2.64	2.64
TiO ₂ /3SnO ₂ /1.0Fe ³⁺	2.78	2.67	2.60



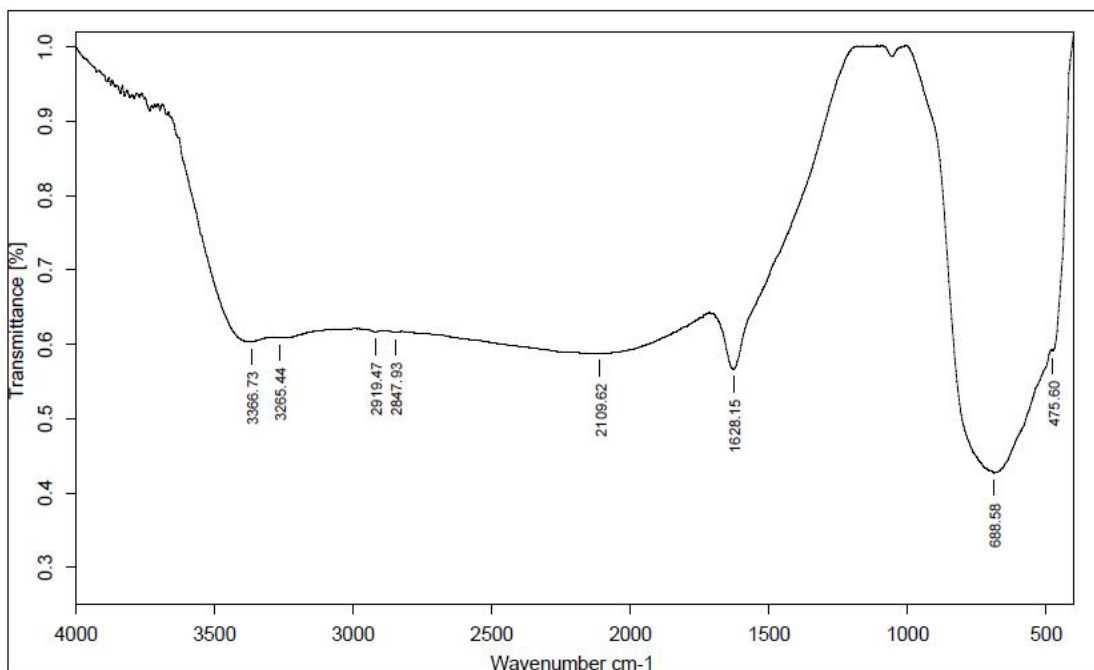
รูปที่ 3.12 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

3.4 ผลการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)

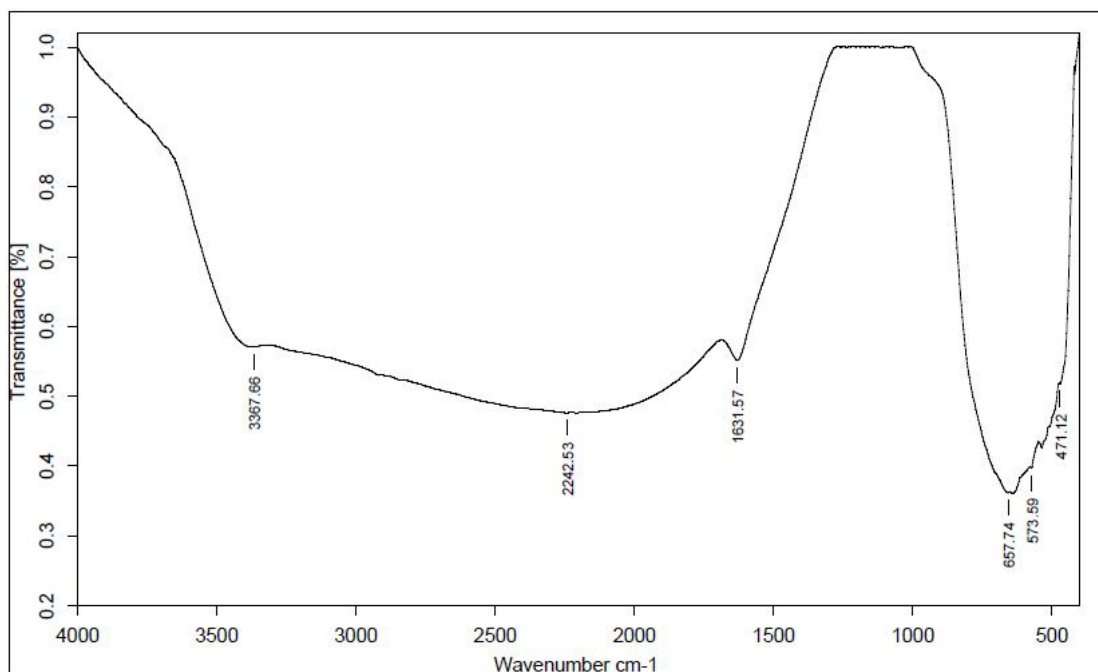
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมโดยวิธีโซล-เจล เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.13-3.21 และข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่และชนิดของการสั่น สรุปดังตารางที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าที่เลขคลื่น $2900\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ จะมีกลุ่มของ O-H stretching โดยเป็นพันธะไฮโดรเจนที่มีลักษณะพีกที่กว้าง ที่เลขคลื่น $1640\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นพีกของ O-H bending ของน้ำในโครงสร้างผลึก ที่เลขคลื่น 1400 cm^{-1} จะเป็นพีกของ N-H bending และที่ตำแหน่งพีก $700\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นพีกของ Ti-O stretching จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 จะแสดงพีกของ N ซึ่งมาจากผงสูตร $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ จากผล FT-IR ดังกล่าวก็สามารถยืนยันพันธะที่เกิดขึ้นในผงที่เตรียมได้



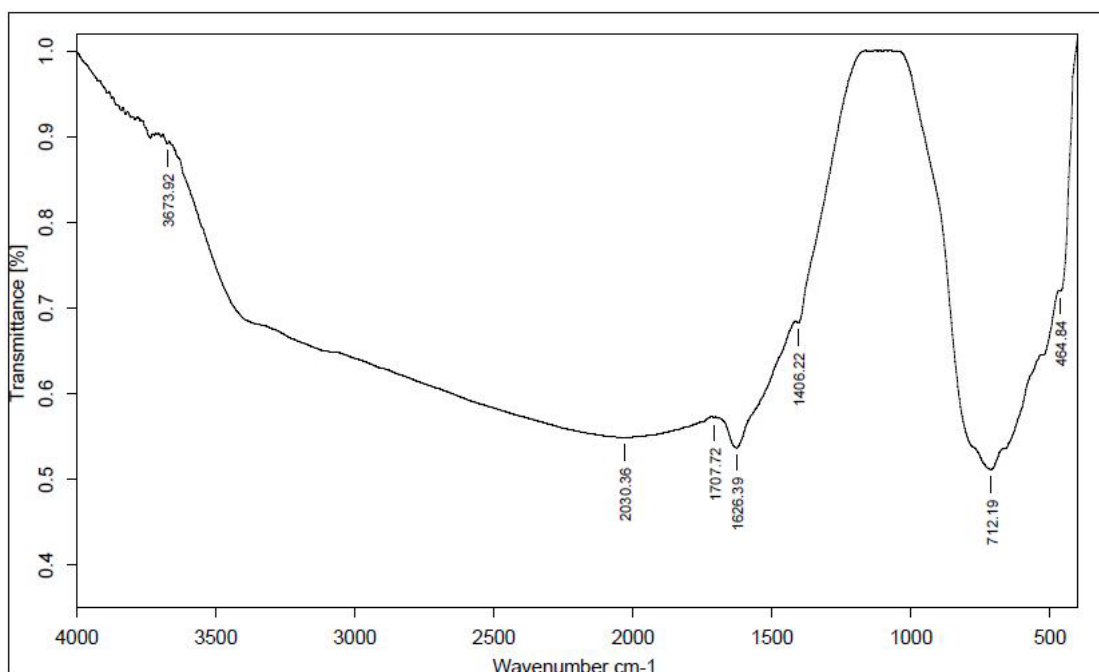
รูปที่ 3.13 FT-IR สเปกตรัมของผง TiO_2 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



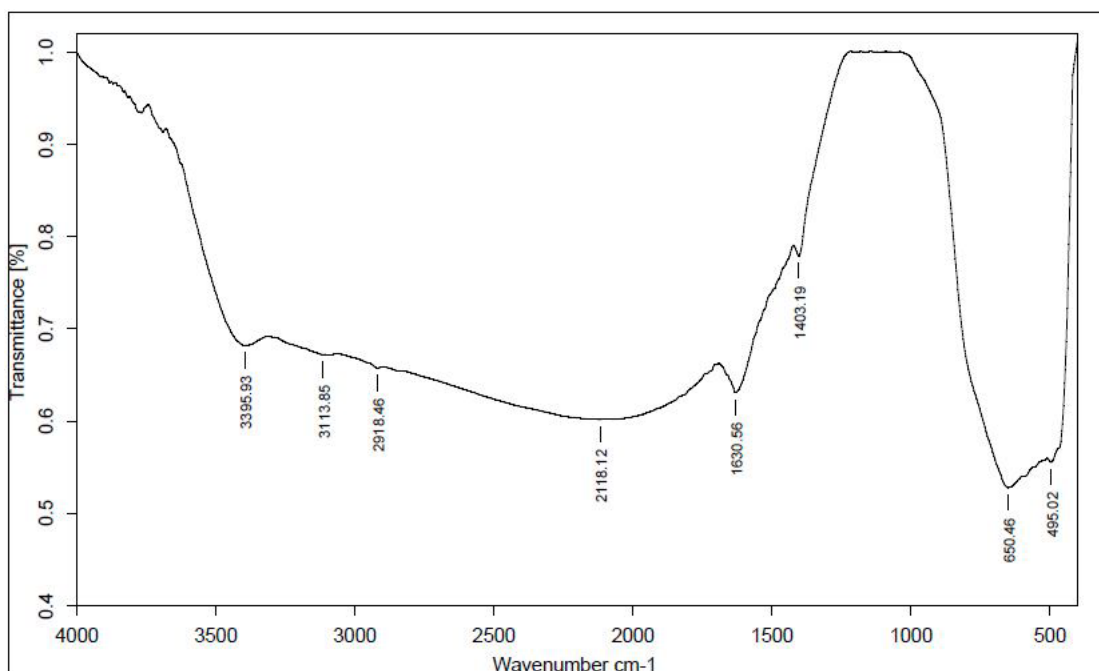
รูปที่ 3.14 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



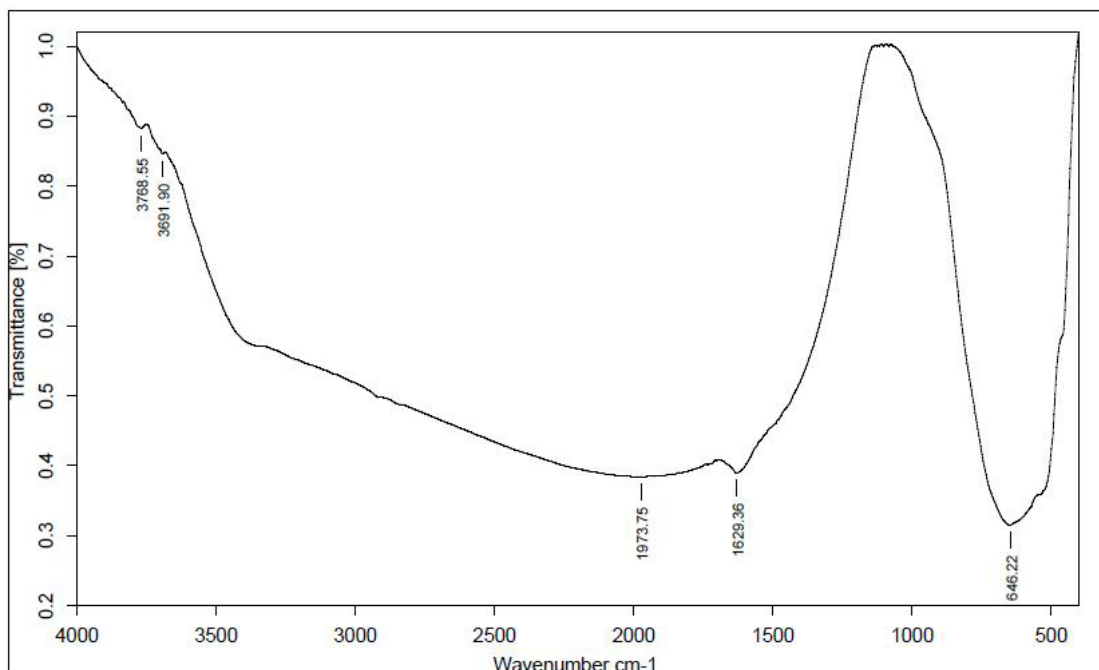
รูปที่ 3.15 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



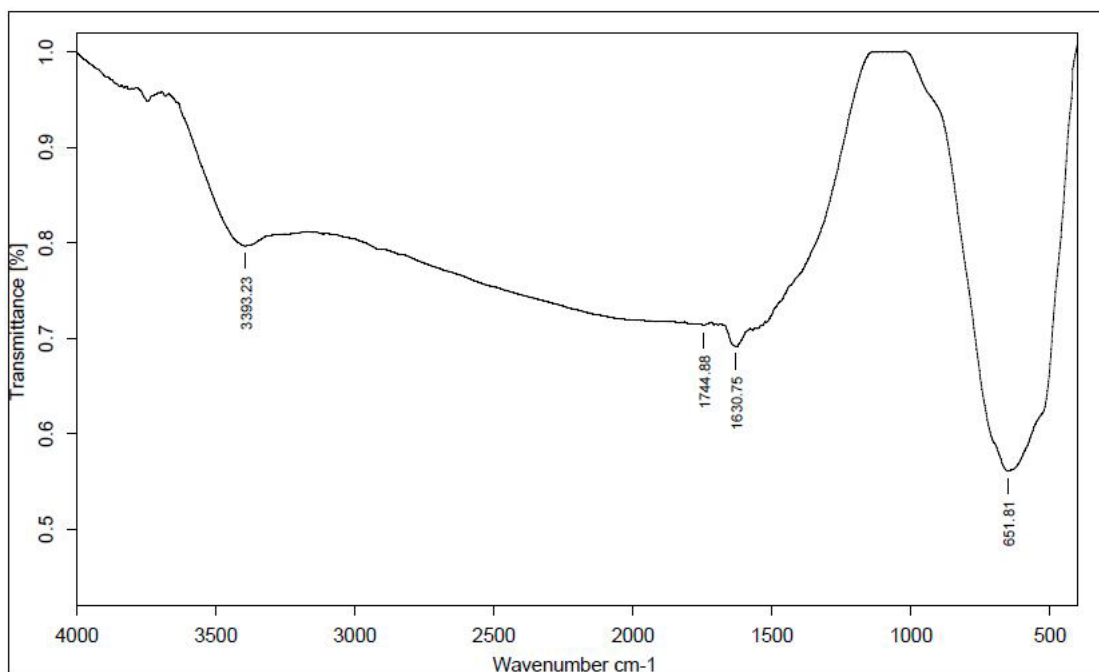
รูปที่ 3.16 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/20\text{N}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



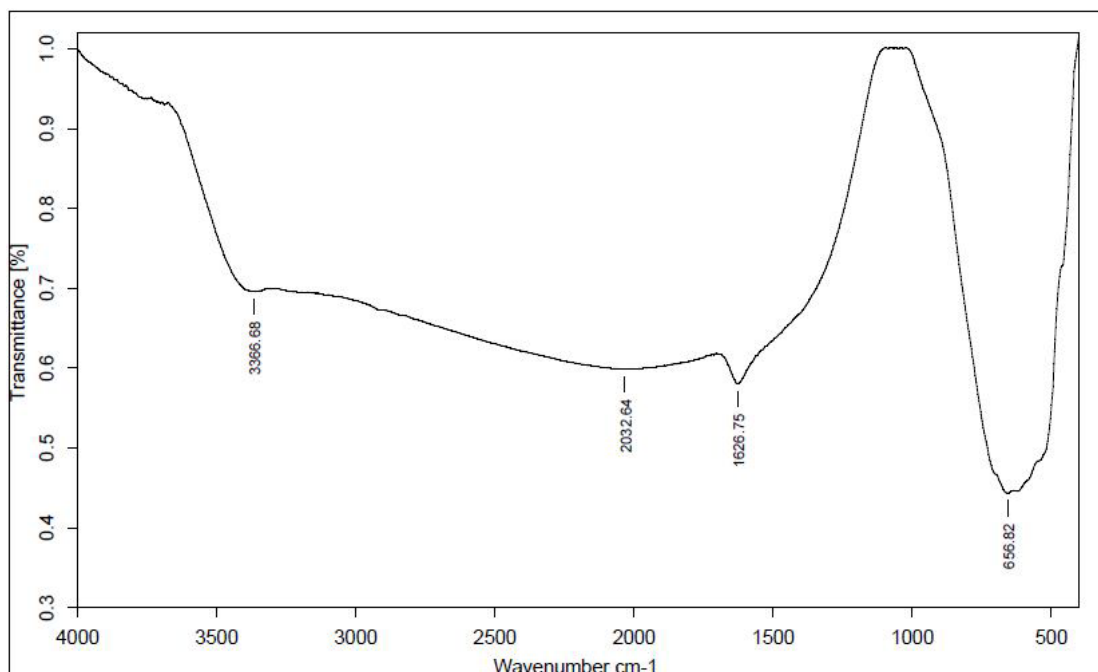
รูปที่ 3.17 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



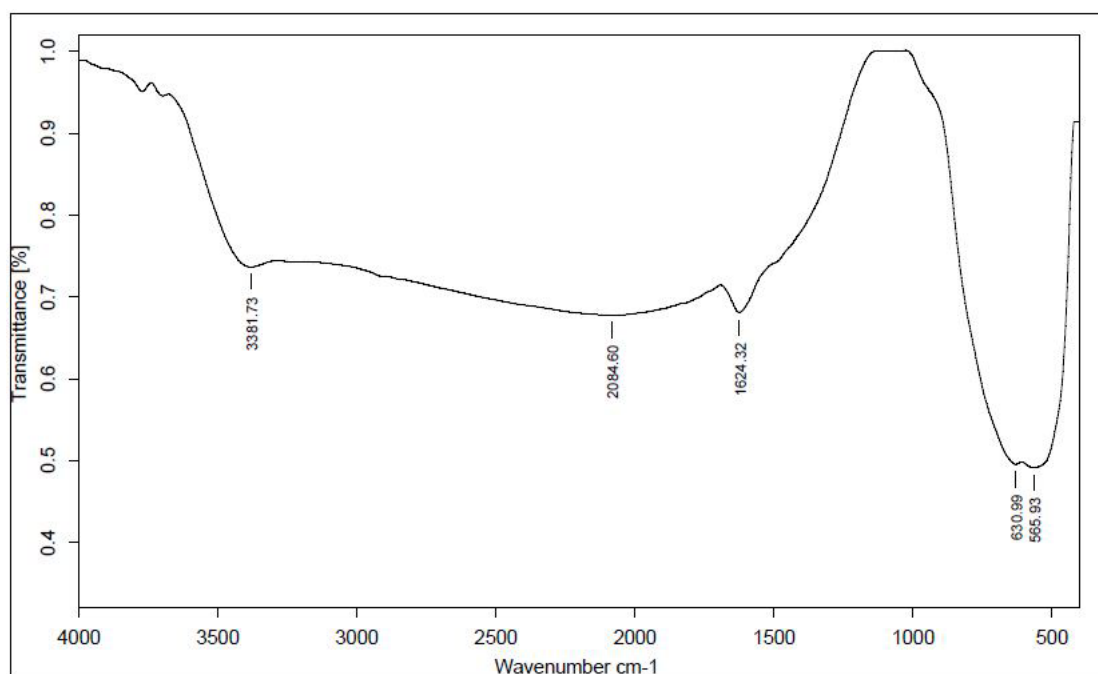
รูปที่ 3.18 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.19 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.20 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.8\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.21 FT-IR สเปกตรัมของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/1.0\text{Fe}^{3+}$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.4 ความถี่และชนิดของการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิค FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

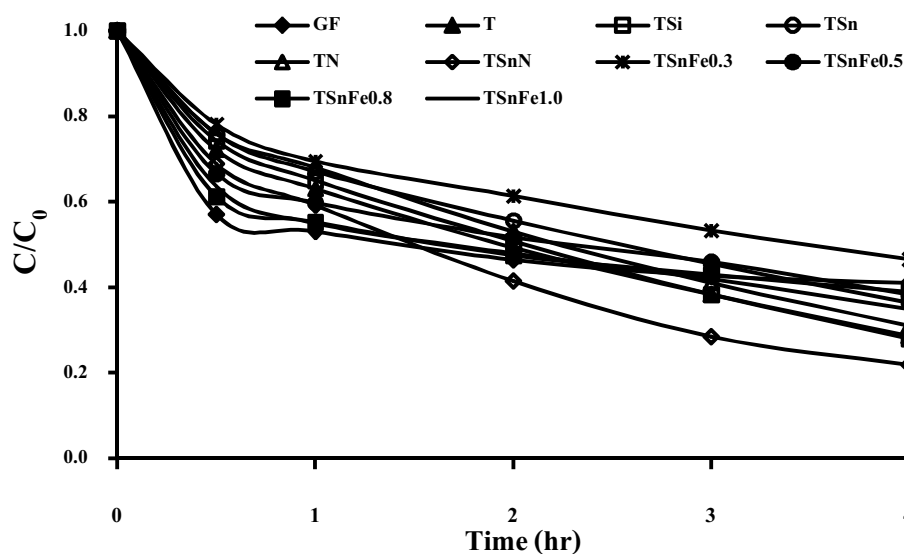
ชนิดของสาร	Wave no. (cm ⁻¹)	Vibrational mode	ข้อมูลอ้างอิง
TiO ₂	493.96-646.33	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1627.1	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3369.05	O-H stretching	Senthilnathan et a.,l (2010)
TiO ₂ /5SiO ₂	688.58	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1628.15	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3366.73	O-H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /3SnO ₂	657.74	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1631.57	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3367.66	O-H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /20N	712.19	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al (2010)
	1406.22	N-H bending	Jiaqing et al., (2002)
	1626.39	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	650.46	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1403.19	N-H bending	Jiaqing et al., (2002)
	1630.56	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3395.93	O-H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	646.22	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1629.36	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.5Fe ³⁺	651.81	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1630.75	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3393.23	O-H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.8Fe ³⁺	656.82	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1626.75	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3366.68	O-H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TiO ₂ /3SnO ₂ /1.0Fe ³⁺	565.93-630.99	TiO ₂ stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1624.32	O-H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3381.73	O-H stretching	Senthilnathan et al., (2010)

3.5 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

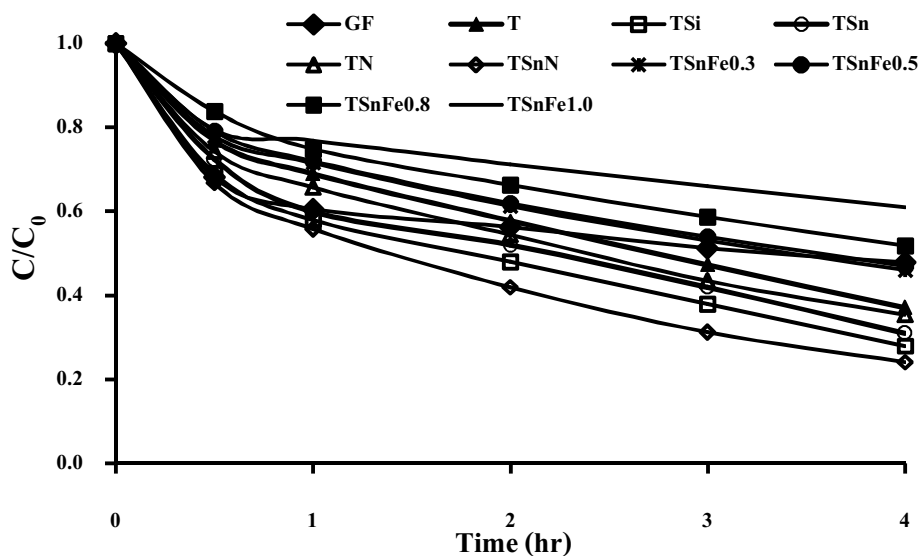
จากการทดลองทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์ม TiO_2 , $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$, $\text{TiO}_2/20\text{N}$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ ซึ่งแปรผันปริมาณ Fe^{3+} 0.3-1.0 mol% โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.22-3.24 โดยใช้เวลาทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อนำผลการทดสอบมาเทียบกันทุกสูตร ที่อุณหภูมิเผา 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาทดสอบที่ 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบ พบว่า ฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ สามารถทำปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด ที่อุณหภูมิเผา 600 องศาเซลเซียส ประมาณ 83.6 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ XRD ในรูปที่ 3.1จ สามารถอธิบายได้ว่า ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม SnO_2 และ N จะเกิดเฟสอะนาเทสได้สมบูรณ์ โดยสังเกตได้จากฐานพีคที่แคบและมีพีคที่สูง ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 25.3^\circ$, 37.9° , 48.0° , 54.0° , 55.2° และ 62.7° และจากคำนวณขนาดผลึกที่มีขนาดเล็กเพียง 11.9 นาโนเมตร โดยเฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นเป็นเฟสที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีที่สุด และจากการทดสอบหาปริมาณธาตุ Ti บนผิวฟิล์ม พบว่า มีปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับสูตรอื่น แสดงถึงการเคลือบที่ติดดีของโซลที่เตรียมขึ้น (ตารางที่ 3.2) ส่วนฟิล์ม TiO_2 , $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$, $\text{TiO}_2/20\text{N}$ ผลการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูจะต่ำกว่าฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ แต่ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/\text{Fe}^{3+}$ ซึ่งแปรผันปริมาณ Fe^{3+} 0.3-1.0 mol% พบว่า ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับสูตรอื่นเนื่องจากผลการวิเคราะห์ XRD ในรูปที่ 3.2-3.4 เฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยสังเกตได้จากฐานพีคที่กว้างและมีพีคที่ต่ำ และจากการทดสอบหาปริมาณธาตุ Ti บนผิวฟิล์ม พบว่า มีปริมาณที่ต่ำเมื่อเทียบกับสูตรอื่น นอกจากนี้จากการได้ไป Fe^{3+} ยังทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์แคบลง ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะกลับมารวมตัวกับหลุมอิเล็กตรอนเร็วมากและเร็วกว่า (ตารางที่ 3.3) ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ไม่ดี นอกจากนี้อาจเกิดจากเหล็กจะไปคลุมพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ จากผลเมื่อปริมาณเหล็กที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูลดลงจากการทดสอบหาปริมาณธาตุนบนผิวฟิล์ม พบว่า มีปริมาณธาตุ Ti ที่ต่ำเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตรอื่นๆ แสดงถึงการเคลือบติดที่ไม่ดีของโซลที่เตรียมขึ้น (ตารางที่ 3.2) เมื่อพิจารณาผลจากอุณหภูมิในการเผา พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูสูงขึ้นด้วย โดยเฉพาะฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ จากผล XRD ในรูปที่ 3.1จ และ 3.1ค เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นพีคของเฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นจะสูงขึ้นแสดงถึงความเป็น

ผลึกที่สมบูรณ์ของเฟสอะนาเทส

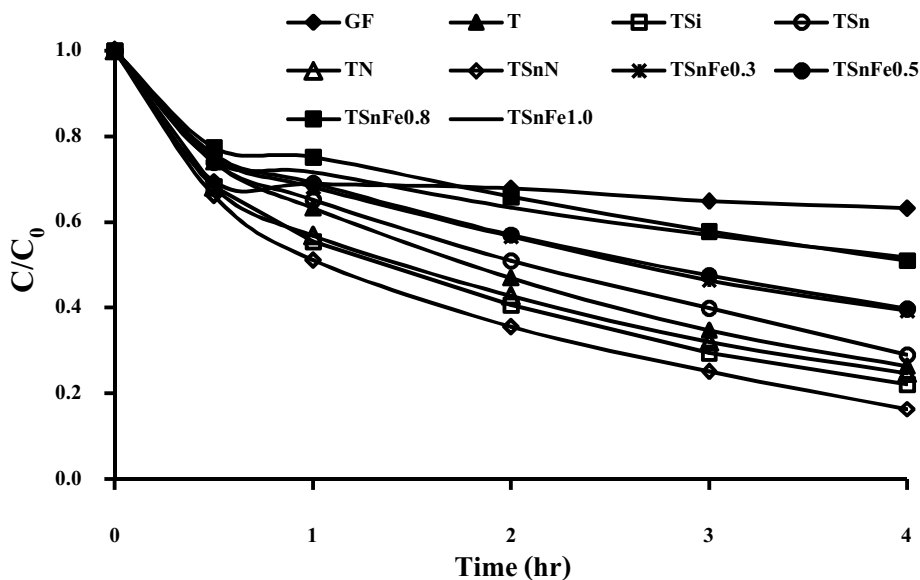
เมื่อทำศึกษาการยึดเกาะของฟิล์มที่เตรียมได้โดยการนำเส้นใยแก้วที่เคลือบแล้วผ่านการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำตัวอย่างไปแช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ โดยทำการฉายแสงยูวีเพื่อให้สารเมทิลีนบลูที่ติดอยู่สลายออกไปให้หมด แล้วทำการทดสอบซ้ำเป็นรอบๆ แสดงดังรูปที่ 3.25 จากการทดสอบ พบว่า หลังจากรอบที่สามเป็นต้นไปประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูค่อนข้างคงที่ แสดงว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีการยึดเกาะที่ดี โดยฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดประมาณ 72.9 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาขั้นต่อไปจะนำฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่มีผลการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด ไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดชีวมิคในน้ำ โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับฟิล์ม TiO_2 และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป



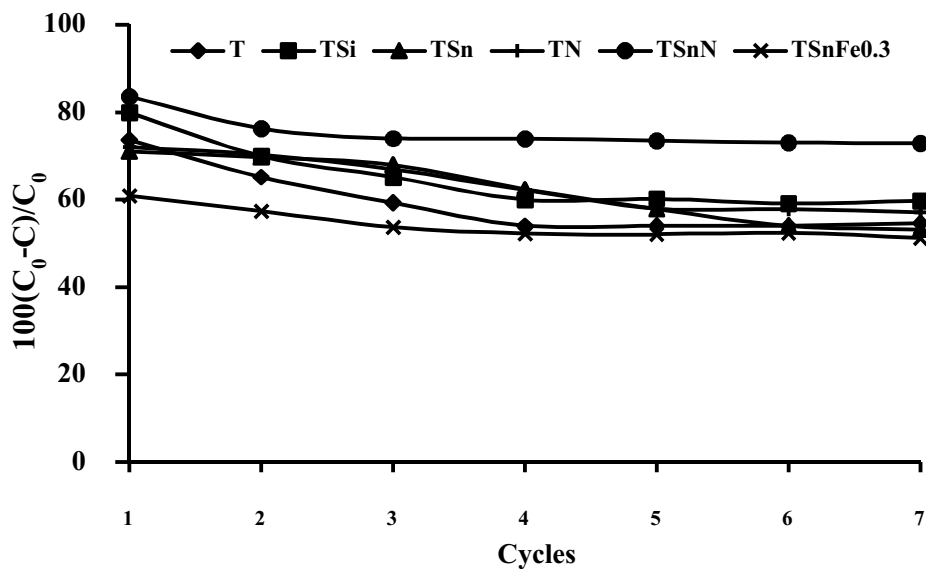
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



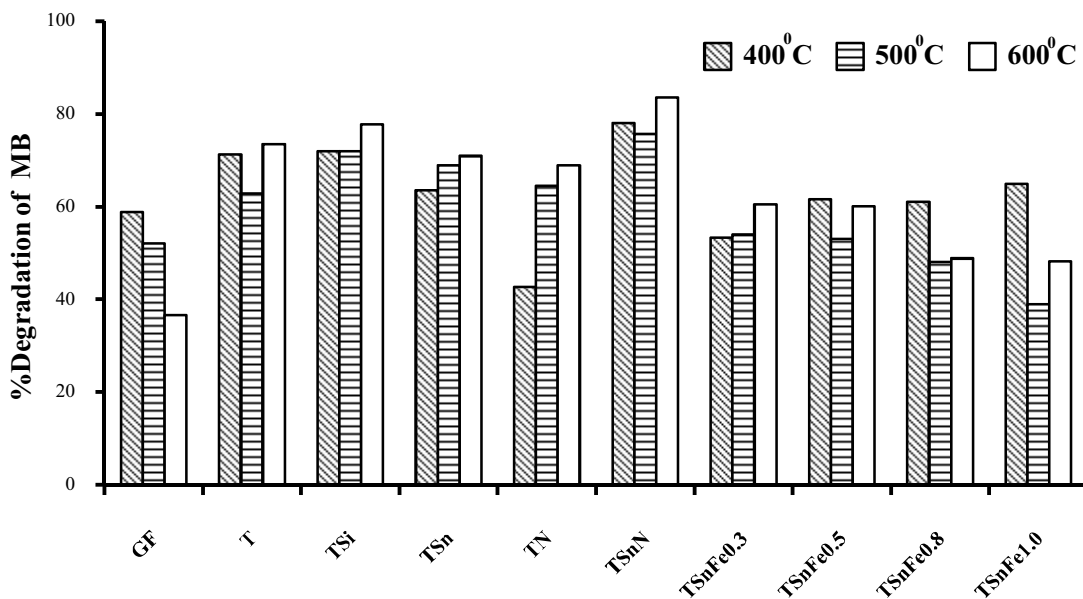
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทัลลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ ภายในเวลา 4 ชั่วโมงของการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทัลลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ ภายในเวลา 4 ชั่วโมงของการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.25 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ



รูปที่ 3.26 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง

ชนิดของฟิล์ม	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ 4 ชั่วโมง(%)		
	400 °C	500 °C	600 °C
UV alone	22.8		
uncoated	58.9	51.2	36.7
TiO ₂	71.3	62.9	73.6
TiO ₂ /5SiO ₂	72.0	72.0	77.8
TiO ₂ /3SnO ₂	63.6	69.0	71.0
TiO ₂ /20N	42.8	64.6	69.0
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	78.1	75.8	83.6
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	53.4	54.0	60.6
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.5Fe ³⁺	61.7	53.1	60.1
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.8Fe ³⁺	61.1	48.1	48.9
TiO ₂ /3SnO ₂ /1.0Fe ³⁺	65.0	39.0	48.3

3.6 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มที่เตรียมได้

ในการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* เมื่อผ่านชุดปฏิกิริยา โดยใช้ฟิล์ม TiO₂, TiO₂/3SnO₂/20N และ TiO₂/3SnO₂/0.3Fe³⁺ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบกับใช้แสงยูวีเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลที่ 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.27 และภาพถ่ายการลดลงของเชื้อ *E.coli* บนอาหารแข็ง Macconkey แต่ละรอบของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.32 จากการทดลอง พบว่า ในรอบที่ 5 ของการทดสอบฟิล์ม TiO₂/3SnO₂/20N สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฟิล์ม TiO₂ และ TiO₂/3SnO₂/0.3Fe³⁺ สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 65 และ 63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้แค่ 11 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใส่แสงยูวีเพียงอย่างเดียวสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 57.3 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวการใช้แสงยูวีเพียงอย่างเดียวสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม TiO₂ และ TiO₂/3SnO₂/0.3Fe³⁺ เนื่องจากปกติแล้วแสงยูวีก็สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้อยู่แล้ว แต่ไม่มีการบดบังแสงของเส้นใยแก้วจึงทำให้ผล

ในการฆ่าเชื้อค่อนข้างสูง ดังนั้นต้องเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เคลือบ ส่วนฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ มีผลในการฆ่าเชื้อได้ดีที่สุด เนื่องจากมีขนาดผลึกที่เล็ก ซึ่งสอดคล้องกับผลการย่อยสลายเมทิลีนบลู

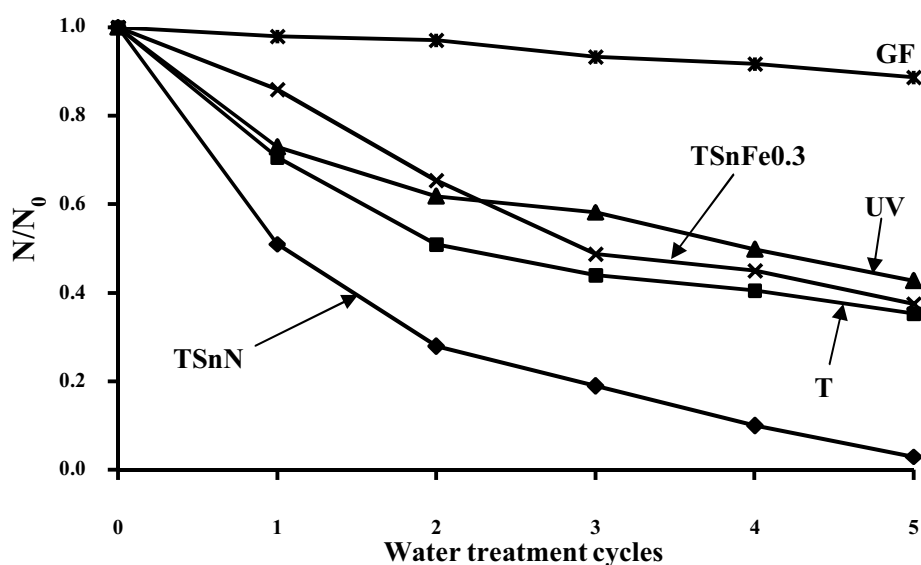
ผลการศึกษาเกี่ยวกับความหนาแน่นของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในหลอดแก้วปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ยที่ 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 30, 60 และ 90 กรัม ผลแสดง ดังรูปที่ 3.28 และภาพถ่ายการลดลงของเชื้อ *E.coli* บนอาหารแข็ง Macconkey แต่ละรอบของการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.33 จากกราฟ พบว่า ปริมาณเส้นใยแก้ว 30 กรัม ให้ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ต่ำที่สุด เพียง 43 เปอร์เซ็นต์ ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อยเกินไป ส่วนปริมาณเส้นใยแก้ว 60 และ 90 กรัม พบว่า ผลฆ่าเชื้อไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 97 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ

ผลการศึกษาเกี่ยวกับกำลังของแสงยูวีที่ใช้ในการทดสอบของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ยที่ 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 90 กรัม โดยแปรผันกำลังของแสงยูวีที่ 20, 40 และ 60 วัตต์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.29 และภาพถ่ายการลดลงของเชื้อ *E.coli* บนอาหารแข็ง Macconkey แต่ละรอบของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.34 จากกราฟ พบว่า กำลังของแสงยูวีที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* สูงขึ้นด้วย ดังนั้นแสดงว่ากำลังของแสงยูวีจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์

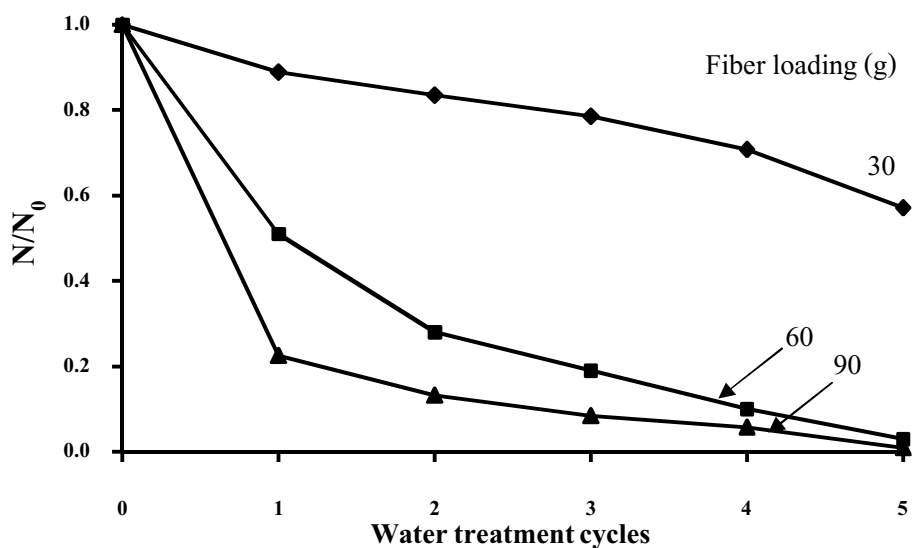
ผลการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ใช้ในการทดสอบฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 90 กรัม หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ โดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำที่ 23.5, 53.6 และ 552.3 มิลลิลิตรต่อนาที ผลแสดงดังรูปที่ 3.30 และภาพถ่ายการลดลงของเชื้อ *E.coli* บนอาหารแข็ง Macconkey แต่ละรอบของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.35 จากกราฟ พบว่า อัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ต่ำลงเนื่องจาก อัตราการไหลที่เร็วทำให้เวลาในการสัมผัสกันของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่อัตราการไหล 23.5 มิลลิลิตรต่อนาที ในรอบที่ 5 ของการทดสอบสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์

ในการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ โดยใช้ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ เสาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบกับใช้แสงฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลที่ 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.31 และภาพถ่ายการลดลงของเชื้อ *E.coli* บนอาหารแข็ง Macconkey แต่ละรอบของการทดสอบ

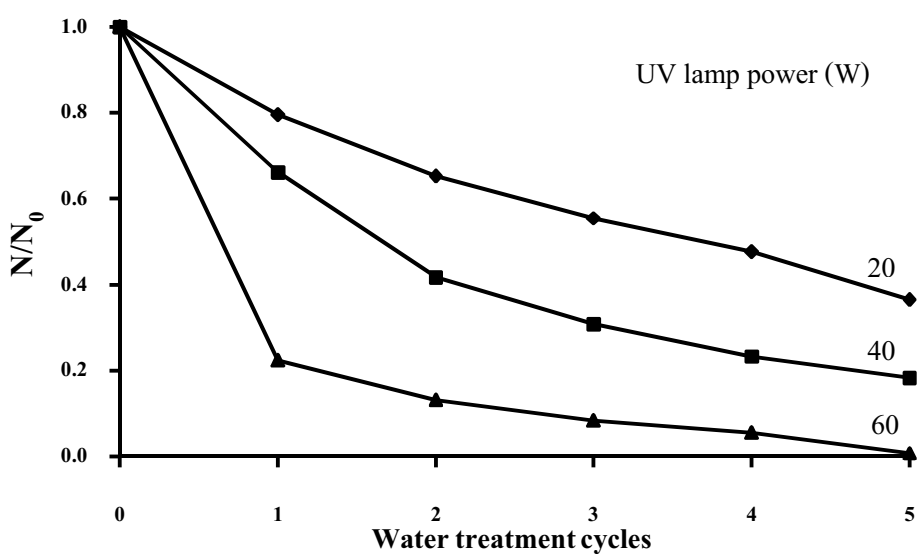
แสดงดังรูปที่ 3.36 ผลการทดลอง พบว่า ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ फिल्म $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ดีที่สุด คือ 59 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการฆ่าเชื้อจะดีกว่า फिल्म TiO_2 และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เนื่องจากการได้ปี Fe^{3+} ทำให้แถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์แคบลงเหลือ 2.6 อิเล็กตรอน โวลต์ (ตารางที่ 3.3) ดังนั้นจึงทำให้ผลการฆ่าเชื้อของ फिल्म $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ มีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้แสงฟลูออเรสเซนต์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับแสงยูวี พบว่า फिल्म $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อดีกว่า फिल्म $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$



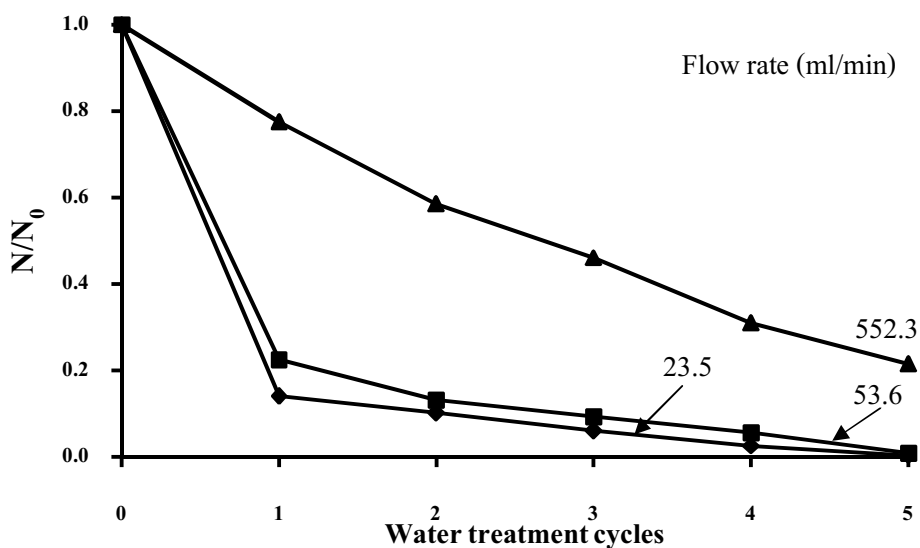
รูปที่ 3.27 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของ फिल्मสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์



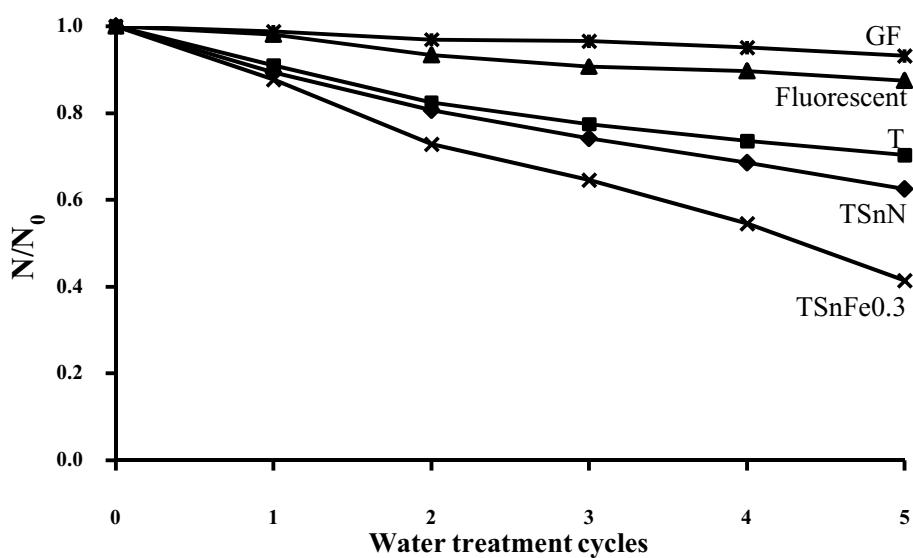
รูปที่ 3.28 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว 30, 60 และ 90 กรัม ความคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์



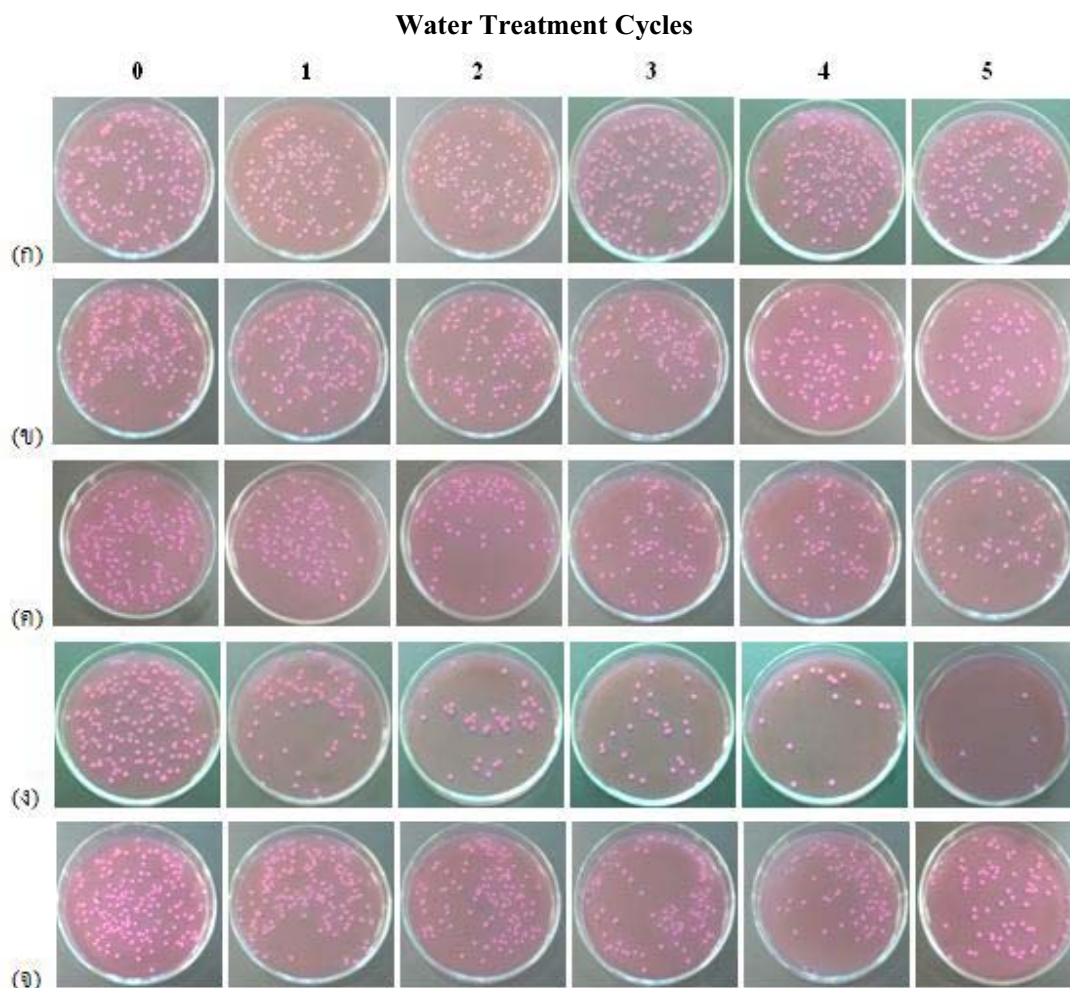
รูปที่ 3.29 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันกำลังของหลอดยูวี 20, 40 และ 60 วัตต์ ความคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม



รูปที่ 3.30 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบโดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำ 23.5, 53.6 และ 552.3 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์

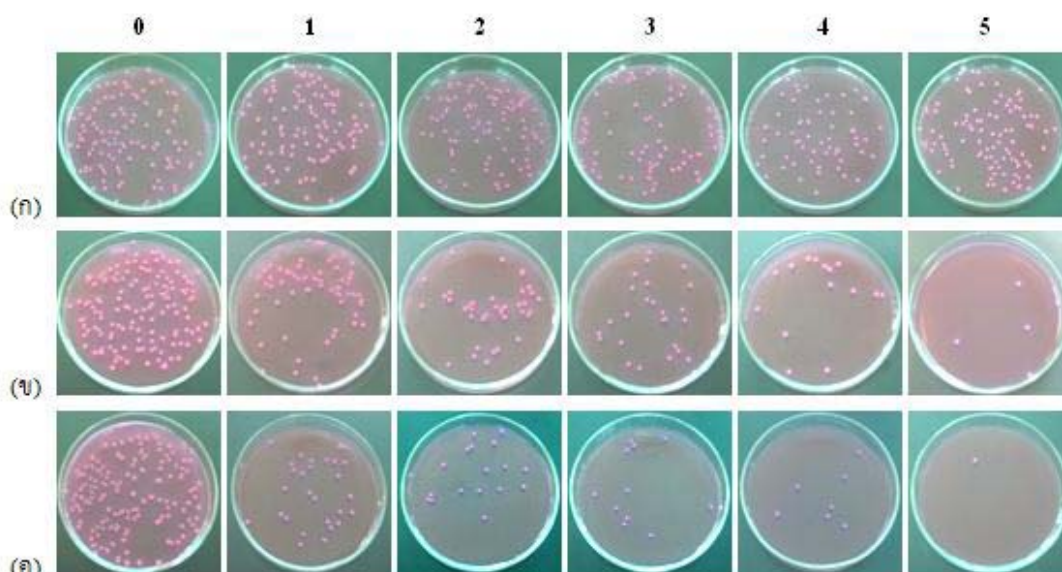


รูปที่ 3.31 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์



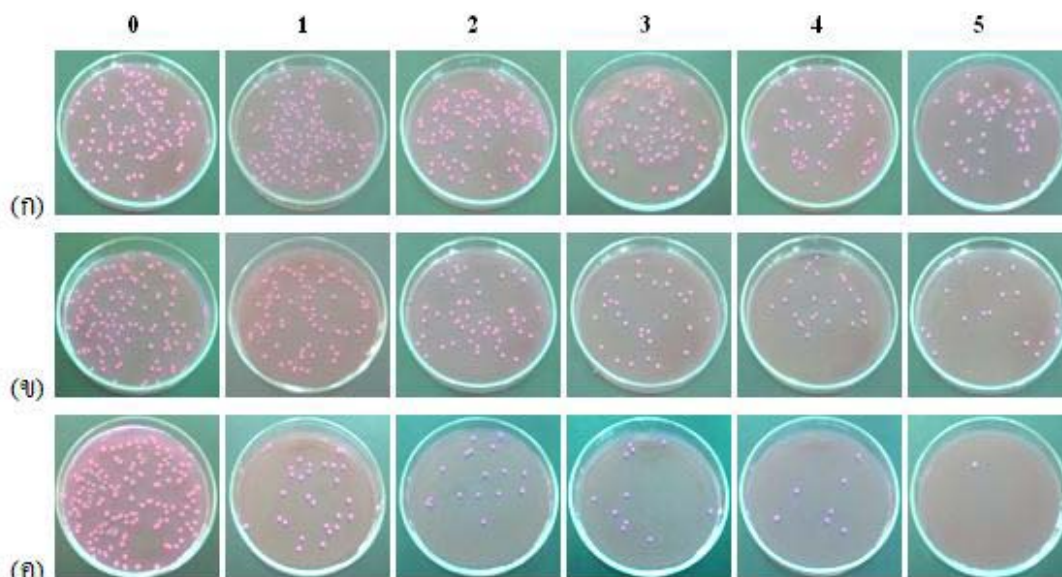
รูปที่ 3.32 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ
 (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) แสงยูวีเพียงอย่างเดียว (ค) TiO_2 (ง) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$
 และ(จ) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์

Water Treatment Cycles

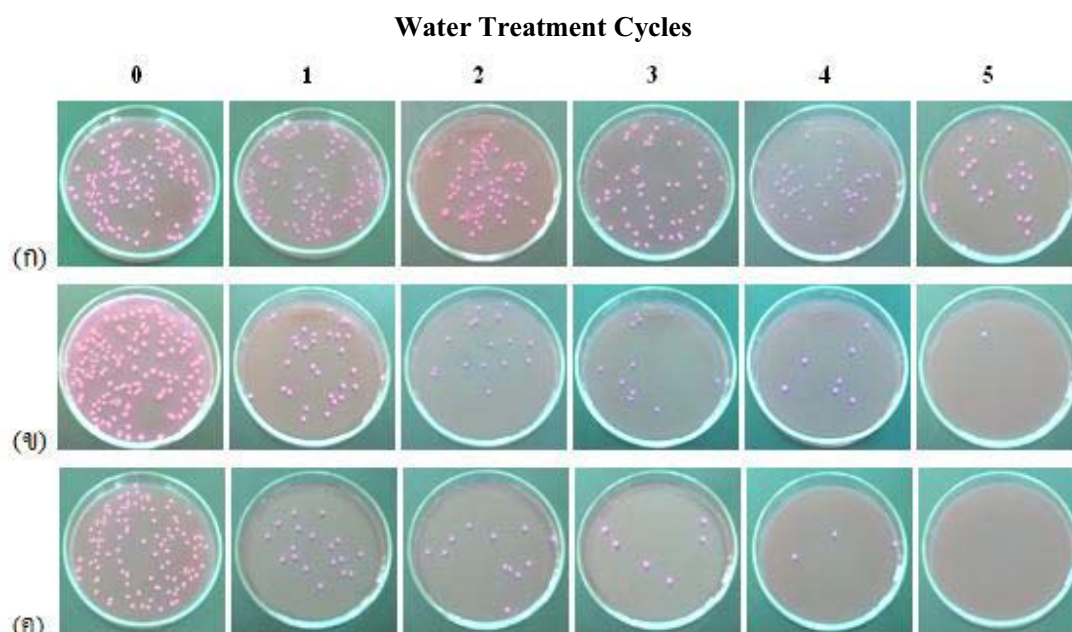


รูปที่ 3.33 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว (ก) 30 (ข) 60 และ (ค) 90 กรัม ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์

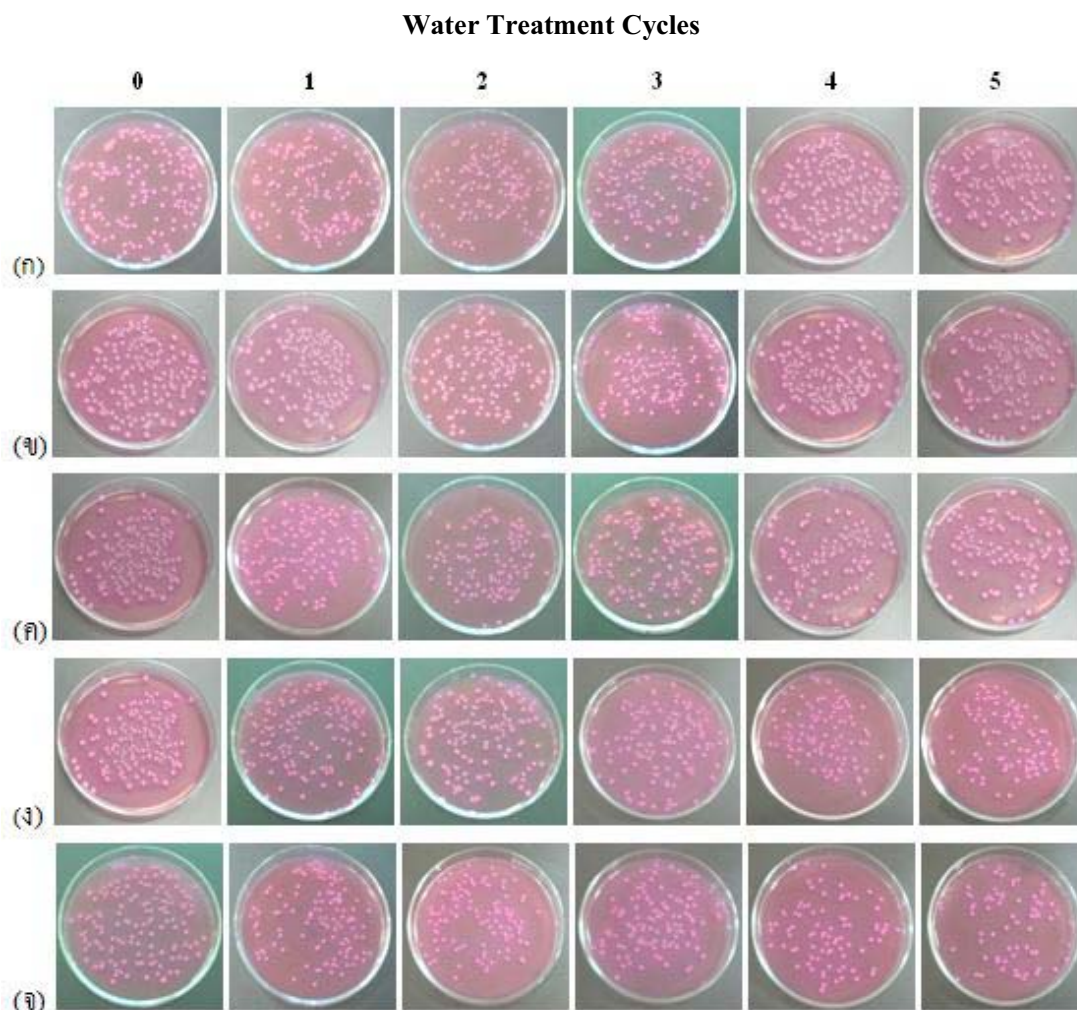
Water Treatment Cycles



รูปที่ 3.34 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันกำลังของหลอดยวี่ (ก) 20 (ข) 40 และ (ค) 60 วัตต์ ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม



รูปที่ 3.35 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันการไหลของน้ำ (ก) 23.5 (ข) 53.6 และ (ค) 552.3 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์



รูปที่ 3.36 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดปฏิบัติการ 0-5 รอบ

(ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) แสงยูวีเพียงอย่างเดียว (ค) TiO_2 (ง) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ และ (จ) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ 60 วัตต์

3.7 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดอิมิกของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

ในการทดสอบการย่อยสลายกรดอิมิกเมื่อผ่านชุดปฏิบัติการ โดยใช้ฟิล์ม TiO_2 , $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ เฝ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบกับใช้แสงยูวีเพียงอย่างเดียว โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลที่ 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.37 จากการทดลองพบว่า ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ สามารถย่อยสลายกรดอิมิกได้

75.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฟิล์ม TiO_2 และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ สามารถย่อยสลายกรดซิวมิกได้ 48.6 และ 40.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบสามารถย่อยสลายกรดซิวมิกได้แค่ 10.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใส่แสงยูวีเพียงอย่างเดียวสามารถย่อยสลายกรดซิวมิกได้ 8.7 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* แสดงดังตารางที่ 3.6 พบว่า มีผลสอดคล้องกับการฆ่าเชื้อ *E.coli* แต่การใส่แสงยูวีเพียงอย่างเดียวสามารถย่อยสลายกรดซิวมิกได้ใกล้เคียงกับเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ เนื่องจากแสงยูวีก็สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้อยู่แล้ว ซึ่งผลการย่อยสลายกรดซิวมิกดังกล่าวสอดคล้องกับการย่อยสลายเมทิลีนบลู

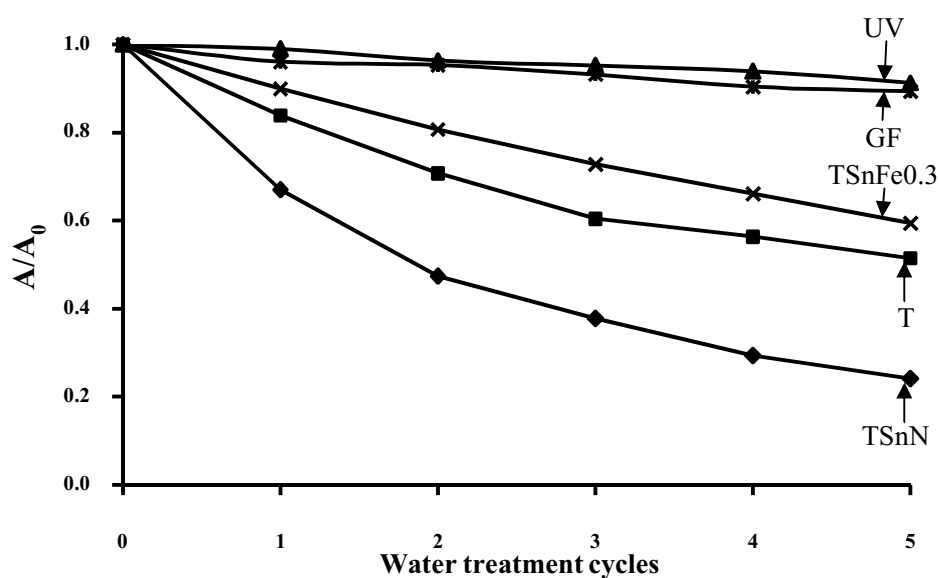
ผลการศึกษาเกี่ยวกับความหนาแน่นของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดซิวมิกในหลอดแก้วปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ยที่ 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 30, 60 และ 90 กรัม ผลแสดงดังรูปที่ 3.38 จากกราฟ พบว่า ปริมาณเส้นใยแก้ว 30 กรัม ให้ผลการย่อยสลายกรดซิวมิกต่ำที่สุด เพียง 40.0 เปอร์เซ็นต์ ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อยเกินไป ส่วนปริมาณเส้นใยแก้ว 60 และ 90 กรัม พบว่า ผลไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสามารถการย่อยสลายกรดซิวมิกได้ 75.9 และ 85.4 เปอร์เซ็นต์ ในรอบที่ 5 ตามลำดับ ของการทดสอบผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการฆ่าเชื้อ *E.coli*

ผลการศึกษาเกี่ยวกับกำลังของแสงยูวีที่ใช้ในการทดสอบของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดซิวมิก ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ยที่ 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 90 กรัม โดยแปรผันกำลังของแสงยูวีที่ 20, 40 และ 60 วัตต์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.39 จากกราฟ พบว่า กำลังของแสงยูวีที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดซิวมิกสูงขึ้นด้วย ดังนั้นแสดงว่ากำลังของแสงยูวีจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการฆ่าเชื้อ *E.coli*

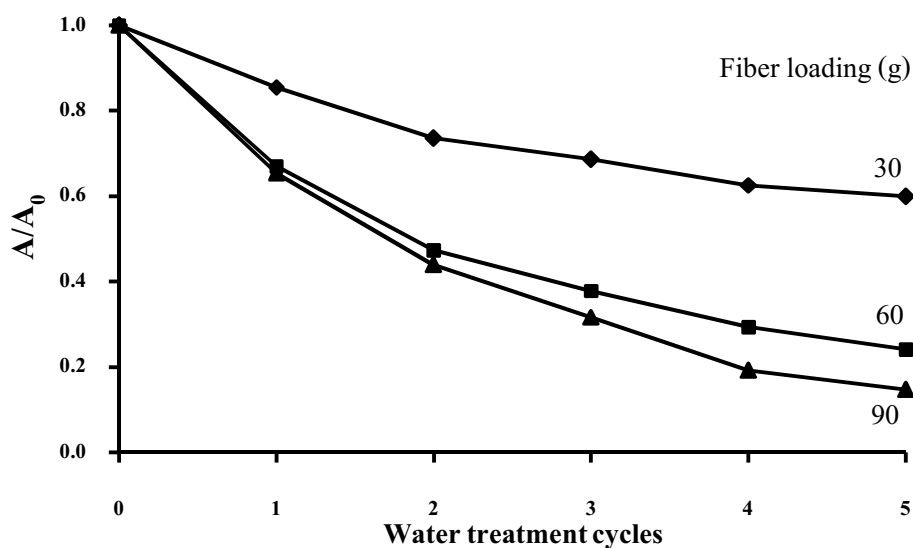
ผลการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ใช้ในการทดสอบฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดซิวมิก ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 90 กรัม หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ โดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำที่ 22.1, 51.2 และ 542.9 มิลลิลิตรต่อนาที ผลแสดงดังรูปที่ 3.40 พบว่า อัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดซิวมิก ต่ำลงเนื่องจาก อัตราการไหลสูงทำให้การสัมผัสกันของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่อัตราการไหล 22.1 มิลลิลิตรต่อนาที ในรอบที่ 5 ของการทดสอบสามารถย่อยสลายกรดซิวมิกได้ 90.6 เปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการฆ่าเชื้อ *E.coli*

ในการทดสอบการย่อยสลายกรดซิวมิก เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ โดยใช้ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ เพาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเส้นใย

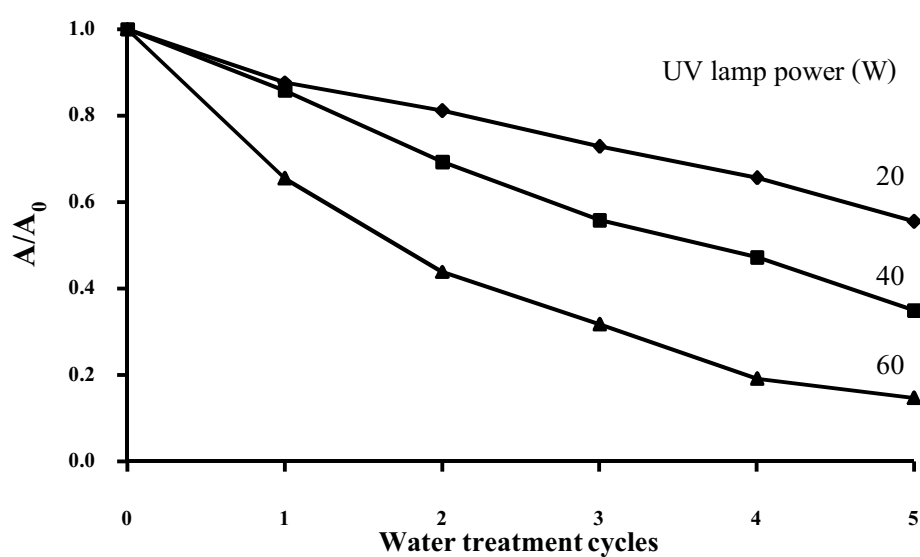
แก้วที่ไม่ได้เคลือบกับใช้แสงฟลูออเรสเซนซ์เพียงอย่างเดียวโดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลที่ 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนซ์ขนาด 60 วัตต์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.41 ผลการทดลอง พบว่า ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ फिल्म $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ สามารถย่อยสลายกรดฮิวมิก ได้ดีที่สุด คือ 38.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการย่อยสลายกรดฮิวมิก จะดีกว่าฟิล์ม TiO_2 และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เนื่องจากการได้ไป Fe^{3+} ทำให้แถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์แคบลงเหลือ 2.6 อิเล็กตรอน โวลต์ (ตารางที่ 3.3) ซึ่งดูดซับความยาวคลื่น Visible light ได้ดี ดังนั้นจึงทำให้ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ มีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้แสงฟลูออเรสเซนซ์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับแสงยูวี พบว่า फिल्म $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดฮิวมิกดีกว่าฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการฆ่าเชื้อ *E.coli*



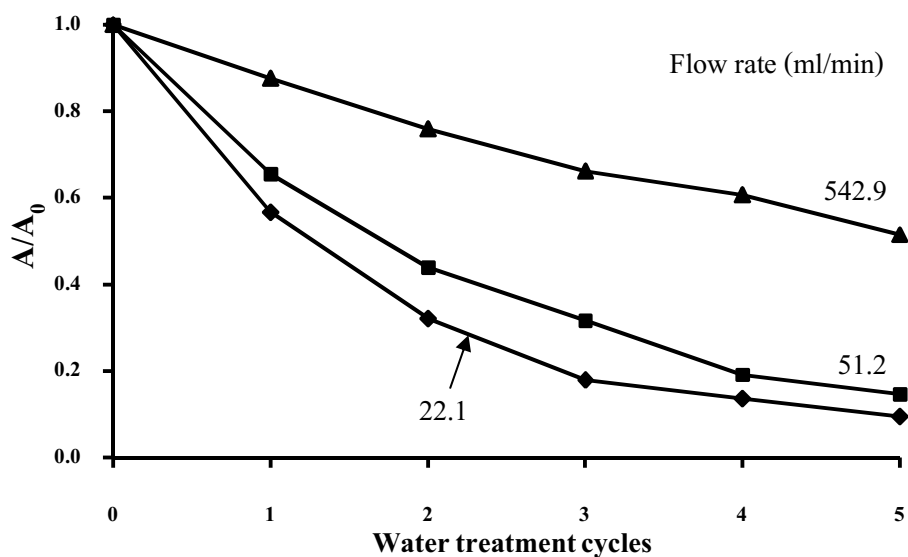
รูปที่ 3.37 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์



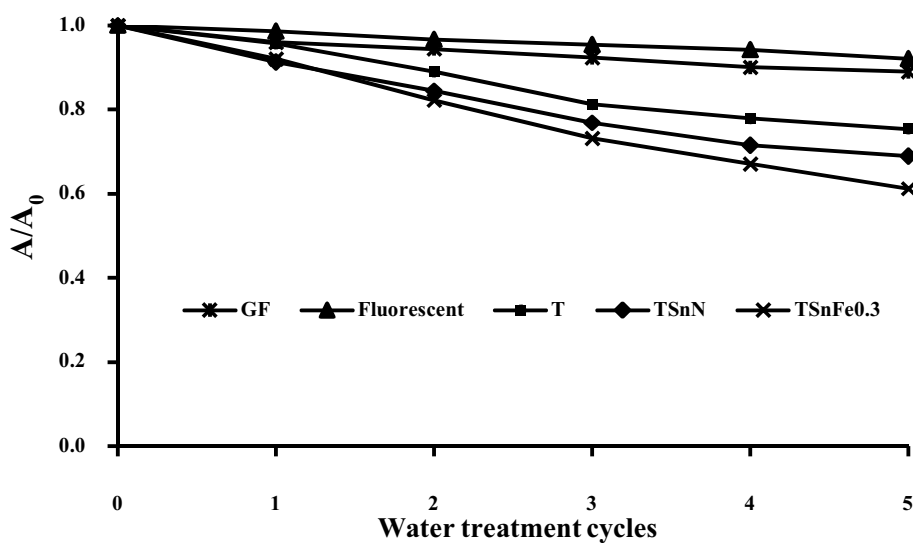
รูปที่ 3.38 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิคของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว 30, 60 และ 90 กรัม ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์



รูปที่ 3.39 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิคของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบ โดยแปรผันกำลังของหลอดยูวี 20, 40 และ 60 วัตต์ ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม



รูปที่ 3.40 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 0-5 รอบโดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำ 22.1, 51.2 และ 542.9 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์



รูปที่ 3.41 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์

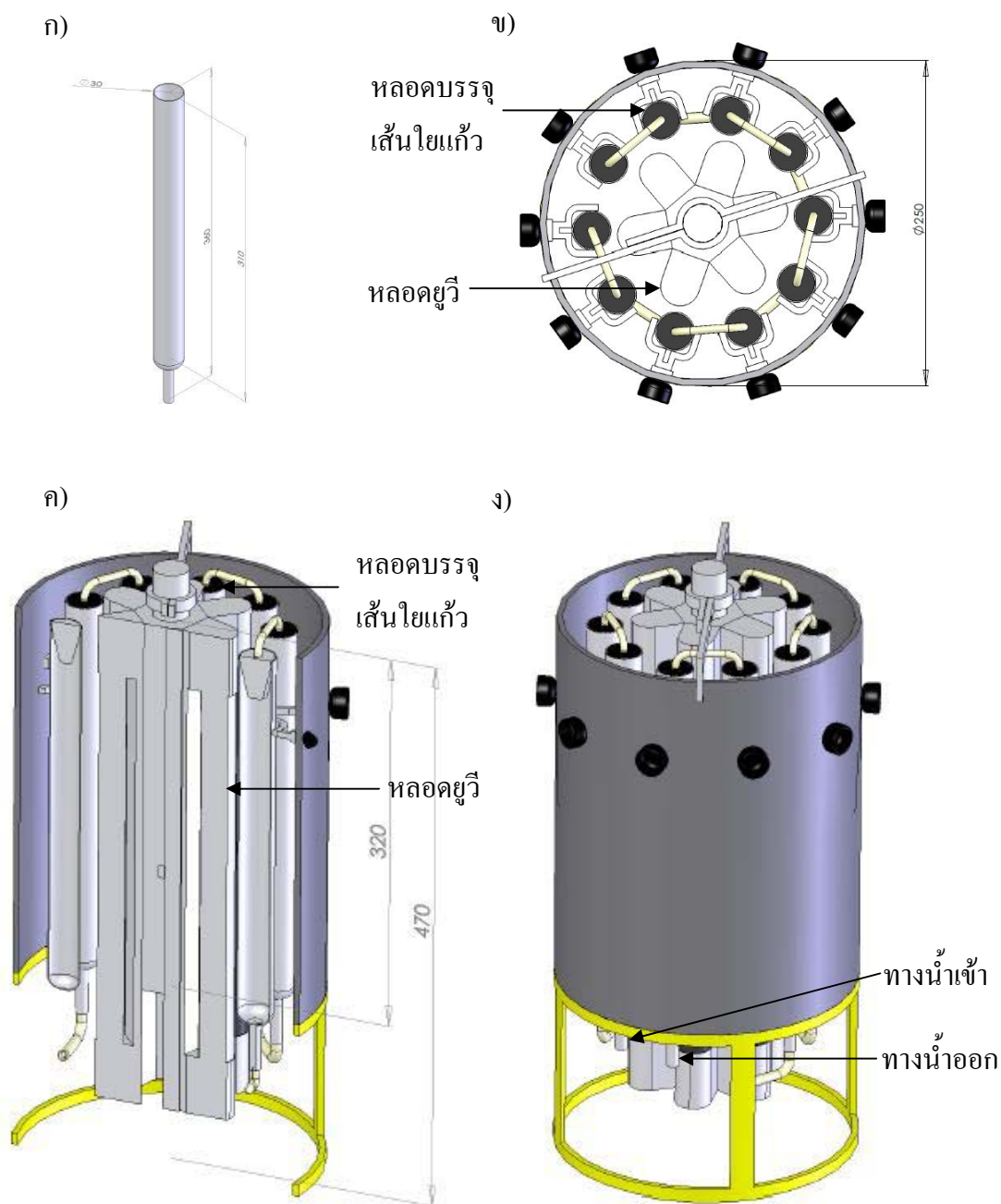
ตารางที่ 3.6 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* และการสลายกรดฮิวมิกในน้ำ ในรอบที่ 5 ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลที่ 53.6 และ 51.2 มิลลิลิตรต่อนาที

ชนิดของฟิล์ม	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E. Coli</i> ที่ 5 รอบ (%)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายกรดฮิวมิกที่ 5 รอบ (%)
UV alone	57.3	8.7
uncoated	11.0	10.7
TiO ₂	65.0	48.6
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	97.0	75.9
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	62.0	40.6

3.8 การออกแบบและการทดสอบชุดปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำ

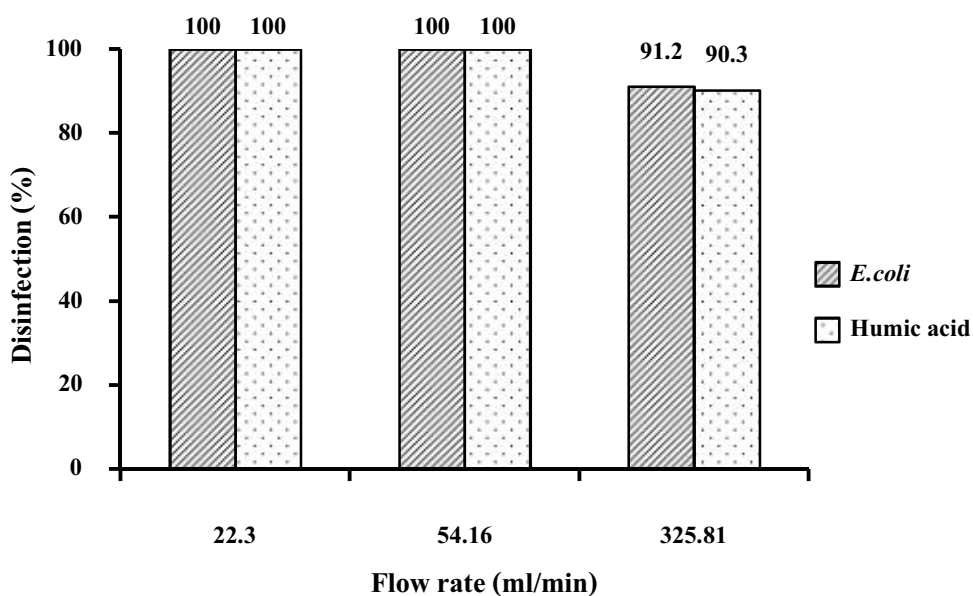
จากข้อมูลผลการศึกษา ชนิดของฟิล์ม ปริมาณของเส้นใยแก้วที่เคลือบ กำลังของหลอดยูวี อัตราการไหลของน้ำในการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิก พบว่า ภาวะที่ให้ค่าสูงสุด คือ ฟิล์ม TiO₂/3SnO₂/20N ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม หรือความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ภายใต้ภาวะยูวีขนาดกำลัง 60 วัตต์ อัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง 22-25 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการ fit curve ของการฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้ภาวะดังกล่าวได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชัน exponential $y = e^{-1.06n}$ (เมื่อ y คือ สัดส่วนระหว่าง N/N_0 , n คือ จำนวนรอบในการทดสอบ $R^2 = 0.917$) ส่วนผลการสลายกรดฮิวมิกภาวะดังกล่าวได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชัน exponential $y = e^{-0.50n}$ (เมื่อ y คือ สัดส่วนระหว่าง A/A_0 , n คือ จำนวนรอบในการทดสอบ $R^2 = 0.978$) ในรอบที่ 5 ของการทดสอบ พบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ สลายกรดฮิวมิกได้ 90.6 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบชุดปฏิกรณ์ในการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิก โดยเพิ่มหลอดแก้วที่บรรจุเส้นใยแก้วให้มีปริมาตรรวมอย่างน้อย 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยให้น้ำไหลอย่างต่อเนื่องผ่านชุดปฏิกรณ์เพียงรอบเดียว ภาพแสดงการออกแบบชุดปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.42ก-ง โดยรูปที่ 3.42ก คือ หลอดแก้วที่บรรจุเส้นใยแก้ว โดยหลอดแก้วมีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในเคลือบด้วยสารเคลือบ TiO₂/3SnO₂/20N และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รูปที่ 3.42ข เป็นภาพจากด้านบน แสดงให้เห็นถึงหลอดแก้วที่มีการวางระยะห่างสม่ำเสมอ ถูกเชื่อมต่อกันด้วยท่อยางให้น้ำไหลผ่านแต่ละหลอดแก้วทุกหลอด โดยมีหลอดไฟอยู่ใจกลางของเครื่องปฏิกรณ์ รูปที่ 3.42ค เป็นภาพตัดขวางจากด้านบน และรูปที่ 3.42

เป็นภาพชุดปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ ชุดปฏิกรณ์ประกอบด้วยหลอดแก้วที่บรรจุเส้นใยแก้วอยู่รอบๆ 10 หลอด แต่ละหลอดมีเส้นใยแก้วที่เคลือบฟิล์ม $TiO_2/3SnO_2/20N$ มีความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กลางชุดปฏิกรณ์มีหลอดไฟขนาด 10 วัตต์ จำนวน 6 หลอด

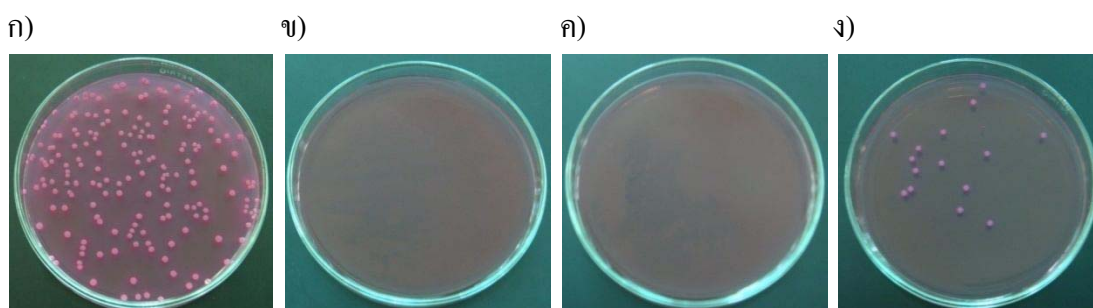


รูปที่ 3.42 การออกแบบชุดปฏิกรณ์ ก) หลอดแก้ว ข) ภาพจากด้านบน ค) ภาพตัดขวางจากด้านข้าง ง) ภาพชุดปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์

เมื่อนำเครื่องปฏิกรณ์ไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ โดยให้น้ำไหลอย่างต่อเนื่องผ่านชุดปฏิกรณ์เพียงครั้งเดียว ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 22.03, 54.16 และ 325.81 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.43 จากกราฟ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 22.03 และ 54.16 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนอัตราการไหลของน้ำที่ 325.81 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ 91.2 และ 90.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 3.44ก-ง



รูปที่ 3.43 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ กัน



รูปที่ 3.44 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ กัน ก) ปริมาณเชื้อตั้งต้น ข) 22.03 ค) 54.16 และ ง) 325.81 มิลลิลิตรต่อนาที

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การวิจัยนี้ได้พัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด้ปด้วย SiO_2 , SnO_2 , N และ SnO_2 ร่วมกับ N และ Fe^{3+} แล้วเคลือบลงบนเส้นใยแก้ว นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู ฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิคในน้ำ ซึ่งผลชนิดของตัวโด้ป อุณหภูมิในการเผา ปริมาณตัวโด้ป มีผลต่อสมบัติของสารเคลือบที่พัฒนาได้ ดังนี้

สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด้ปด้วย SiO_2 , SnO_2 , N และ SnO_2 ร่วมกับ N และ Fe^{3+} เผาฟิล์มที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะพบเฉพาะเฟสอะนาเทสเท่านั้น ส่วนการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส การโด้ปด้วยสารต่างๆ เข้าไปทำให้ได้เฟสอะนาเทสที่เสถียรขึ้น

อุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูงขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิเผา 600 องศาเซลเซียส แสดงประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูงกว่า 500 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด้ปด้วย SnO_2 ร่วมกับ Fe^{3+} ทำให้แถบช่องว่างพลังงานแคบลง โดยพบว่า ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีแถบช่องว่างพลังงานเพียง 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อปริมาณ Fe^{3+} และอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นทำให้แถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์แคบลงด้วย

สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด้ปด้วย SnO_2 ร่วมกับ Fe^{3+} แสดงประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ต่ำกว่าการโด้ปด้วยสารตัวอื่น และปริมาณ Fe^{3+} ที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะลดลงด้วย

สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด้ปด้วย SnO_2 ร่วมกับ N แสดงประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการโด้ปด้วยสารตัวอื่น โดยสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู ได้ถึง 83.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบที่ 4 ชั่วโมง ซึ่งดีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเติมที่สามารถย่อยสลายได้เพียง 71.3 เปอร์เซ็นต์

จากผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$, $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ และ ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเติม พบว่า ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ดีที่สุด คือ 97.0 และ 75.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อกระตุ้นด้วยแสงแสงยูวี โดยผ่านชุดปฏิกรณ์ 5 รอบ แต่เมื่อกระตุ้นด้วยแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่า ฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.3\text{Fe}^{3+}$ สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ดีกว่า

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/20\text{N}$ ได้แก่ ปริมาณของเส้นใยแก้วที่เคลือบ กำลังของหลอดยูวีและอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม กำลังของหลอดไฟ 60 วัตต์ ให้ผลดีที่สุด โดยปริมาณเส้นใยแก้วและกำลังของหลอดยูวีมากกว่าจะส่งผลให้สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ดีกว่า ส่วนอัตราการไหลของน้ำที่ต่ำกว่าทำให้ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ดีกว่า โดยพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำที่ 22-25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยผ่านชุดปฏิกรณ์ 5 รอบ สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ 100.0 และ 90.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบชุดปฏิกรณ์ได้ โดยเพิ่มหลอดแก้วที่บรรจุเส้นใยแก้วให้มีปริมาตรรวมอย่างน้อย 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กำลังของหลอดยูวี 60 วัตต์ อัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง 22-25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยให้น้ำไหลอย่างต่อเนื่องผ่านชุดปฏิกรณ์เพียงครั้งเดียว

เมื่อนำชุดปฏิกรณ์ไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกในน้ำ โดยอัตราการไหลของน้ำที่ 22.03 และ 54.16 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิกได้ 100 เปอร์เซ็นต์

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการย่อยสลายไตรฮาโลมีเทนและคลอรีนอิสระในน้ำด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์
2. ควรนำข้อมูลในการออกแบบชุดปฏิกรณ์ไปสร้างเพื่อใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม
3. ควรพัฒนาต่อโดยอาจจะเปลี่ยนจากเส้นใยแก้วเป็นวัสดุอย่างอื่นที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น
4. ควรพัฒนาต่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำงานให้มีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้แหล่งกำเนิดจากแสงยูวี

5. ควรมีการทดสอบการยึดเกาะของโพลีเอทิลีนไดออกไซด์บนเส้นใยแก้ว
6. ควรมีการพัฒนาต่อโดยเพิ่มหลอดแก้วให้มากขึ้นแล้วทำการศึกษาที่อัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังผลิตให้สามารถใช้งานได้จริง

บรรณานุกรม

- กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข สถานการณ์น้ำสะอาดเพื่อการบริโภคในประเทศไทย. กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ ส่วนพัฒนาคุณภาพน้ำบริโภค
- http://203.157.64.28/ewt/foodsant_web/download/waterSituation15Feb53.doc. (สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2553).
- ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์. 2550. ไทเทเนียม: ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>. (สืบค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2552).
- ปิยรัตน์ สารวงศ์. การกำจัดกรดซัลฟิวริกในน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโคโตะแซนและเบนโทไนด์. สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2545.
- พรนภา สุจริตวรกุล. ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์กับชีวิตประจำวัน *วารสารเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุ*. 2548, 40, 77.
- ราชัน ธีระพิทยาตระกูล. การก่อตัวของไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มของระบบประปาชนบทในจังหวัดนครราชสีมา. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2545.
- เล็ก สีกง. *วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม*. หน่วยโสตทัศนศึกษา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 2547.
- วรพจน์ กนกกันตพงษ์ บุญฤทธิ์ ปัญญาภิโยชผล สุรพงษ์ วัฒนจิระ และ ประเสริฐ ภาวสันต์. สารที่มีศักยภาพในการก่อกัมเริงในน้ำประปากรุงเทพมหานคร. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 8-10 มีนาคม, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย 2549.
- สุจิตรา นาวรัตน์. การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีและการเติมคลอรีน วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2553.

อรอนงค์ รัชตราชนชัย. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโรคติดเชื้อและพาหะนำโรค.

http://webdb.dmhc.moph.go.th/ifc_niha_nih_1_001c.aspx?info_id=1079.htm (สืบค้นเมื่อ 5 สิงหาคม 2552)

- Agustina, T.E.; Ang, H.M., Vareek, V.K. A Review of Synergistic Effect of Photocatalysis and Ozonation on Wastewater Treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. **2006**, 6, 264–273.
- Bing-Nan, L.; Woei-Deng, L.; Jie-Chung, L. Photocatalytic Decolorization of Methylene Blue in Aqueous TiO₂ Suspension. *Environmental Engineering Science*. **1999**, 16(3), 165-175.
- Blake, D.M.; Maness, P.C.; Huang, Z.; Wolfrum, E.J.; Huang, J., Jacoby, W.A. Application of the Photocatalytic Chemistry of Titanium Dioxide to Disinfection and the Killing of Cancer Cells. *Separation and Purification Methods*. **1999**, 28(1), 1-5.
- Blazkova, A.; Csölleová, I.; Brezová, V. Effect of Light Sources on the Phenol Degradation using Pt/ TiO₂ Photocatalysts Immobilized on Glass Fibres. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **1998**, 113, 251-256.
- Brinker, C.J.; Scherer, G.W. Sol-Gel Science-The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press, New York, 1990.
- Bolton, J.R.; Cater, S.R. Homogeneous Photodegradation of Pollutants in Contaminated Water. an Introduction. 1994, 467-490.
- Byrne, J.A.; Eggins, B.R.; Brown, N.M.D.; McKinney, B.; Rouse, M. Immobilisation of TiO₂ Powder for the Treatment of Polluted Water. *Application Catalysis B: Environmental*. **1998**, 17, 25-36.
- Chrisopher, R.; Daniel, A. Surface Water Treatment for Communities in Developing Country. University of North Caroolina at Chapel Hill. 1992.
- Chungsiriporn, J.; Bunyakan, C.; Intamanee, J. Photocatalytic Oxidation of Toluene in Waste Air with TiO₂ Catalyst. *TISD2008*. **2008**, 546-550.
- Delai Sun, D.; Hwa Tay, J.; Min Tan, K. Photocatalytic Degradation of *E. coliform* in Water. *Water Rersearch*. **2003**, 37, 3452-3462.

- Edzward, G.E.; Amirtharajah.. Removal Color Caused by Humic Acide. *Journal American Water Works Association*. **1985**, 77(3), 50-57.
- Emmanuil, S.T.; Konstantina, T.; Nikolaos, P.X.; Nikolalaos, P.N.; Evan, D., Dionissios, M. Simultaneous Photocatalytic Oxidation of As(III) and Humic Acid in Aqueous TiO₂ Suspensions. *Journal of Hazardous Materials*. **2009**, 169, 376-385.
- Fox, M.A.; Duley, M.T. Heterogeneous Photocatalysis. *Chemical Reviews*. **1993**, 93, 341-357.
- Fujishima, A.; Rao, T.N.; Tryk, D.A. Titanium Dioxide Photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C:Photochemistry Reviews*. **2000**, 1(1), 1-21.
- Geng, J.; Yang, D.; Zhu, J.; Chen, D.; Jiang, Z. Nitrogen-Doped TiO₂ Nanotubes with Enhanced Photocatalytic Activity Synthesized by a Facile Wet Chemistry Method. *Materials Research Bulletin*. **2000**, 44, 146-150.
- Hatch, G.L.; Steinhardt, M.D.; Kurth, M.J.; Anderson, M.A. Photocatalytic Water Treatment Apparatus. U.S. Patent 0231470A1, October 19, 2006.
- Hoffman, M.R.; Martin, S.T.; Choi, W, Bahnemannt, D.W. Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chemical Reviews*. **1995**, 95, 69-96.
- Hong, W.J.; Kang, M. The Super-Hydrophilicities of Bi–TiO₂, V–TiO₂, and Bi–V–TiO₂ Nano-Sized Particles and Their Benzene Photodecompositions with H₂O addition. *Materials Letters*. **2006**, 60, 1296–1305.
- Hou, L.R.; Yuan, C.Z.; Peng, Y. Synthesis and Photocatalytic Property of SnO₂/TiO₂ Nanotubes Composites. *Journal of Hazardous Materials*. **2007**, B139, 310-315.
- Hubbell, D.A.; Hubbell, M.C. 2005. Environmental Coatings Assemblies. U.S. Patent 0159309, July 21, 2005.
- In G.R.; Helz, R.G.; Zepp., D.G. Crosby (Eds), Aquatic and Surface Photochemistry. *Lewis Publishers*, USA.
- Jiaqing, G.; Dong, Y.; Juhong, Z.; Daimei, C.; Zhongyi, J. Nitrogen-Doped TiO₂ Nanotubes with Enhanced Photocatalytic Activity Synthesized by a Facile Wet Chemistry Method. *Materials Research Bulletin* **2009**, 44, 146–150.

- Kanai, N.; Nuida, T.; Ueta, K.; Hashimoto, K.; Watanabe, T.; Ohsaki, H. Photocatalytic Efficiency of TiO₂/SnO₂ Thin Film Stacks Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Vacuum*. **2004**, *74*, 723-727.
- Kuo, C.N.; Chen, H.F.; Lin, J.N.; Wan, B.Z. Nano-Gold Supported on TiO₂ Coated Glass Fiber for Removing Toxic CO Gas from Air. *Catalysis Today*. **2007**, *122*, 270-276.
- Li, X.Z.; Li, F.B.; Fan, C.M.; Sun, Y.P. Enhancement of Photocatalytic Oxidation of Humic Acid in TiO₂ Suspensions by Increasing Cation Strength. *Chemosphere*. **2002**, *48*, 453-460.
- Liu, Q.; Wu, X.; Wang, B.; Liu, Q. Preparation and Super-Hydrophilic Properties of TiO₂/SnO₂ Composite Thin Film. *Materials Research Bulletin*. **2002**, *37*, 2255-2262.
- Liuxue, Z.; Peng, L.; Zhixing, S. Photocatalytic Anatase Thin Film Coated PAN Fiber Prepared at Low Temperature. *Materials Chemistry and Physics*. **2006**, *98*, 111-115.
- Liuxue, Z.; Xiulian, W.; Peng, L.; Zhixing, S. Low Temperature Deposition of TiO₂ Thin on Polyvinyl Alcohol Fibers with Photocatalytical and Antibacterial Activities. *Applied Surface Science*. **2008**, *254*, 1771-1774.
- Lonnen, J.; Kilvington, S.; Kehoe, S.C.; Al-Touati, F.; McGuigan, K.G. Solar and Photocatalysis Disinfection of Protozoan, Fungal and Bacterial Microbes in Drinking Water. *Water research*. **2005**, *39*, 877-883.
- Michael, S. Metal Oxide Photocatalysis. 2009.
<http://photochemistryportal.net/home/index.php/2009/09/30/metal-oxide-photocatalysis/>.(accessed August 7, 2010).
- Ollis, D.F.; Pelizzetti, E.; Serpone, N. Photocatalyzed Destruction of Water Contaminants. *Environmental Science & Technology*. **1991**, *25*(9), 1522-1529.
- Onodera, S.; Siriwong, C.; Tabucanon, M. Comparison of Method for Determination of Trihalomethane in Drinking Water Detoxification. *Science and Social Thailand Jour*. **1984**, *10*, 221-237.
- Paleologou, A.; Marakas, H.; Nikolaos, P.; Moya, A.; Vergara, Y.; Kalogerakis, N. Disinfection of Water and Wastewater by TiO₂ Photocatalysis, Sonolysis and U-VC Irradiation. *Catalysis Today*. **2007**, *129*, 136-142.

- Peill, N.J.; Hoffman, M.R. TiO₂-Coated Fiber Optic Cable Reactor. U.S. Patent 5,875,384, February 23, 1999.
- Piscopo, A.; Robert, D.; Marzolin, C.; Weber, J.V. TiO₂ Supported on Glass Fiber for the Photocatalytic Degradation of Benzamide. *Journal of Materials Science Letters*. **2000**, 19, 683-684.
- Rao, A.R.; Dutta, V. Low-Temperature Synthesis of TiO₂ Nanoparticles and Preparation of TiO₂ Thin Films by Spray Deposition. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. **2007**, 91, 1075-1080.
- Reutergardh, L.B.; Langphassuk, M. Photocatalytic Decolourization of Reactive Azo Dye: a Comparison Between TiO₂ and CdS Photocatalysis. *Chemosphere*. **1997**, 35(3), 585-596.
- Sayıkan, F.; Asilturk, M.; Tatar, P.; Kiraz, N.; Arpac, E.; Sayıkan, H. Photocatalytic Performance of Sn-Doped TiO₂ Nanostructured Mono and Double Layer Thin Films for Malachite Green Dye Degradation under UV and Vis-Lights. *Journal of Hazardous Materials*. **2007**, 144, 140-146.
- Senthilnathan, J.; Philip, L. Photocatalytic Degradation of Lindane under UV and Visible Light using N-Doped TiO₂. *Chemical Engineering Journal*. **2010**, 161, 83-92.
- Serpone, N.; Pelizzetti, E.. Photocatalysis fundamental and application (Eds.), Wiley, New York. 1989.
- Stafford, U.; Gray, K.A.; Kamat, P.V. Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants : Halophenols and Related Model Compound. *Heterogen Chemical Reviews*. **1996**, 3, 77-104.
- Subrahmanyam, M.; Boule, P.; Durga Kumari, V.; Naveen Kumar, D.; Sancelme, M.; Rachel, A. Pumice Stone Supported Titanium Dioxide for Removal of Pathogen in Drinking Water and Recalcitrant in Wastewater. *Solar Energy*. **2008**.
- Tang, W.Z.; Zhang, Z.; An, H.; Quintana, M.O.; Torres, D.F. Photodegradation of Azo Dyes in Aqueous Solution. *Environmental Technology*. **1997**, 18, 122.
- Tinsley, I.J. Chemical Concept in Pollutant Behavior. New York:Wiley. 1979.
- Tryba, B. Immobilization of TiO₂ and Fe-C-TiO₂ Photocatalysts on the Cotton Material for Application in a Flow Photocatalytic Reactor for Decomposition of Phenol in Water. *Journal of Hazardous Material*. **2008**, 151, 623-627.

- Tseng, J.M.; Huang, C.P. Removal of Chlorophenols from Water by Photocatalytic Oxidation. *Water Science Technology*. **1991**, 23, 377-387.
- USEPA. Stage 2 Disinfectants and Disinfection by Product Rule (Stage 2 DBP rule). 2006.
<http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/www.epa.gov/safewater/stage2/index.html> (accessed August 7, 2010).
- Venkatadri, R.; Peters, R.W. Chemical Oxidation Technologies: Ultraviolet Light/Hydrogen Peroxide, Fenton's Reagent, and Titanium Dioxide-Assisted Photocatalysis. *Hazardous Waste Hazard Mater.* **1993**, 2, 107-149.
- Wang, Z.D. Spectroscopic and Structural Characterization of a Laurentian Fulvic Acid. Notes the Origin of the Colour. *Anal. Chim. Acta.* **1990**, 232, 43-49.
- Weber, WJ. Jr.; Vanvliet B.M. Synthetic Absorbents and Activated Carbon for Water Treatment. *Jour AWWA.* **1981**, 73, 420-426.
- Xuea, G.; Liua, H.; Chena, Q.; Hills, C.; Tyrerc, M.; Innocenta, F. Synergy Between Surface Adsorption and Photocatalysis During Degradation of Humic Acid on TiO₂/Activated Carbon Composites. *Journal of Hazardous Materials.* **2010**.
- Yang, J.; Li, D.; Wang, X.; Yang, X.; Lu, L. Rapid Synthesis of Nanocrystalline TiO₂/SnO₂ Binary Oxides and Their Photoinduced Decomposition of Methyl Orange. *Journal of Solid State Chemistry.* **2002**, 165, 193-198.
- Yang, J.K.; Lee, S.M. Removal of Cr(VI) and Humic Acid by using TiO₂ Photocatalysis. *Chemosphere.* **2006**, 63, 1677-1684.
- You, Y.S.; Chung, K.H.; Kim, Y.M.; Kim, J.H.; Seo, G. Deactivation and Regeneration of Titania Catalyst Supported on Glass Fiber in the Photocatalytic Degradation of Toluene. *Korean J. Chem. Eng.* **2003**, 20(1), 58-64.
- Yu, H.; Lee, S.C.; Yu, J.; Ao, C.H. Photocatalytic Activity of Dispersed TiO₂ Particles Deposited on Glass Fibers. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical.* **2006**, 246, 206-211.
- Zhang, Q.; Gao, L.; Guo, J. Effect of Hydrolysis Conditions on Morphology and Crystallization of Nanosized TiO₂ Powder. *Journal of the European Ceramic Society.* **2000**, 20, 2153-2158.

Zhao, L.; Han, M.; Lian, J. Photocatalytic Activity of TiO₂ Films With Mixed Anatase and Rutile Structures Prepared by Pulsed Laser Deposition. doi:10.1016/j.tsf.2007.10.102. 2007

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ
ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ และความ
เข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาได้รับรังสียูวี (C)

ตาราง ก.1 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มเมื่อเผาที่
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0				
	0.5 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
Glass fiber	0.571	0.531	0.465	0.427	0.411
TiO ₂	0.722	0.631	0.494	0.383	0.287
TiO ₂ /5SiO ₂	0.743	0.649	0.508	0.383	0.280
TiO ₂ /3SnO ₂	0.759	0.671	0.556	0.456	0.364
TiO ₂ /20N	0.760	0.680	0.530	0.410	0.310
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.689	0.592	0.415	0.285	0.219
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.782	0.696	0.614	0.533	0.466
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.5Fe ³⁺	0.667	0.598	0.517	0.460	0.383
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.8Fe ³⁺	0.612	0.552	0.476	0.431	0.389
TiO ₂ /3SnO ₂ /1.0Fe ³⁺	0.637	0.550	0.479	0.420	0.350

ตาราง ก.2 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มเมื่อเผาที่
อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0				
	0.5 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
Glass fiber	0.682	0.606	0.563	0.512	0.479
TiO ₂	0.769	0.689	0.578	0.474	0.371
TiO ₂ /5SiO ₂	0.691	0.580	0.480	0.380	0.280
TiO ₂ /3SnO ₂	0.724	0.600	0.520	0.420	0.310

ตาราง ก.2 (ต่อ)

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀				
	0.5 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
TiO ₂ /20N	0.742	0.657	0.545	0.434	0.354
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.669	0.558	0.420	0.313	0.242
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.779	0.716	0.613	0.530	0.460
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.5Fe ³⁺	0.791	0.719	0.619	0.540	0.469
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.8Fe ³⁺	0.838	0.748	0.663	0.587	0.519
TiO ₂ /3SnO ₂ /1.0Fe ³⁺	0.794	0.769	0.713	0.661	0.610

ตาราง ก.3 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀				
	0.5 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
Glass fiber	0.696	0.690	0.679	0.649	0.633
TiO ₂	0.741	0.632	0.470	0.347	0.264
TiO ₂ /5SiO ₂	0.684	0.556	0.407	0.296	0.222
TiO ₂ /3SnO ₂	0.740	0.653	0.510	0.400	0.290
TiO ₂ /20N	0.682	0.569	0.428	0.321	0.247
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.662	0.512	0.356	0.251	0.164
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.752	0.682	0.567	0.465	0.394
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.5Fe ³⁺	0.758	0.691	0.571	0.476	0.399
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.8Fe ³⁺	0.775	0.752	0.660	0.579	0.511
TiO ₂ /3SnO ₂ /1.0Fe ³⁺	0.744	0.717	0.634	0.569	0.517

ตาราง ก.4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลา
รับแสงยูวี 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0						
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ	6 รอบ	7 รอบ
TiO ₂	73.65	65.25	59.28	54.12	54.11	54.12	54.67
TiO ₂ /5SiO ₂	80.01	69.99	65.14	60.02	60.28	59.12	59.80
TiO ₂ /3SnO ₂	70.98	69.67	67.99	62.46	57.85	54.02	53.12
TiO ₂ /20N	72.05	70.25	66.98	62.21	57.99	57.87	57.15
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	83.60	76.24	74.03	73.97	73.58	73.08	72.97
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	60.91	57.36	53.71	52.32	52.12	52.40	51.31

ภาคผนวก ข. ตารางแสดงจำนวนเชื้อเฉลี่ยของ *E.coli* ที่รับรังสียูวีและฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ จำนวนเชื้อเริ่มต้น (N_0) เท่ากับ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และจำนวนเชื้อของ *E.coli* ในรอบที่ทำการทดสอบ (C)

ตาราง ข.1 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดปฏิบัติการ 1-5 รอบ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์

ชนิดของฟิล์ม	N/N ₀				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
UV alone	0.73	0.62	0.58	0.50	0.43
uncoated	0.98	0.97	0.93	0.92	0.89
TiO ₂	0.71	0.51	0.44	0.40	0.35
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.51	0.28	0.19	0.10	0.03
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.86	0.65	0.49	0.45	0.38

ตาราง ข.2 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม TiO₂/3SnO₂/20N เมื่อผ่านชุดปฏิบัติการ 1-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว กำลังวัตต์ที่ใช้และอัตราการไหลของน้ำ

ตัวแปร	N/N ₀				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
ปริมาณเส้นใยแก้ว	อัตราการไหลของน้ำ 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์				
30	0.89	0.83	0.79	0.71	0.57
60	0.51	0.28	0.19	0.10	0.03
90	0.22	0.13	0.08	0.06	0.01
กำลังวัตต์	อัตราการไหลของน้ำ 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม				
20	0.80	0.65	0.56	0.48	0.37
40	0.66	0.42	0.31	0.23	0.18
60	0.22	0.13	0.08	0.06	0.01

ตาราง ข.2 (ต่อ)

ตัวแปร	N/N ₀				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
อัตราการไหล	หลอดยวี่ขนาด 60 วัตต์ ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม				
23.5	0.14	0.10	0.06	0.03	0.00
53.6	0.22	0.13	0.09	0.06	0.01
552.3	0.77	0.58	0.46	0.31	0.21

ตาราง ข.3 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 1-5 รอบ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 53.6 มิลลิลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์

ชนิดของฟิล์ม	N/N ₀				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
Fluorescent alone	0.98	0.93	0.91	0.90	0.88
uncoated	0.99	0.97	0.97	0.95	0.93
TiO ₂	0.91	0.83	0.78	0.74	0.70
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.89	0.81	0.74	0.69	0.63
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.88	0.73	0.65	0.55	0.41

ภาคผนวก ค. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของกรดฮิวมิก ที่รับรังสียูวีและฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อผ่านชุดทดสอบ 1-5 รอบ ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก เริ่มต้น (A_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของกรดฮิวมิก ในรอบที่ทำการทดสอบ (A)

ตาราง ค.1 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์

ชนิดของฟิล์ม	A/A_0				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
UV alone	0.989	0.964	0.951	0.939	0.913
uncoated	0.961	0.953	0.932	0.903	0.893
TiO ₂	0.839	0.707	0.604	0.564	0.514
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.670	0.473	0.378	0.294	0.241
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.899	0.807	0.727	0.661	0.594

ตาราง ค.2 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์ม TiO₂/3SnO₂/20N เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 1-5 รอบ โดยแปรผันปริมาณเส้นใยแก้ว กำลังวัตต์ที่ใช้และอัตราการไหลของน้ำ

ตัวแปร	A/A_0				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
ปริมาณเส้นใยแก้ว	อัตราการไหลของน้ำ 51.2 มิลลิตรต่อนาที หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์				
30	0.856	0.736	0.687	0.626	0.600
60	0.670	0.473	0.378	0.294	0.241
90	0.654	0.439	0.317	0.191	0.146
กำลังวัตต์	อัตราการไหลของน้ำ 51.2 มิลลิตรต่อนาที ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม				
20	0.877	0.811	0.728	0.656	0.555
40	0.858	0.693	0.558	0.472	0.350
60	0.654	0.439	0.317	0.191	0.146

ตาราง ค.2 (ต่อ)

ตัวแปร	A/A ₀				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
อัตราการไหล	หลอดยูวีขนาด 60 วัตต์ ปริมาณเส้นใยแก้ว 90 กรัม				
22.1	0.566	0.321	0.179	0.136	0.094
51.2	0.654	0.439	0.317	0.191	0.146
542.9	0.875	0.758	0.660	0.607	0.515

ตาราง ค.3 ผลการย่อยสลายกรดฮิวมิกของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อผ่านชุดปฏิกรณ์ 1-5 รอบ โดยควบคุม ปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบ 60 กรัม อัตราการไหลเฉลี่ย 51.2 มิลลิตรต่อนาที หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 60 วัตต์

ชนิดของฟิล์ม	A/A ₀				
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ
Fluorescent alone	0.986	0.966	0.954	0.941	0.921
uncoated	0.959	0.944	0.924	0.900	0.890
TiO ₂	0.957	0.889	0.812	0.778	0.754
TiO ₂ /3SnO ₂ /20N	0.913	0.845	0.769	0.716	0.689
TiO ₂ /3SnO ₂ /0.3Fe ³⁺	0.920	0.822	0.732	0.671	0.612

ภาคผนวก ง. ผลงานที่ตีพิมพ์

Advanced Materials Research Vols. 148-149 (2011) pp 1501-1506
 Online available since 2010/Oct/27 at www.scientific.net
 © (2011) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.1501

Water Disinfection using Fe³⁺ and N-doped 3SnO₂/TiO₂ Thin Films Coated on Glass Fibers

Lek Sikong^{1,a*}, Peerawas Kongsong^{1,b} and Vishnu Rachpech^{1,c*}

¹Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, Thailand

^aNANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University, Thailand.

^alek.s@psu.ac.th, ^bphysics_psu@windowslive.com, ^crachvishnu@gmail.com

Keyword: N doped SnO₂/TiO₂, sol-gel methods, glass fiber, antibacterial activity, water purification

Abstract. The water disinfection efficiency of Fe³⁺ and N-doped 3SnO₂/TiO₂ composite and undoped films was investigated. The water containing *E. coli* with an initial concentration of 10³ CFU/ml was treated by a photocatalytic reactor filled with 60 g of glass fibers coated with the catalytic films for 1-5 circulated cycles. The number of survival bacteria after treatment was evaluated with spread plate techniques. Furthermore, the photocatalytic reaction on degradation of methylene blue dye solution was also investigated in order to observe the correlation between the result of bacteria inactivation of the prepared films and that of photocatalytic activity on methylene blue degradation. It reveals that N-doping in the TiO₂ composite films results in shifting absorption wavelength towards visible light, narrowing the energy band gap and acts as photo-generated electrons trapping site, leading to retardation of the electrons-holes recombination, while Fe³⁺ doping has a main effect on hindrance of anatase crystal growth of the composite films. Therefore, 20N/3SnO₂/TiO₂ composite thin film exhibits greater photocatalytic activity and disinfection efficiency than those of undoped and Fe³⁺ doped TiO₂ films. It was found that the bacterial inactivation of the prepared films correlates closely to photocatalytic activity performed by degradation of methylene blue dye solution. The 20N/3SnO₂/TiO₂ composite film can kill *E. coli* 97% within 5 cycled water treatment (~93 min) while Fe³⁺/3SnO₂/TiO₂, undoped TiO₂ and UV alone can kill only 62, 65 and 58%, respectively. The 20N/3SnO₂/TiO₂ films coated on glass fibers are expect to be applied as an antibacterial photocatalyst for water purification.

Introduction

Water disinfection is recognized by the WHO as one of the most important challenges for human health protection. The spread of water borne infection is a problem in both developed and underdeveloped countries [1]. Particularly, there are concerns about the possible long-term effects of systemic exposure to a certain class of toxins, for instances the release of endotoxin from *E. coli* upon cell lysis [2].

Several compounds have been investigated as potential photocatalytic materials for using in water purification including metal oxides (TiO₂, ZnO, ZrO₂, V₂O₅, Fe₂O₃, SnO₂ and CdO) and metal sulphides (CdS and ZnS). If one considers photochemical activity, photochemical and chemical stability, availability, cost, and toxicity, the most suitable photocatalyst for water purification reported to date is titanium dioxide (TiO₂). When titanium dioxide is irradiated with UV light in aqueous solution, reactive oxygen radical species (ROS) and, hydroxyl radicals (OH[•]) are formed. The ROS and OH radicals both are strong oxidants having oxidation potential second only fluorine [3]. The antibacterial efficiency is determined by the competition between the recombination of charge carriers and the transfer of those to the bacteria. A wide range of transition

metal ions has been reported to be used as electron acceptor to decrease the $e^- - h^+$ recombination in the research of photodegradation towards organic substance [4].

There are many techniques to improve photoactivity such as control of phase, morphology crystallite size and band gap energy reducing, etc. Doping TiO_2 with N, Fe^{3+} and SnO_2 could extent the photochemical activity [5, 6, 7], while metal and metal oxide has been reported to enhance the photocatalytic activity.

The aim of this work is to investigate the water disinfection efficiency of Fe^{3+} and N-doped $3SnO_2/TiO_2$ composite and undoped films. The water containing *E. coli* with an initial concentration of 10^3 CFU/ml was treated by a photocatalytic reactor filled with 60 g of glass fibers coated with the catalytic films. The number of survival bacteria after treatment was evaluated with the spread plate technique. Furthermore, the photocatalytic reaction on degradation of methylene blue dye solution was also investigated in order to compare with a result of bacteria inactivation of the prepared films.

Experimental

Materials and Methods

There are two layers of the TiO_2 composite films coated on glass fibers. The first layer is $5SiO_2/TiO_2$ films prepared by adding drop-wise of titanium (IV) isopropoxide (TTIP, 99.95%, Fluka Sigma-Aldrich) under vigorous stirring the mixture solution containing ethanol (99.9%; Merck Germany) and tetraethylorthosilicate (TEOS, 98%, Fluka Sigma-Aldrich). The second layer is $0.3Fe^{3+}/3SnO_2/TiO_2$ or $20N/3SnO_2/TiO_2$ films. The $0.3Fe^{3+}/3SnO_2/TiO_2$ film was prepared by mixing 0.024 g ferric chloride anhydrous ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$), 0.315 g Tin (IV) chloride pentahydrate ($SnCl_4 \cdot 5H_2O$) while $20N/3SnO_2/TiO_2$ films was prepared by mixing 10 ml glacial acetic, 0.577 g ammonium carbonate and 0.315 g Tin (IV) chloride pentahydrate. The concentration of SiO_2 doped in TiO_2 films as a first layers was fixed at 5mol% while that of SnO_2 doped in the second layered films was fixed at 3mol%. From our previous study the Fe^{3+} of 0.3mol% was selected to dope into the SnO_2/TiO_2 films since it exhibits the higher photoactivity compared to other concentrations. While nitrogen of 20mol% was considered to dope into TiO_2 composite films due to the study of Hao-Li Qin and co-workers [5]. The $0.3Fe^{3+}/3SnO_2/TiO_2$ or $20N/3SnO_2/TiO_2$ sols was stirred at room temperature for 60 min and followed by adding of 2 M HCl into the sol to adjust pH to be about 3.5.

The glass fibers were firstly heated at $500^\circ C$ for 1 h in order to remove wax and then carefully cleaned with ethanol. A dip-coating apparatus was used to coat the TiO_2 composite films. Firstly, SiO_2/TiO_2 was coated on glass fibers for a buffer layer and then $0.3Fe^{3+}/3SnO_2/TiO_2$ or $20N/3SnO_2/TiO_2$ sol was coated on a buffer layer of glass fibers. The sol can be coated on the substrate homogenously with dipping speed of 1.0 mm/s. Secondly, the gel films of TiO_2 composites were obtained by drying at $60^\circ C$ for 30 min. Then the films were heated at $600^\circ C$ for 2 h at a heating rate of $10^\circ C/min$. After that the TiO_2 composite films coated glass fibers were cleaned using ultrasonic bath for 15 min and cleaned again with distilled water in order to remove the excess TiO_2 particles on the films. Then the TiO_2 composite films were dried at $105^\circ C$ for 24 h.

Materials Characterization

The surface morphology was investigated by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Phase composition was characterized by using an x-ray diffractometer (XRD) (Phillips Expert MPD, Cu-K α). The crystallite size was determined from XRD peaks using the Scherer equation [8].

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos \theta_B \quad (1)$$

Where D is crystallite size, λ is the wavelength of the x-ray radiation (Cu-K α = 0.15406 nm), β is the angle width at half maximum height, and θ_B is the half diffraction angle of the centroid of the peak in degree.



Photocatalytic Reaction Test

The photocatalytic activity of TiO_2 , $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ and $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ thin films coated on glass fiber substrates was tested by means of degradation methylene blue (MB) solution (50 ml) having an initial concentration of 1×10^{-5} M with 1 g of the undoped or doped TiO_2 glass fibers using a UV-lamp (black light) of 50 W power and an irradiated intensity of 310-400 nm wavelength. The distance between a testing substrate and a light source is 32 cm. The photocatalytic reaction test was done in a dark chamber under UV irradiation at various times up to 4 h. The remained concentration of methylene blue was determined by UV-VIS spectrophotometer.

Photocatalytic Antibacterial Measurements

The bacterial strain used was *E. coli* K-12. *E. coli* cells were grown aerobically in 4 ml of trypticase soy broth at 37°C for 24 h. Then the bacterial solution was diluted in saline solution (0.85% NaCl) till the number of *E. coli* in per milliliter solution is in the range of 30–300. The number of viable bacteria in a treated solution can be readily quantified by using spread plate technique in which a sample is appropriately diluted and transferred to an agar plate. After colonies are grown, they are counted and the number of bacteria in the original sample is calculated. It was found that the initial bacterial concentration is an important factor in evaluating the antibacterial efficiency [9]. To obtain a working cell suspension, the stock was serially diluted in saline solution and sampled only 1 ml for adding to the reactor solution (999 ml). The initial bacterial concentration was kept about 10^3 CFU/ml used for all experiments. The detection of *E. coli* cells in the water samples taken from the reactor was carried out by plating appropriate dilutions onto Macconkey agar. The plates were incubated for 24 h at 37°C . The number of viable bacteria was determined by using the spread plate technique after passing through reactor of each cycle. A photocatalytic reactor is made of Pyrex glass fixed in a dark chamber surrounded by 10×6 W of black light lamps. The glass reactor has volume of 300 cm^3 filled with TiO_2 composite films coated glass fibers 60 g. A flow rate of made-up water containing *E. coli* passed through the reactor was kept constant at 53.6 ml/min.

Results and Discussion

XRD Result of TiO_2 Thin Films

Fig.1 shows the XRD patterns of thin films indicated that undoped and doped TiO_2 thin films obtained by calcination at 600°C for 2 h were anatase crystal phase due to the presence of attributive peaks ($2\theta = 25.4^\circ$, 37.6° , 47.6° , and 54.6°). It means that phase transformation from amorphous to anatase structure, which commonly requires high temperature. Very broad diffraction peak at (1 0 1) plane ($2\theta = 25.4^\circ$) was due to its small crystalline size of TiO_2 . The crystallite size calculated from Scherrer's equation of TiO_2 , $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ and $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ films were 17.2, 23.0 and 34.5 nm, respectively. Fe^{3+} seems to hinder phase transformation from amorphous to anatase phase, thus $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ film shows the lower degree of crystallinity than others while N-doping has not such effect (Fig.1). As known, both crystallite size and degree of crystallinity have an effect on the photocatalytic reaction.

EDS spectra and Morphology of Surface Thin Films

The EDS spectra taken from the TiO_2 and TiO_2 composite films are presented in Fig. 2, where the presence of Si, Al, Ca and O elements mainly derived from glass fiber substrates, while Ti, N and O elements derived from TiO_2 and $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ composite films. The Fe element peak is not being shown due to its low dosage doped into TiO_2 composite films. The morphology of coated surfaces of TiO_2 and TiO_2 composite thin films coated on glass fibers synthesized at 600°C was observed by SEM illustrated in Fig.3. It can be seen that the anatase phase nucleated is homogeneous and it has a smooth surface. However, the excess TiO_2 seems to deposit randomly on glass fiber surfaces. Agglomeration of nanoparticles was found for undoped TiO_2 film but it was not found for $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ and $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ films. Fe^{3+} doping into the TiO_2 composite films causes hindrance of anatase crystal growth that well confirms the result of XRD shown in Fig.1.



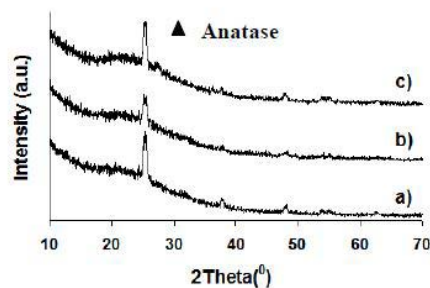


Fig. 1: XRD patterns of a) TiO_2 , b) $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ and c) $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ thin films calcined at 600°C .

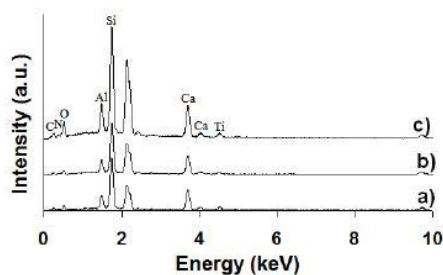


Fig. 2: EDS spectra taken from the a) TiO_2 , b) $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$, c) $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ thin films coated on glass fibers calcined at 600°C .

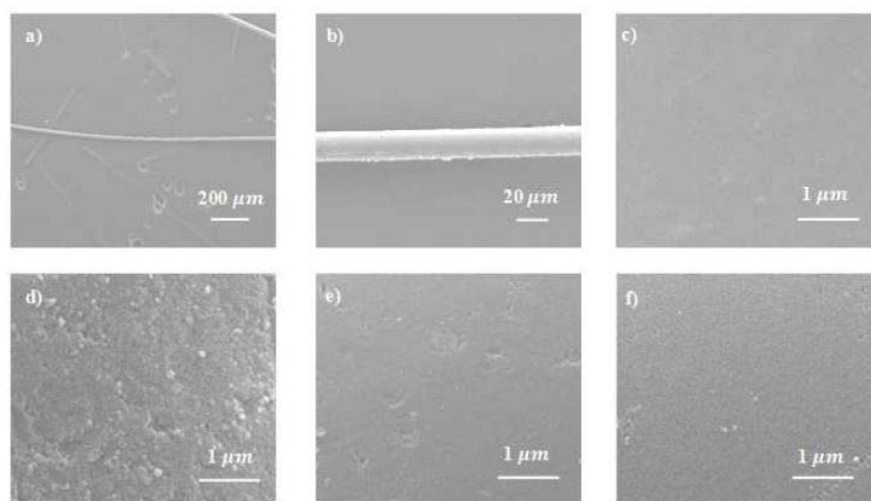


Fig. 3: SEM images of a) TiO_2 50x, b) TiO_2 500x, c) uncoated 35,000x, d) TiO_2 35,000x, e) $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ 35,000x and f) $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ 35,000x thin films calcined at 600°C .

Photocatalytic Activity Test

The photocatalytic activity of the tri-doped TiO_2 photocatalytic films was performed by means of the degradation of methylene blue solution (MB) with an initial concentration of 1×10^{-5} M under UV for various irradiation times. Fig. 4 is plotted between C/C_0 ratio and UV irradiation time, where C_0 and C are the concentration of MB at the beginning and the concentration of MB remained after a designed treatment time, respectively. It could be seen that N or Fe^{3+} doping has an effect on the photocatalytic activity of the as-prepared samples and $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ thin film exhibits the optimum photoactivity (Fig.4). According to the previous report, many factors influenced the photoactivity of TiO_2 photocatalyst such as crystalline phase, grain size, specific surface area, surface morphology and surface state (surface OH radical) and these were closely related to each other [10,11]. Doping TiO_2 with N results in shifting light absorption wavelength to the visible region and narrows an energy band gap (3.02 eV) [12]. The excellent photocatalytic

activity of the well-crystalline anatase phase which facilitates the transfer of photo-induced vacancies from bulk to surface for degradation of organic composites and effectively inhibits the recombination between photo generated electrons and holes. Since the Fe^{3+} doping has an effect on hindrance of anatase crystal growth as discussed above, it gives a photocatalytic activity lower than that of undoped TiO_2 film coated on glass fibers.

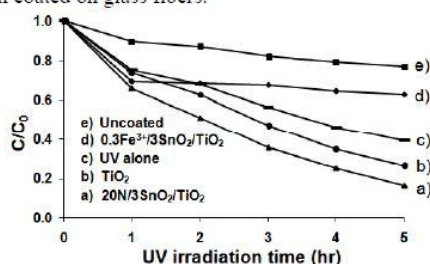


Fig. 4: Photocatalytic performance on degradation of MB of TiO_2 and TiO_2 composite thin films coated on glass fiber thin films.

Fig. 4: Photocatalytic performance on degradation of MB of TiO_2 and TiO_2 composite thin films coated on glass fiber thin films.

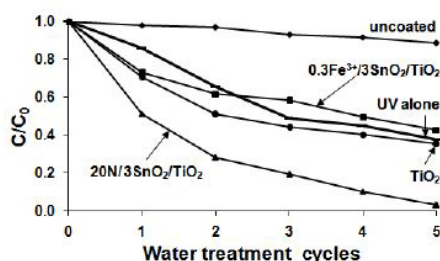


Fig. 5: Antibacterial efficiency as a function of water treatment cycles for TiO_2 and TiO_2 composite thin films.

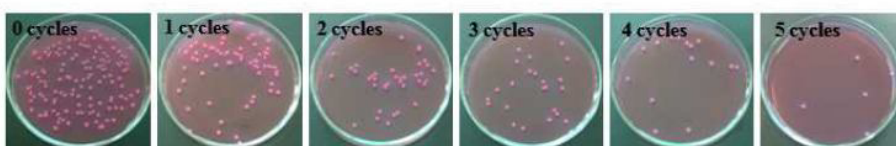


Fig. 6: Growth of *E. coli* on Macconkey agar plate observed after treatment with $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ composite thin films under UV irradiation for 1-5 cycles.

Photocatalytic Disinfection against *E. coli*

The efficiency of *E. coli* photo-inactivation with a UV light was evaluated using distilled water containing the pathogen. The results obtained are given in Fig. 5. The survival rating of *E. coli* was determined by counting the number of viable cells in terms of CFU. The *E. coli* bacteria inactivation test was performed by allowing the *E. coli* made-up water flow through 60 g of TiO_2 coated glass fibers packed in a reactor surrounded by UV lamps with the flow rate of 53.6 ml/min for 1-5 circulated cycles. The survival curves of *E. coli* illustrated in Fig. 5 are plotted between C/C_0 ratio and treatment cycle, where C_0 and C are the number of survival cells at the beginning and at the certain treatment cycle, respectively. The result indicated that $20\text{N}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ as-prepared film exhibits higher bactericidal activity against *E. coli* under UV irradiation compared to $0.3\text{Fe}^{3+}/3\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$, undoped TiO_2 thin films and UV alone.

It was found that 20N/3SnO₂/TiO₂ composite film exhibits the highest disinfection rate, followed by undoped TiO₂ and 0.3Fe³⁺/3SnO₂/TiO₂ thin films, respectively. Fig. 6 shows the pictures of *E. coli* on Macconkey plates observed after treatment for 1-5 cycles. From Fig. 5 and Fig. 6, the disinfection efficiency of 20N/3SnO₂/TiO₂ composite thin films coated on glass fibers is 97% while those of the 0.3Fe³⁺/3SnO₂/TiO₂, undoped TiO₂ and UV alone are 62, 65 and 58%, respectively, after treatment of water containing *E. coli* for 5 cycles (93.25 min). This result well correlates to that of photocatalytic reaction test. It was apparent that a damage of bacteria cell walls can take place immediately after irradiation in the presence of TiO₂ thin films and followed by a further damage of the cell membranes [13]. It can be seen from Fig. 6 that *E. coli* in made-up water treated with 20N/3SnO₂/TiO₂ films was killed 50% after first treatment cycle (~20 min).

Summary

Thin film coatings of undoped and doped TiO₂ were prepared successfully on glass fibers via sol-gel and dip-coating methods. Films were heated at 600°C for 2 h at a heating rate of 10°C/min in order to form anatase phase. The quantitative examination of antibacterial activity indicates that the 20N/3SnO₂/TiO₂ thin film has greater *E. coli* inactivation under UV irradiation than undoped TiO₂ and 0.3Fe³⁺/3SnO₂/TiO₂ films. This result well correlates to that of photocatalytic reaction on MB degradation. Experimental results clearly show that a disinfection efficiency of 20N/3SnO₂/TiO₂ film is 97% at a constant water flow rate of 53.6 ml/min and an initial concentration of *E. coli* about 10³ CFU/ml. The 20N/3SnO₂/TiO₂ films coated on glass fibers are expect to be applied as an antibacterial photocatalyst for a water purification.

Acknowledgment

The authors are pleased to acknowledge NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University and Department of Mining and Material Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University for their financial support.

References

- [1] M.Subrahmanyam, P. Boule, V. Durga Kumari, D. Naveen Kumar, M. Sancelme and A. Rachel: Solar Energy Vol. 82 (2008), p. 1099–1106
- [2] D.D. Sun, J.H. Tay and K.M. Tan: Water Research Vol. 37 (2003), p. 3452–3462
- [3] M.A. Dheaya, S.M. Patrick, A. Trudy and J. Anthony Byrne: Water Research Vol. 43 (2009), p. 47-54
- [4] W. Zhang, Y. Chen, S. Yu, S. Chen and Y. Yin: Thin Solid Films Vol. 516 (2008), p. 4690–4694
- [5] H.L. Qin, G.B. Gu and S. Liu: C. R. Chimie Vol. 11 (2008), p. 95-100
- [6] W. Zhang, Y. Chen, S. Yu, S. Chen and Y. Yin: Thin Solid Films Vol. 516 (2008), p. 4690–4694
- [7] L.C. Chen, F.R. Tsai, S.H. Fang and Y.C. Ho: Electrochimica Acta Vol. 54 (2009), p. 1304–1311
- [8] Z. Liuxue, L. Peng, and S. Zhixing: Materials Chemistry and Physics Vol. 98 (2006), p. 111-115
- [9] W. Zhang, Y. Chen, S. Yu, S. Chen and Y. Yin: Thin Solid Films Vol. 516 (2008), p. 4690–4694
- [10] A. Zaleska, J.W. Sobezak, E. Grabowska and J. Hupka: Applied Catalysis B: Environmental Vol. 78 (2008), p. 92–100.
- [11] X. Zhang and Q. Liu: Materials Letters Vol. 62 (2008), p. 2589-2592
- [12] J. Ying, H. Bai, Q. Jiang and J. Lian: Thin Solid Films Vol. 516 (2008), p. 1736-1742
- [13] W. Xun and G. Wengi: J. of Wuhan University of Technology-Master Sci. Ed (2008), p. 155-158



Manufacturing Processes and Systems

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149

**Water Disinfection Using Fe³⁺ and N-Doped
3SnO₂/TiO₂ Thin Films Coated on Glass Fibers**

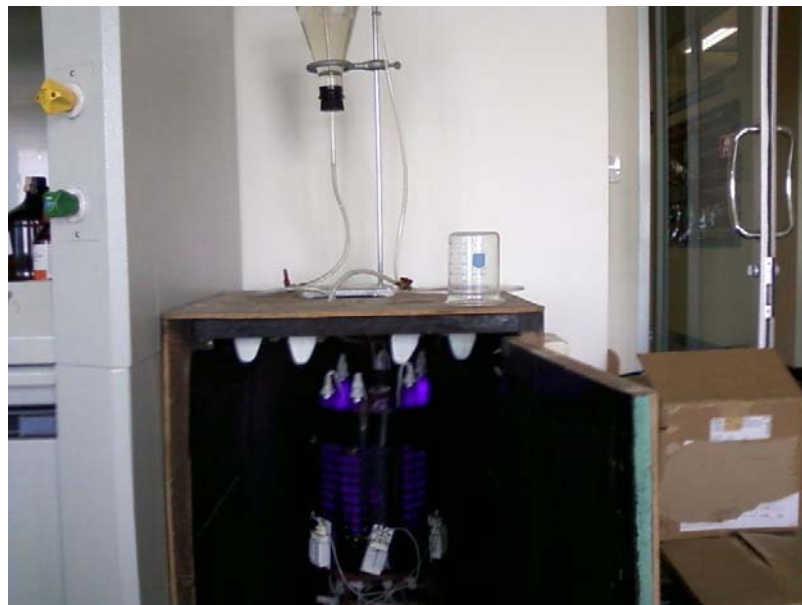
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.1501



ภาคผนวก จ. เครื่องมือในการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิก



รูปที่ 4.1 เครื่องมือในการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิก (ด้านบน)



รูปที่ 4.2 เครื่องมือในการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิก (ด้านข้าง)

ก)



ข)



ค)



ง)



รูปที่ 4.3 ชุดต้นแบบเครื่องปฏิกรณ์ ก) หลอดแก้ว ข) หลอดไฟ ค) ภาพจากด้านบน
ง) ภาพชุดปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายพีรวัส กงสง		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120113		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนการวิจัยจาก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Peerawas Kongsong, Lek Sikong and Vishnu Rachpech "Photocatalytic Efficiency of Fe³⁺-doped SnO₂/SiO₂/TiO₂ films Coated on Glass Fiber Substrate" 7th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Holiday Inn Chiangmai, Chiang Mai, Thailand, 19-22 November 2009.

- Peerawas Kongsong, Lek Sikong and Vishnu Rachpech "Water Disinfection using Fe³⁺ and N-doped 3SnO₂/TiO₂ Thin Films Coated on Glass Fibers" International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes, Best Western Shenzhen Felicity Hotel, Shenzhen, China, 6-8 November 2010.

- Lek Sikong, Peerawas Kongsong and Vishnu Rachpech "Water Disinfection using Fe³⁺ and N-doped 3SnO₂/TiO₂ Thin Films Coated on Glass Fibers" *Advanced Materials Research* Vols. 148-149 (2011) pp 1501-1506, ISSN 1022-6680.