



การสังเคราะห์อนุภาคเงินบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์
ที่เคลือบบนใยแก้วเพื่อบำบัดน้ำดื่ม

**Synthesis of Ag Nanoparticles on N, S Doped TiO₂ Film Coated on Glass Fiber
Cleaning Drinking Water**

เบญจมาศ หนูพุ่ม

Benjamas Noophum

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**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์อนุภาคเงินบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตนิน
 ร่วมกับซัลเฟอร์ที่เคลือบบนใยแก้วเพื่อบำบัดน้ำดื่ม

ผู้เขียน นางสาวเบญจมาศ หนูพุ่ม

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร.อานอบ คันทะชา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....กรรมการ
 (ดร. วิษณุ ราชเพ็ชร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวเบญจมาศ หนูพุ่ม)

นักศึกษา

Thesis Title	Synthesis of Ag Nanoparticles on N, S doped TiO ₂ Film Coated on Glass Fiber for Cleaning Drinking Water
Author	Ms. Benjamas Noophum
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2014

Abstract

The purpose of this research is to synthesize silver nanoparticles on N, S co-doped titanium dioxide films coated on glass fibers via sol-gel and dipping method, and to investigate the photocatalytic performance of as-synthesized films on degradation of methylene blue, bisphenol A (BPA) and 2,4-Dichlorophenol (2,4-DCP), and on anti-microbial properties against *Escherichia coli* (*E.coli*) contaminated in drinking water. N, S co-doped titanium dioxide films were prepared by using thiourea as the sources of nitrogen and sulphur. It is found that the photocatalytic activity of N, S co-doped TiO₂ films prepared from thiourea at 5 mol percent calcined at 300°C with a heating rate of 5°C/min for 2 hours is greatest. The films prepared at these optimum conditions have only anatase phase with 7 nm of crystallite size and band gap energy of 3.15 eV. The reduction of band gap energy is due to the interstitial nitrogen atom incorporated in Ti-O-N and O-Ti-N linkages and sulphur atom in TiO₂ lattice through substituting Ti⁴⁺. It is seen that N and S in titanium dioxide affects on crystallinity of anatase, crystallite size and band energy gap of TiO₂ films. This results in an enhancement of photocatalytic reaction on methylene blue degradation of the 5NST film which it could degrade methylene blue about 95.18 and 94.28 percents under UV and fluorescence irradiations for 6 hours, respectively. The 5NST films on glass fibers were selected as substrates for preparing Ag nanoparticles coating on 5NST film via chemical method using silver nitrate solution with various concentrations and 0.7 molar of sucrose solution. The 5NST films coated on glass fibers were soaked in silver nitrate-sucrose mixed solution holding for 15 min, then dried in air and calcined at 400 °C for 2 h with the heating rate of 5 °C/min for 2 hours. It is found that the optimum dosage of silver nitrate utilized is 0.001 molar that at this condition, silver metal phase. The band gap energy of 0.01A5NST can be reduced to be about 1.62 eV. From photocatalytic reaction tests by means of methylene blue

degradation under UV and fluorescence irradiations for 6 hours, degradation of BPA and 2,4-DCP under UV and fluorescence irradiations for 12 hours, and *E.coli* disinfection under UV, fluorescence and dark conditions for 60 minutes, it is found that 0.01A5NST films could degrade methylene blue, BPA and 2,4-DCP about 95-99 percents under the given conditions and could kill *E.coli* 100 percents under UV, fluorescence and dark for 60 minutes. It is seen from SEM images of the photocatalytic treated *E.coli* cells under UV, fluorescence and dark conditions for 60 minutes that their cell walls have severely damaged, shrunk and finally died resulting from the photocatalytic disinfection of 5NST film incorporated with an anti-microbial effect of Ag. From this result, the 0.01A5NST films were selected for applying in the designated water treatment reactor and it is found that they could degrade BPA and 2,4-DCP contaminants and could kill bacteria efficiently.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(15)
รายการรูป	(19)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(27)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	8
1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์	8
1.2.2 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	12
1.2.3 อนุภาคเงินหรืออนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโน (Silver Nanoparticles)	15
1.2.3.1 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคเงินระดับนาโน	16
1.2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของซิลเวอร์นาโน	17
1.2.3.3 ซิลเวอร์คลอไรด์ระดับนาโน (Silver Chloride Nanoparticles)	18
1.2.3.4 การประยุกต์ใช้งานของซิลเวอร์คลอไรด์	19
1.2.4 กระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์	21
1.2.4.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)	21
1.2.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)	23
1.2.4.3 กระบวนการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal)	24
1.2.4.4 กระบวนการรีฟลักซ์ (Reflux)	25
1.2.4.5 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel)	27
1.2.5 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุฐานต่างๆ	29
และบนเส้นใยแก้ว (Glass fibers)	
1.2.5.1 กระบวนการ Chemical vapor deposition (CVD)	29
1.2.5.2 กระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.2.5.3 การเคลือบด้วยไอระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation method)	32
1.2.5.4 กระบวนการเคลือบด้วยของเหลว (Liquid phase deposition)	33
1.2.5.5 กระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating method)	33
1.2.6 การปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำดื่ม	37
1.2.7 การปนเปื้อนของแบคทีเรียในน้ำดื่ม	39
1.2.8 วิธีบำบัดแบคทีเรียในน้ำดื่มแบบพื้นฐาน และการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตแค ตะไลติก	41
1.3 การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
1.3.1 กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก	47
1.3.1.1 การเจือด้วยโลหะหรือโลหะ	47
1.3.1.2 การเกิดเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและเฟสรูไทล์	50
1.3.1.3 การลดช่องว่างของแถบพลังงาน	51
1.3.1.4 การลดขนาดอนุภาค	53
1.3.1.5 การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการเพิ่มความพรุน	54
1.3.2 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียม ไดออกไซด์ด้านการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีต่างๆ	55
สารฟีนอล และสารประกอบฟีนอล และการประยุกต์ใช้กับ Reactor ต่างๆ	
1.3.3 การประยุกต์ใช้ซิลเวอร์นาโนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำ	59
1.3.4 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียม ไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์นาโน	60
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	64
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	65
1.6 ขอบเขตการวิจัย	65
2 วิธีการวิจัย	66
2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย	66
2.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์	67
2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ (PT)	67
2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์เจือไนโตรเจน ร่วมกับซัลเฟอร์ (NST)	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เจือในโตนเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (A5NST)	68
2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และการตรึงอนุภาคซิลเวอร์นาโน บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	73
2.4.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	73
2.4.2 การตรึงอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตนเจน ร่วมกับซัลเฟอร์	73
2.5 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู	74
2.5.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู	74
2.5.2 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลู	75
2.6 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายบิสฟีนอลเอ และไดคลอโรฟีนอล	76
2.6.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานบิสฟีนอล	76
2.6.2 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายบิสฟีนอล	77
2.6.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไดคลอโรฟีนอล	77
2.6.4 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายไดคลอโรฟีนอล	78
2.7 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i>	79
2.8 การตรวจสอบคุณลักษณะ	81
2.8.1 X-ray Diffractometry (XRD)	81
2.8.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)	81
2.8.3 Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis DRS)	81
2.8.4 Fourier-Transformed Infrared Spectrophotometry (FT-IR)	82
2.8.5 Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis)	82
2.8.6 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)	82
3 ผลและการอภิปรายผล	83
3.1 อิทธิพลของการเจือในโตนเจนร่วมกับซัลเฟอร์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 การวิเคราะห์ชนิดของเฟสและขนาดผลึกด้วยเทคนิค XRD	83
3.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM	92
3.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	95
3.1.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR	102
3.1.5 การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค XPS	103
3.1.6 การวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานด้วยเทคนิค UV-Vis DRS	107
3.2 อิทธิพลของอนุภาคซิลเวอร์นาโน	111
3.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	111
3.2.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเผา	111
3.2.1.2 อิทธิพลของการจุ่มแช่	113
3.2.1.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท	115
3.2.1.3 การวิเคราะห์ความหนา	117
3.2.1.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ	118
3.2.2 การวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD	121
3.2.3 การวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานด้วยเทคนิค UV-Vis DRS	122
3.2.4 การทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบ	124
3.3 อิทธิพลร่วมระหว่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน	126
3.3.1 ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย BPA	126
3.3.2 ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP	130
3.3.3 ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i>	134
3.4 การประยุกต์ใช้งานด้วยเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ	139
3.4.1 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i>	140
3.4.1.1 การศึกษาหาปริมาณเส้นใยแก้วที่เหมาะสม	141
3.4.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ด้วยเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ	144

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลาย BPA และ 2,4-DCP	146
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	149
4.1 บทสรุป	149
4.2 ข้อเสนอแนะ	150
บรรณานุกรม	151
ภาคผนวก	165
ก. ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิต่าง 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	166
ข. ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	170
ค. เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA และ 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตร 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์	171
ง. เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10 ⁵ โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	173
จ. ผลงานที่ตีพิมพ์	174
ประวัติผู้เขียน	175

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 อัตราป่วยมะเร็งในเพศชาย ปี พ.ศ. 2542	4
1.2 แสดงมาตรฐานน้ำดื่มบรรจุขวด	5
1.3 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แบคทีเรียในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด	6
1.4 เปรียบเทียบลักษณะของน้ำดื่มแต่ละชนิด	7
1.5 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส	9
1.6 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์	10
1.7 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบบรูไนต์	10
1.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษด้วยวิธีต่าง ๆ	15
1.9 เปรียบเทียบวิธีพื้นฐานในการบำบัดเชื้อแบคทีเรียในน้ำ	43
3.1 ขนาดผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	87
3.2 สัดส่วนปริมาณเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	88
3.3 ขนาดผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	91
3.4 สัดส่วนปริมาณเฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ	92
3.5 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวีนาน 6 ชั่วโมง	98
3.6 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเฝ้าที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 6 ชั่วโมง	101
3.7 ความถี่และชนิดการสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FT-IR ของผง PT และ 5NST เฝ้าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	103
3.8 เปอร์เซ็นต์อะตอมที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค XPS ของฟิล์ม 5NST เฝ้าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	107
3.9 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส	110
3.10 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโน เป็นองค์ประกอบสูตรต่างๆ เมื่อเฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	123

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
3.11	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	125
3.12	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	127
3.13	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์	130
3.14	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4- DCP ของฟิล์มสูตรต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	131
3.15	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4- DCP ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์	134
3.16	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ที่เวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	138
3.17	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้วต่างๆ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ของการรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์	143
3.18	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที	146
3.19	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย BPA ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที	148
3.20	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที	148
ก.1	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	166

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ก.2	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	166
ก.3	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	167
ก.4	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	167
ก.5	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	168
ก.6	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	168
ก.7	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	169
ก.8	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	169
ข.1	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม A5NST สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	170
ข.2	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม A5NST สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	170
ค.1	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์ม 0.01A5NST เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์	171

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.2	171
<p>เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์ม 0.01A5NST เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์</p>	
ค.3	172
<p>เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์</p>	
ค.4	172
<p>เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์</p>	
ง.1	173
<p>เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์</p>	
ง.2	173
<p>เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสง ฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์</p>	

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1	9
1.2	11
1.3	14
1.4	14
1.5	17
1.6	20
1.7	20
1.8	25
1.9	26
1.10	27
1.11	30
1.12	31
1.13	32
1.14	34
1.15	37
1.16	49
1.17	50
1.18	50
1.19	52
1.20	53
1.21	58
1.22	58

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
1.23	ชุดทดสอบของ Sun และคณะ (2003)	59
1.24	กลไกการย่อยสลายภายใน RhB ของ Sung-Suh และคณะ (2003) (a) ภายใต้แสงขาว และ (b) ภายใต้แสงยูวี	62
1.25	กลไกการย่อยสลายฟีนอล ของ Gomathi Devi และคณะ (2011)	62
1.26	กลไกการทำงานของเมมเบรนและลักษณะเมมเบรน ของ Liu และคณะ (2011) (a) แบบจำลองการทำงานของไส้กรองชนิดแผ่น และ (b) ภาพถ่ายไส้กรองชนิดแผ่น	62
1.27	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ AgI/AgCl/TiO ₂ ภายใต้แสงขาวของ Cao และคณะ (2011)	63
1.28	กลไกการย่อยสลาย 4-CP ภายใต้แสงขาวของ Zhou และคณะ (2011)	64
2.1	การเตรียมผงและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (PT) ด้วยวิธีโซล-เจล	70
2.2	การเตรียมผงและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (NST) ด้วยวิธีโซล-เจล	71
2.3	การเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (ANST) ด้วยวิธีทางเคมี	72
2.4	โครงสร้างของเมทิลีนบลู	73
2.5	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลู	73
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	74
2.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย BPA กับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	76
2.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 2,4-DCP กับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	78
2.9	ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i>	80
3.1	XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	84
3.2	XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	85
3.3	XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	85

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	86
3.5	XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	89
3.6	XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	89
3.7	XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	90
3.8	XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	90
3.9	ลักษณะของฟิล์มบาง PT และ 5NST ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว เเผที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส	94
3.10	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	96
3.11	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	96
3.12	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	97
3.13	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	97
3.14	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	99
3.15	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	99

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	100
3.17 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	100
3.18 FT-IR spectra ของผง PT และ 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	102
3.19 XPS spectra ของฟิล์ม (a) PT และ (b) 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	104
3.20 XPS spectra ของฟิล์ม 5NST เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (a) Ti 2p (b) O 1s (c) N 1s (d) S 2p และ (e) C 1s	105
3.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	108
3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	109
3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	109
3.24 ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.05A5NST บนฟิล์มบาง 5NST เคลือบบนเส้นใยแก้ว เตรียมโดยวิธีทางเคมี ใช้เวลาในการจุ่มแช่นาน 60 นาที เผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส	113
3.25 ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.05A5NST บนฟิล์มบาง 5NST เคลือบบนเส้นใยแก้ว เตรียมโดยวิธีทางเคมี ศึกษาเวลาในการจุ่มแช่ที่ 5, 15, 30 และ 60 นาที เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	114
3.26 ลักษณะของฟิล์มบาง 5NST และฟิล์ม A5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็น องค์ประกอบสูตรต่างๆ เตรียมโดยวิธีทางเคมี ใช้เวลาในการจุ่มแช่นาน 15 นาที เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	117

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.27	ภาพตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง 5NST และ 0.01A5NST (a) ภาพตัดขวางของเส้นใยแก้ว 5NST, (b) ความหนาของชั้นเคลือบ 5NST, (c) ภาพตัดขวางของเส้นใยแก้ว 0.01A5NST และ (d) ความหนาของชั้นเคลือบ 0.01A5NST	118
3.28	EXD Spectra และ X-ray Mapping ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง PT เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	119
3.29	EXD Spectra และ X-ray Mapping ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	119
3.30	EXD Spectra และ X-ray Mapping ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม 0.01A5NST	120
3.31	EDX spectra ของฟิล์ม 0.01A5NST (a) EDX point scanning (b) EDX spectrum point 1, (c) EDX spectrum point 2 และ (d) EDX spectrum point 3	120
3.32	XRD patterns ของฟิล์ม 5NST ที่มีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบที่ความเข้มข้นต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	121
3.33	ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผง 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนองค์ประกอบสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	123
3.34	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม A5NST สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์	124
3.35	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม A5NST สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	125
3.36	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ที่ความเข้มข้นต่างๆของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	127
3.37	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์	129

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.38	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์	129
3.39	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์	131
3.40	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์	133
3.41	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์	133
3.42	ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^7 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงยูวี 50 วัตต์ นาน 60 นาที	136
3.43	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^7 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงยูวี 50 วัตต์ นาน 60 นาที	136
3.44	ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^7 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ นาน 60 นาที	137
3.45	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^7 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ นาน 60 นาที	137
3.46	ภาพถ่ายแสดงโซนปลอดเชื้อของฟิล์มสูตรต่างๆ (a) เส้นใยแก้ว (control) (b) PT (c) 5NST (d) 0.01A5NST และ (e) ภาพขยายของ 0.01A5NST	138
3.47	ภาพถ่าย SEM ของเชื้อ <i>E.coli</i> เมื่อถูกยับยั้งการเจริญเติบโตด้วย (a) เชื้อควบคุมก่อนการยับยั้ง (b) ยับยั้งด้วย PT (c) ยับยั้งด้วย 5NST และ (d) ยับยั้งด้วย 0.01A5NST ภายใต้การรับแสงยูวี 50 วัตต์ นาน 60 นาที	139
3.48	เครื่องกรองน้ำของนายพีรวัส คงสง	140
3.49	การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้วที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี 60 วัตต์	141

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.50	142
<p>ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้ว 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี 60 วัตต์</p>	
3.51	142
<p>ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้ว 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์</p>	
3.52	143
<p>ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้ว 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์</p>	
3.53	144
<p>เครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ และใช้ในการทดสอบ</p>	
3.54	145
<p>ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง</p>	
3.55	145
<p>เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำ ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง</p>	
3.56	147
<p>เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์</p>	
3.57	147
<p>เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์</p>	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งกับชีวิตของเราโดยน้ำจะหมุนเวียนในร่างกาย และเข้าออกในเซลล์ต่างๆในรูปของเลือด นำพาสารอาหาร โปรตีน ไขมัน น้ำตาล วิตามิน เกลือแร่ ฯลฯ ไปยังอวัยวะที่เป็นจุดหมายปลายทาง โดยเลือดมีน้ำเป็นองค์ประกอบ 92 เปอร์เซ็นต์ มันสมองมีน้ำเป็นองค์ประกอบ 85 เปอร์เซ็นต์ คำสั่งจากสมองไปยังอวัยวะต่างๆในร่างกายที่อาศัยตัวกลางคือน้ำ ซึ่งมนุษย์ 1 คนต้องการน้ำประมาณ 2.5 ลิตรต่อวัน เราจึงควรให้ความสำคัญในเรื่องความสะอาดและคุณภาพของน้ำดื่มให้มาก โดยคุณภาพน้ำที่เหมาะสมกับการบริโภคจะต้องเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก รส ความขุ่น สารพิษ เชื้อโรค และมีปริมาณเกลือแร่ที่เหมาะสม เพื่อสุขภาพร่างกายและจิตใจที่ดี เพราะถ้าเราดื่มน้ำที่ไม่สะอาดมีสิ่งปนเปื้อน ไม่ว่าจะเป็นสารเคมีหรือเชื้อโรคเข้าไปก็จะเป็นอันตรายต่อร่างกายได้

แหล่งน้ำที่เราสามารถนำมาอุปโภคบริโภคมีเพียงร้อยละ 10 ของน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในโลก และที่เราสามารถนำมาใช้ได้มาจาก 2 ส่วน คือ แหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งกว่าจะมาถึงปากผู้บริโภค น้ำได้ไหลผ่านที่ต่างๆ พร้อมปนเปื้อนมากับเชื้อโรค โลหะหนัก และสารเคมี และเนื่องจากอัตราการเติบโตอุตสาหกรรม ปล่อยสารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มอย่างรวดเร็วของประชากรโลก ทำให้แนวโน้มปัญหาน้ำดื่มในอนาคตเป็นปัจจัยสำคัญของโรคเรื้อรังแทบทุกชนิดและมีความรุนแรงยิ่งขึ้น

สารปนเปื้อนในน้ำนับว่าเป็นปัญหาหลักที่มีผลกระทบต่อผู้บริโภค และปัญหาดังกล่าวนี้ก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการทิ้งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การทำการเกษตร ที่ส่งผลให้สารเคมีในแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้ปัญหาโลกร้อนก็ส่งผลให้เชื้อโรคสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะ *Escherichia coli (E.coli)* ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้เป็นสาเหตุการระบาดของโรคอาหารเป็นพิษในหลายประเทศ ทั่วโลก ผู้ติดเชื้อจะมีอาการท้องเสียถ่ายอุจจาระเป็นน้ำหรืออาการลำไส้ใหญ่อักเสบมีเลือดออก (Haemorrhagic Colitis, HC) คือปวดเกร็งอย่างรุนแรงในช่องท้อง ถ่ายเป็นเลือดสด ไม่มีไข้หรือมีไข้ต่ำผู้ป่วยที่ถ่ายเป็นเลือด

สดโดยเฉพาะเด็กเล็กและผู้สูงอายุมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดอาการ Haemolytic Uremic Syndrome (HUS) ตามมา ในผู้สูงอายุอาจเกิด Thrombotic Thrombocytopenic Purpura (TTP) ร่วมด้วย ทำให้เสียชีวิตได้ ผู้ติดเชื้อมาอาจไม่แสดงอาการของโรคแต่สามารถถ่ายทอดเชื้อให้ผู้อื่นได้ (อรอนงค์ รัชตราชนชัย 2551) ซึ่งประเทศไทยก็ประสบกับปัญหาดังกล่าวเช่นกัน

เนื่องจากน้ำดื่มที่ใช้บริโภคในชุมชน เช่น โรงเรียน การดูแลอาจจะน้อยกว่า เพราะขาดบุคลากร หรืองบประมาณ จึงมีโอกาสสูงที่เด็กนักเรียนจะบริโภคน้ำที่ไม่มีคุณภาพ แล้วเกิดการสะสมของโรคต่าง ๆ ตามมา คุณภาพน้ำดื่มในโรงเรียนส่วนใหญ่ยังไม่ดีพอ โดยเฉพาะโรงเรียนที่บริโภคน้ำฝน เนื่องจากไม่มีการล้างภาชนะกักเก็บน้ำ หรือวิธีการรองน้ำฝนไม่ถูกวิธี ส่วนน้ำที่ผ่านเครื่องกรองนั้นไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องมาจาก ไม่มีการล้าง และบำรุงรักษาเครื่องกรองน้ำที่ดีพอ จาก การตรวจสอบคุณภาพน้ำของกรมอนามัย พบว่าส่วนใหญ่ยังไม่สะอาดปลอดภัยตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพบริโภคกรมอนามัย โดยพบว่าคริวเรือน โรงเรียน และสถานประกอบการต่างๆ ใช้น้ำประปาที่คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่กลับพบการปนเปื้อนของแบคทีเรียเนื่องจากความไม่สะอาดของภาชนะเก็บน้ำ เครื่องกรองน้ำ และความไม่ถูกสุขลักษณะของวิธีการเก็บน้ำดื่ม ทำให้เกิดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ที่ก่อให้เกิดการเจ็บป่วยได้ จากการเฝ้าระวังโรคติดต่อจากอาหารและน้ำ ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง 15 มีนาคม 2551 ทั่วประเทศพบผู้ป่วยรวม 271,677 ราย เสียชีวิต 37 ราย มากที่สุดคืออุจจาระร่วง ป่วย 246,477 ราย เสียชีวิต 35 ราย นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจ็บป่วยด้วยโรคระบบทางเดินอาหารอื่นๆ เช่น โรคบิด ไทฟอยด์ อาหารเป็นพิษ ไวรัสตับอักเสบบี ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนโดยตรงทั้งทางร่างกายและจิตใจ (ที่มา: หนังสือพิมพ์แนวหน้า <http://www.gooddrinks.net/2011-02-24-07-51-07.html>)

นอกจากปัญหาสุขภาพแล้วสารปนเปื้อนในน้ำยังส่งผลไปถึงการเรียนรู้ของเด็กไทยอีกด้วย โดยสำรวจแหล่งน้ำประปาหมู่บ้านใน อ.ดอนมดแดง จ.อุบลราชธานี 40 แห่ง พบว่ามีเหล็กปนเปื้อนสูงเกินมาตรฐานมากถึง 49.87 เปอร์เซ็นต์ มีตะกั่วสูงเกินมาตรฐาน 12.81 เปอร์เซ็นต์ พบสารอันตรายปนเปื้อนสูง จึงมีการสั่งให้ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ทั้ง 14 ศูนย์ ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั่วประเทศโดยเน้นตรวจสอบน้ำดื่มในโรงเรียน ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำดื่ม 1,099 ตัวอย่าง จากโรงเรียนทั่วประเทศ พบน้ำที่เด็กดื่มผ่านเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยแค่เพียง 37.47 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำดื่มที่ไม่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยมากถึง 62.53 เปอร์เซ็นต์ น้ำดื่มของโรงเรียนที่ตั้งอยู่ในเขต อบต. ไม่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย 75.1 เปอร์เซ็นต์ ในเขตเทศบาล ไม่ผ่านเกณฑ์ 48 เปอร์เซ็นต์ ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ไม่ผ่านเกณฑ์ 56.7 เปอร์เซ็นต์ สารพิษที่เป็นอันตรายที่ปนเปื้อนในน้ำได้แก่ สารไนเตรท เหล็ก ตะกั่ว แคดเมียม แมงกานีส อลูมิเนียม ฟลูออไรด์ ความกระด้าง และเชื้อจุลินทรีย์ (ที่มา: http://dermnam.blogspot.com/2009/10/blog-post_3559.html)

นอกนั้นจากสารดังกล่าวแล้วนั้นยังมีสารอันตรายที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น ฟีนอล (ผู้เขียน ปณัฏดา ขอดแสง หน่วยงาน ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 20 ธันวาคม 2550, <http://guru.google.co.th/guru/thread?tid=7dbedc9a0ff4b0b5>) และบิสฟีนอลเอ ที่เป็นสารพิษอันตรายที่ทำให้เกิดมะเร็งเต้านม การเกิดพังผืดที่มดลูก (endometriosis) และยังทำให้ถึงวัยแตกเนื้อสาวได้เร็วกว่าปกติด้วย (ที่มา:<http://www.pharm.su.ac.th/cheminlife/cms/index.php/bisphenol-a.html>) นอกจากนี้ปัญหาการปนเปื้อนสารเคมีจากการเกษตรก็เป็นอีกหนึ่งปัญหาใหญ่และรุนแรงมากของสังคมไทยไม่ว่าจากการสัมผัสโดยตรง เช่น ทางผิวหนัง การสูดดม หรือทางอ้อม เช่น การปนเปื้อนในน้ำดื่ม น้ำใช้ หรืออาหาร เป็นต้น กระทรวงสาธารณสุข ระบุว่าสารเคมีฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตนั้นอยู่ในอันดับที่ 3 และสารเคมีปราบวัชพืชในอันดับ 5 ของสาเหตุการป่วยหรือบาดเจ็บจากการประกอบอาชีพจาก 152 สาเหตุทั้งหมด (สถิติโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อมประจำปี 2551, สำนักโรคจากการประกอบอาชีพ กระทรวงสาธารณสุข) โดยปัญหาด้านสุขภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือผลกระทบที่เป็นพิษเฉียบพลันซึ่งผู้ป่วยจะมีการในทันทีหลังจากสัมผัสสารเคมี เช่น คลื่นไส้ อาเจียน ปวดหัว ปวดกล้ามเนื้อ ท้องร่วง หายใจติดขัด ตาพร่า เป็นต้น และผลกระทบที่เป็นพิษเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากพิษสะสมที่ก่อให้เกิดโรคหรือปัญหาอื่นๆ เช่น มะเร็ง เบาหวาน อัมพฤกษ์ อัมพาต โรคผิวหนังต่างๆ การเป็นหมัน การพิการของทารกแรกเกิด หรือการเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าผู้ป่วยจากพิษสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีจำนวนสูงกว่าถึง 4 เท่าตัว กล่าวคือสูงถึง 8,546 คนต่อปี และจำนวนผู้ป่วยแท้จริงแล้วอาจสูงถึง 200,000 – 400,000 คนต่อปี (ที่มา:<http://www.boe.moph.go.th/boedb/surdata/disease.php?dcontent=situation&ds=47>)

การแก้ปัญหาน้ำดื่มที่มีสารปนเปื้อนโดยการใส่สารเคมีเพิ่มเข้าไปก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เช่น การใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม (Chlorination) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และราคาถูก ในปัจจุบัน พบว่า คลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำ กลายเป็นสารก่อมะเร็งชื่อว่า ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane: THMs) โดยสารอินทรีย์ที่พบมากที่สุดแหล่งน้ำผิวดินคือสารฮิวมิก (Humic substance) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ (Edzwald และคณะ 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 เจือปนอยู่ในระดับสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของสหรัฐอเมริกาซึ่งกำหนดไว้ที่

80 ไมโครกรัมต่อลิตร และในอนาคตค่ามาตรฐานนี้จะลดลงเป็น 40 ไมโครกรัมต่อลิตร (USEPA 2006) แสดงให้เห็นว่า ผู้บริโภคน้ำประปามีโอกาสเสี่ยงต่อการได้รับสารตกค้างเหล่านี้ในระดับที่เกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำดิบของระบบประปามาเติมคลอรีน ต้องมีการกำจัดครดชีวмик ออกก่อนเพื่อลดการเกิดสารก่อมะเร็ง และลดปัญหาสีและกลิ่นของน้ำ

ปัญหาสารปนเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC, Volatile Organic Compound) จำนวน 9 ชนิด ด้วยวิธีนำค่าที่วัดได้ 24 ชั่วโมงมาเฉลี่ย ผลการตรวจพบว่า มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย จำนวน 6 ชนิด ปนเปื้อนในระดับที่สูง ไม่เกินมาตรฐาน คือ Vinyl Chloride, Dichloromethane, Chloroform, Trichloroethylene, 1,2-Dichloropropane และ Tetrachloroethylene ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 3 ชนิด คือ 1,3-Butadiene, Benzene และ 1,2-Dichloroethane พบว่า มีการปนเปื้อนในระดับสูงเกินมาตรฐาน ซึ่งสารเคมีดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็ง ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 อัตราป่วยมะเร็งในเพศชาย ปี พ.ศ. 2542

ประเภทของมะเร็ง	ประเทศไทย	จังหวัด ระยอง	อำเภอเมือง ระยอง
ปอด	20.6	25.6	42.5
ตับ	33.4	14.9	22.3
หลอดอาหาร	4.1	10.3	13.9
กระเพาะปัสสาวะ	4.2	7.0	13.1
เม็ดเลือดขาว	3.9	4.9	6.8

(ที่มา: สถาบันมะเร็งแห่งชาติ รายงานเรื่อง Population – based Cancer Registry Cancer in Rayong 1999)

จากปัญหาดังยกตัวอย่างมาข้างต้นจึงทำให้อุตสาหกรรมน้ำดื่มบรรจุขวดเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตและจำหน่ายน้ำดื่มเพื่อการบริโภค โดยอุตสาหกรรมน้ำดื่มบรรจุขวดเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่เริ่มมีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2499 และได้ขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 6-7 ปี ที่ผ่านมา เนื่องจากการเพิ่มจำนวนขึ้นของโรงแรม กภัตตาคาร และร้านอาหาร ปัจจุบันธุรกิจน้ำดื่มบรรจุขวดในท้องตลาดมีมูลค่าประมาณ 1,500 ล้านบาท โดยมีอัตราการขยายตัวประมาณร้อยละ 20 ต่อปี ซึ่งใน พ.ศ. 2535 มีผู้ประกอบการที่ผลิตน้ำดื่มบรรจุขวดถึง 1,127 ราย มีน้ำดื่มบรรจุขวดจำหน่ายในท้องตลาดรวม 200 ยี่ห้อ ซึ่งร้อยละ 20 ไม่ได้มาตรฐานน้ำดื่ม (มาตรฐานน้ำดื่มบรรจุขวดแสดงดังตารางที่ 1.2) นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียก่อโรค ได้แก่ *P.aeruginosa*, *S.aureas* และ *C.perfringens* พบ

ในน้ำประปา ร้อยละ 8.2 และร้อยละ 2 ตามลำดับ แต่กลับพบในน้ำดื่มบรรจุขวด สูงถึงร้อยละ 23.3 และร้อยละ 9 ตามลำดับ (ที่มา:http://www.mwa.co.th/art_bottle.html) ตารางที่ 1.3 แสดงเชื้อแบคทีเรียที่พบในน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด ตารางที่ 1.4 เปรียบเทียบลักษณะของน้ำดื่มแต่ละชนิด จะเห็นว่าแหล่งน้ำธรรมชาติมีสารปนเปื้อนและเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นจึงมีการหาวิธีบำบัดน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อนำมาใช้อุปโภคบริโภค ได้แก่ การใช้คาร์บอนหรือถ่าน การเติมคลอรีน วิธีรีเวอร์สออสโมซิส การกลั่น และการกรอง เป็นต้น เพื่อผลิตเป็นน้ำดื่มหรือน้ำดื่มบรรจุขวด ถึงแม้จะมีมาตรฐานควบคุมปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำดื่มแล้วก็ตาม ก็ยังพบปัญหาการปนเปื้อนในน้ำดื่มบรรจุขวดเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 1.2 แสดงมาตรฐานน้ำดื่มบรรจุขวด

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
ทาง กายภาพ	1. สี (Colour)	ฮาเซนยูนิต(Hazen)	20
	2. กลิ่น(Odour)	-	ไม่มีกลิ่น (ไม่รวมกลิ่นคลอรีน)
	3. ความขุ่น (Turbidity)	ซีลิกาสเกลยูนิต	5
	4. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5-8.5
ทางเคมี	5. ปริมาณสารทั้งหมด(Total Solids)	มก./ล.	500
	6. ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) (คำนวณเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต)	มก./ล.	100
	7. สารหนู (As)	มก./ล.	0.05
	8. แบเรียม (Ba)	มก./ล.	1.0
	9. แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	0.005
	10. คลอไรด์ (Cl, คำนวณเป็นคลอรีน)	มก./ล.	250
	11. โครเมียม (Cr)	มก./ล.	0.05
	12. ทองแดง (Cu)	มก./ล.	1.0
	13. เหล็ก (Fe)	มก./ล.	0.3
	14. ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	0.05
	15. แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	0.05
	16.ปรอท (Hg)	มก./ล.	0.002

	17. ไนเตรต (NO ₃ -N , คำนวณเป็นไนโตรเจน)	มก./ล.	4.0
	18. ฟีนอล (Phenols)	มก./ล.	0.001
	19. ซีลีเนียม (Se)	มก./ล.	0.01
	20. เงิน (Ag)	มก./ล.	0.05
	21. ซัลเฟต (SO ₄)	มก./ล.	250
	22. สังกะสี (Zn)	มก./ล.	5.0
	23. ฟลูออไรด์ (F, คำนวณเป็นฟลูออรีน)	มก./ล.	1.5
	24. อะลูมิเนียม	มก./ล.	0.2
	25. เอปีเอส (Alkylbenzene Sulfonate)	มก./ล.	0.2
	26. ไฮยาไนค์	มก./ล.	0.1
ทางแบคทีเรีย	27. โคลิฟอร์ม (Coliform)	เอ็ม.พี.เอ็น/100 มล.	2.2
	28. อี. โคไล (<i>E. Coil</i>)	เอ็ม.พี.เอ็น/100 มล.	ตรวจไม่พบ
	29. จุลินทรีย์ทำให้เกิดโรค (Disease-causing bacteria)	เอ็ม.พี.เอ็น/100 มล.	ตรวจไม่พบ

(ที่มา: <http://doenv.eng.cmu.ac.th/water/water1.doc>)

ตารางที่ 1.3 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แบคทีเรียในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด

รายการที่วิเคราะห์	น้ำประปา (100 ตัวอย่าง)		น้ำดื่มบรรจุขวด (155 ตัวอย่าง)	
	ตัวอย่างที่เกิน มาตรฐาน	ร้อยละ	ตัวอย่างที่เกิน มาตรฐาน	ร้อยละ
Heterotrophs (HPC>500 CFU/ml)	2	2	150	96.77
Total coliform	11	11	14	9.03
Fecal coliform	2	-	2	-
Fecal streptococci	-	-	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8	8	35	22.58
<i>Staphylococcus aureus</i>	2	2	5	3.24
<i>Clostridium perfringens</i>	2	2	14	9.03

(ที่มา <http://www.mwa.co.th/download/prd01/article/wqa/bottle.pdf>)

ตารางที่ 1.4 เปรียบเทียบลักษณะของน้ำดื่มแต่ละชนิด

เปรียบเทียบลักษณะของน้ำดื่มแต่ละชนิด					
	แหล่งน้ำ		น้ำบริสุทธิ์		
	น้ำประปา	แหล่งน้ำธรรมชาติ	Solid Carbon	Reverse Osmosis	น้ำกลั่น
คลอไรด์ (Cl)	มี	อาจมีถ้าเติมลงไป	ถูกกำจัด	ไม่ถูกกำจัดเว้นใช้ C	ถูกกำจัด
ฟลูออไรด์ (F)	มีถ้าเติม	ตามธรรมชาติ	ไม่ถูกกำจัด	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด
แบคทีเรีย	ไม่น่าจะมี	มีได้ ตามธรรมชาติ	มี/ไม่ถูกกำจัด	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด
พาราไซค์	มีได้	มีได้	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด
สารเคมี	มีได้	มีได้	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด	อาจมีปนเปื้อน
เกลือแร่	น้อย	มีได้	ไม่ถูกกำจัด	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด
โลหะหนัก	มีได้	มีได้	กำจัดบางส่วน	ถูกกำจัด	ถูกกำจัด
	สามารถดื่มได้ +ระบบต้องมี ความสมบูรณ์	สามารถดื่มได้ + แหล่งน้ำที่มี คุณภาพการบำบัด	สามารถดื่มได้	สามารถดื่มได้	สามารถดื่มได้

(ที่มา: http://www.thaicam.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=317:2010-08-09-09-58-56&catid=81:2010-08-06-03-43-56&Itemid=147)

น้ำประปาเป็นอีกหนึ่งแหล่งน้ำสำคัญที่มีบทบาทต่อการอุปโภคบริโภค ซึ่งในน้ำประปาจะใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อต่างๆที่ปนเปื้อนมากับน้ำ ซึ่งการใช้คลอรีนอาจเป็นพิษในระยะยาว อีกทั้งยังไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัส และฆ่าไข่พยาธิได้ การดื่มน้ำดื่มคลอรีนมีโอกาสดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย หรือมะเร็งกระเพาะปัสสาวะสูงกว่าผู้ที่ดื่มน้ำซึ่งปราศจากคลอรีน คลอรีนมีอันตราย โดยตัวของมันเองแล้วยังก่อให้เกิดสารพิษจากการที่คลอรีนทำปฏิกิริยากับดินและซากใบไม้เน่า ที่มีอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ที่นำมาทำน้ำประปา จึงเกิดเป็นสารพิษกลุ่มไตรฮาโลมีเทน อันเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) และเป็นสาเหตุหนึ่งของหลอดเลือดหัวใจแข็ง นอกจากนี้การเติมสารส้มในการผลิตน้ำประปาจะเร่งการเกิดโรคความจำเสื่อมได้อีกด้วย

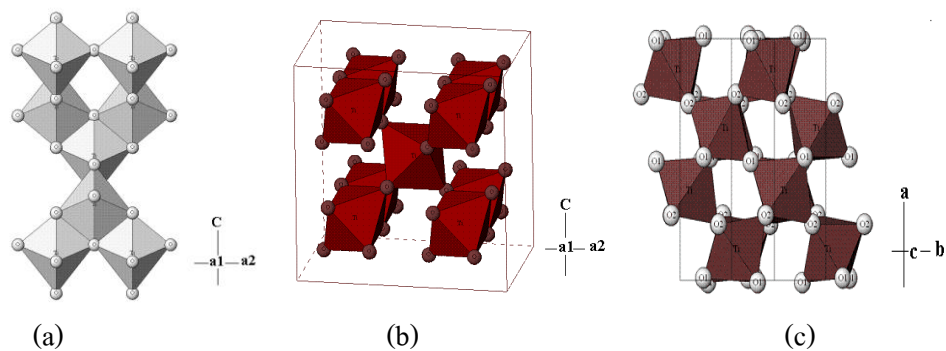
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่มีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบที่เคลือบบนใยแก้วเพื่อบำบัดน้ำดื่ม โดยมุ่งหวังให้ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้สามารถทำงานได้ดีทั้งในสภาวะมีแสงและไม่มีแสง โดยอาศัยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่เหมาะสมเพื่อย่อยสลายสารปนเปื้อน เช่น สีของเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB) สารละลายบิสฟีนอลเอ (BisphenolA, BPA) และสารละลายไดคลอโรฟีนอล (2,4-Dichlorophenol, 2,4-DCP) และฆ่าเชื้อแบคทีเรียอี.โคไล (*Escherichia coli*, *E.coli*) ในน้ำ และกระบวนการแอนติไมโครเบียลของอนุภาคเงินระดับนาโนบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวในการย่อยสลายไบโอฟิล์ม และฆ่าเชื้ออี.โคไลในน้ำภายใต้สภาวะไม่มีแสง

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือไทเทเนียมเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน เป็นสารประกอบกึ่งโลหะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะไทเทเนียมซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันกับออกซิเจน มีสมบัติทางกายภาพเป็นของแข็ง สีขาว มีมวลโมเลกุล 79.9 จุดหลอมเหลว 1,830 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ อะนาทาส รูไทล์ และบรูคไคต์ แสดงดังรูปที่ 1.1 โครงสร้างผลึกแบบอะนาทาส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนบรูคไคต์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) แสดงดังตารางที่ 1.5-1.7 ทุกโครงสร้างประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (TiO_6^{2-}) โดยอะตอมไทเทเนียมหนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนหกอะตอม แต่ละรูปแบบโครงสร้างขึ้นอยู่กับกระบวนการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้าบริเวณขอบ มุม และหน้า โดยโครงสร้างผลึกแบบอะนาทาสเกิดจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล (Octahedral) ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เกิดจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคต์เกิดจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีอยู่หลายชนิดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่โครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ อะนาทาส และรูไทล์ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาทาสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะนาทาสเป็นรูไทล์อย่างแพร่หลาย

เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก



รูปที่ 1.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) อะนาทาส (b) รูไทล์ และ (c) บรูคไคต์
(ที่มา: <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>)

ตารางที่ 1.5 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบอะนาทาส

Material name			Anatase			
Composition			TiO ₂			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
$a(\text{Å}), b(\text{Å}), c(\text{Å})$			3.7842(13)	3.7842(13)	9.5146(15)	
$\alpha(\text{deg}), \beta(\text{deg}), \gamma(\text{deg})$			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			136.3			
D_x (g/cm ³)			3.89			
Space group			$I4_1/amd$ (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 และคณะ 1972)

ตารางที่ 1.6 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์

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)

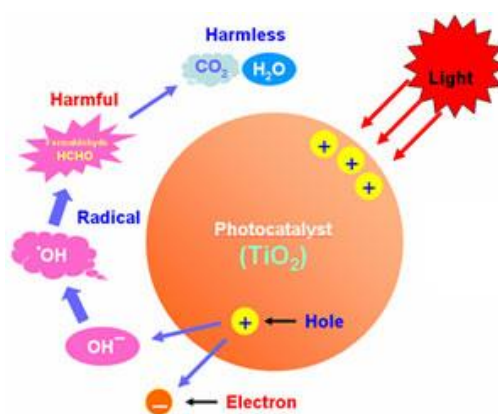
(ที่มา: Meagher และคณะ 1979)

ตารางที่ 1.7 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคต์

Material name		Brookite				
Composition		TiO ₂				
System		Orthorhombic				
Temperature (°C)		25				
$a(\text{Å}), b(\text{Å}), c(\text{Å})$		9.174(2)	5.449(2)	5.138(2)		
$\alpha(\text{deg}), \beta(\text{deg}), \gamma(\text{deg})$		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)
O1	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 และคณะ 1979)

หลักการพื้นฐานของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก เริ่มจากการที่แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสงยูวี (ความยาวคลื่น < 400 nm) ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence-band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ จึงสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำที่ผิวและเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นสารอนุมูลอิสระที่มีพลังงานออกซิไดซ์สูงมาก เช่น ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions, OH⁻) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (Super oxide ions, O₂⁻) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ โดยทำให้เกิดการแตกสลายตัวเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด (รูปที่ 1.2) ด้วยสมบัติตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปมาใช้เป็นสารโฟโตแคตะลิสต์ (Photocatalyst) อย่างแพร่หลาย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นพิษ มีสมบัติทางเคมีที่เสถียร และมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูง มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างรุนแรง จากปรากฏการณ์นี้จึงมีการนำไปใช้งานทางด้านต่างๆ เช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้องหรือการป้องกันหมอกจับกระจรถยนต์ตอนอากาศเย็น (Kanai และคณะ 2004) และไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติทางเคมีที่ดีหลายอย่าง เช่น มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงจากสารจำพวกกรด ก๊าซคลอรีนหรือเกลือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ด้วยสมบัติเหล่านี้ จึงนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างมากมาย (Fujishima และคณะ 2000) เช่น การเคลือบลงบนผิวของวัสดุต่างๆ เช่น แก้ว เซรามิกส์ โลหะและพอลิเมอร์ เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น (Balamurugan และคณะ 2005) รวมทั้งนำมาใช้เพื่อลดมลพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและอากาศ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงอุตสาหกรรม เช่น อาหารและยา เครื่องสำอาง สีทาอาคาร เป็นต้น



รูปที่ 1.2 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

(ที่มา: <http://www.nanotec.or.th/th/doc/hUfIJ49photocatalyst.pdf>)

การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นสามารถทำได้โดยการขัดขวางการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไม่ให้กลับมารวมตัว (Recombination) กับหลุมอิเล็กตรอน (Hole, h^+) ซึ่งอาจทำได้โดยการเติมสารเจือ เช่น การเจือด้วยไอออนของโลหะหรือโลหะเข้าไปในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น Ag, Pt, Au, Cr, Si, Sn, Ce, Nd, Co, W, S, N หรือ C เป็นต้น (Hong และคณะ 2006) ตัวอย่างเช่น การศึกษาสมบัติของสารเจือที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ Kangle และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเจือร่วมของบิทมัส (Bi) คาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) ในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล เปรียบเทียบกันระหว่างไทเทเนียมทางการค้า (TiO_2 Dugussa P25) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เติมสารเจือ (Undoped TiO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือบิทมัส ($Bi-TiO_2$) และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือร่วมด้วยบิทมัส คาร์บอน และไนโตรเจน ($(Bi,SCN)-TiO_2$) ในการย่อยสลายสีย้อม Rodamine-B (Rhb) จากการวิจัยพบว่า $(Bi,SCN)-TiO_2$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม Rhb ได้สูงกว่า $Bi-TiO_2$ Undoped TiO_2 และ P25 ตามลำดับ และนอกจากสารเจือสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้แล้วนั้น สารเจือยังสามารถปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ให้ดียิ่งขึ้นได้เช่นกัน ดังเช่นงานวิจัยของ Hou และคณะ (2008) ได้ทำการอิทธิพลของสารเจือในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือในระบบเจือร่วมระหว่างไนโตรเจนและซิลิกอนไดออกไซด์ (N-doped SiO_2/TiO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน (N-doped TiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2 -doped TiO_2) ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่า N-doped SiO_2/TiO_2 มีประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกดีกว่า N-doped TiO_2 และ SiO_2 -doped TiO_2 และนอกจากสารเจือจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกดีขึ้นแล้ว การเจือยังสามารถช่วยลดขนาดอนุภาค ลดปริมาณรูพรุน และขนาดของรูพรุนได้อีกด้วย

1.2.2 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยคุณสมบัติของ “นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์” ที่มีสมบัติของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดี สามารถนำมาใช้ในการฟอกอากาศ กำจัดเชื้อแบคทีเรียและการป้องกันคราบยัดเกาะพื้นผิว อีกทั้งไม่เสื่อมสภาพหลังการใช้งาน ทำความสะอาดง่าย ไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทำให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถูกนำไปใช้ในสินค้าต่างๆ ทั้งสินค้าสุขภาพ เครื่องสำอาง เสื้อผ้า อาหารและเครื่องดื่ม ตลอดจนสินค้าเกี่ยวกับบ้านและสวน

1) ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากแบคทีเรีย จึงไม่เกิดสารพิษจากซากของแบคทีเรียดังกล่าวด้วย มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่จะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว และที่สำคัญไททาเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพ หลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้คงประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโชน 1.5 เท่า

2) ความสามารถในการกำจัดกลิ่น

ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบุหรี่ กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มาลดีไฮด์ ยูรีน กลิ่นอูจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง ควัน เกสรดอกไม้ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ฯลฯ ซึ่งการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุที่มีประสิทธิภาพดี

3) ความสามารถในการฟอกอากาศ

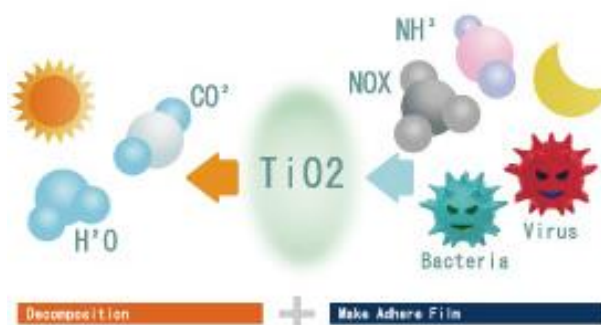
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสง สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควันบุหรี่ สารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น ทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง แม้ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไททาเนียมไดออกไซด์ จึงช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.3

4) ความสามารถในการป้องกันการเกิดคราบ และการทำความสะอาดตัวเอง

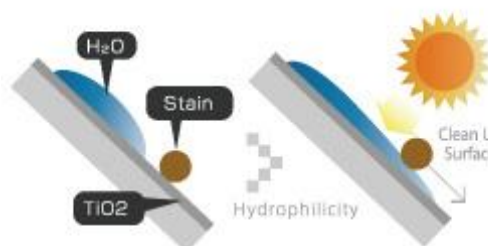
ด้วยคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง เมื่อผนังด้านนอกของอาคารที่มักต้องเจอกับคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน ได้รับการปกป้องด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ไททาเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง จึงถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายดายเมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1.4

5) ความสามารถในการบำบัดน้ำ

สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะนำใช้ในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *E.coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี (ที่มา: <http://www.nanoyothai.com/1294190/ประโยชน์ของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์>) และนอกจากนี้จะเห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดมลพิษ และแบคทีเรียเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.8 ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 1.3 แสดงการกำจัดมลพิษ เชื้อแบคทีเรีย และเชื้อไวรัส ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา: <http://www.nanoyothai.com/images/content/original-1381420852410.png>)



รูปที่ 1.4 แสดงการทำความสะอาดตัวเองด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา: <http://www.nanoyothai.com/images/content/original-1381420571008.png>)

ตารางที่ 1.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษด้วยวิธีต่าง ๆ

Pollution	Electrostatic	Ozone	UV	Ionizer	TiO ₂ Photocatalyst
Mold	Good	Good	Good	Poor	Excellent
Bacteria	Good	Good	Good	Poor	Excellent
Dust Mites	Poor	Poor	Good	Poor	Excellent
Gases	Poor	Good	Good	Poor	Excellent
Odors	Good	Good	Good	Good	Excellent
Smoke	Good	Good	Poor	Excellent	Good
VOCs	Poor	Good	Poor	Poor	Excellent
Pet Denuders	Good	Good	Good	Good	Excellent

(ที่มา: <http://content.chemipan.net/home/index.php/634-บทความ/666-บทความสารเคมี/261-ไทเทเนียม-ไดออกไซด์-titanium-dioxide-tio2-คืออะไร-ตอนที่-4.html>)

1.2.3 อนุภาคเงินหรืออนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโน (Silver Nanoparticles)

เทคโนโลยีซิลเวอร์นาโน เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่พัฒนามาจากความรู้ของคนในแถบยุโรปยุคก่อนร้อยปีที่แล้ว โดยการนำเหรียญเงินแช่ลงในถังน้ำนม เพื่อชะลอการบูดเน่า และทำให้สามารถเก็บน้ำนมได้นานกว่าปกติ หรือแม้แต่ในประเทศอินเดียก็มีการเก็บอาหารที่เน่าเสียง่ายด้วยการบรรจุในภาชนะเงิน แต่ในปัจจุบันได้นำนาโนเทคโนโลยีมาร่วมพัฒนาโดยทำให้เงินมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เพื่อให้สามารถแทรกกลงไปในเซลล์แบคทีเรีย หรือในเนื้อผ้า หรือเคลือบบนผิววัสดุต่าง หรือนำมาต่อให้เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ต้องการ โดยอาศัยกลไกของซิลเวอร์ไอออนที่สามารถเกิดกลไกได้เมื่อสัมผัสกับความชื้นในอากาศ ทำให้มีการปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออน (Ag⁺) ออกมาและเกิดกลไกการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์จนตายในที่สุด ข้อดีของซิลเวอร์นาโนหรืออนุภาคเงินระดับนาโนคือมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีโอกาสในการสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์มากเช่นกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น และซิลเวอร์นาโนมีปฏิกริยารุนแรงกับ โปรตีนซึ่งโดยทั่วไปจุลินทรีย์ต่างๆจะมีองค์ประกอบของโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นเมื่ออนุภาคซิลเวอร์นาโนสัมผัสกับจุลินทรีย์ อนุภาคดังกล่าวจะไปเกาะที่ผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์โดยจะไปเกาะกับหมู่ Thiol (-SH) ของเอนไซม์ ซึ่งจะมีผลต่อระบบเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ และเกิดการทำลายระบบหายใจ ระบบขนย้ายอิเล็กตรอนในกระบวนการเมตาโบลิซึมและระบบขนย้าย

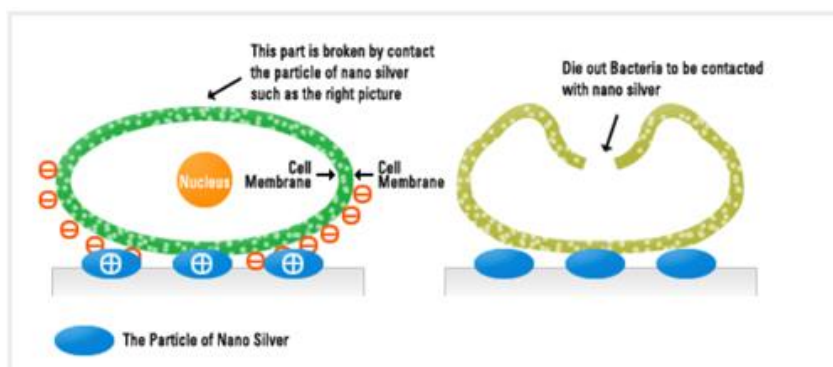
ซับซ้อนในเยื่อหุ้มเซลล์ ยิ่งไปกว่านั้นยังเกิดการยับยั้งการเพิ่มจำนวนและการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการติดเชื้อ กลิ่น อากาโรคัน และการเกิดแผล (ที่มา: <http://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-10-29-04-40-02/1574->)

1.2.3.1 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคเงินระดับนาโน

ซิลเวอร์นาโนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากซิลเวอร์นาโนจะเกิดกลไกการยับยั้งแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเมื่อซิลเวอร์นาโนสัมผัสกับความชื้นในอากาศสามารถแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออน และซิลเวอร์ไอออนนี้จะกระจายอยู่ตามผนังเซลล์ของแบคทีเรียและสามารถแทรกตัวเข้าไปภายในผนังเซลล์ของแบคทีเรียทำให้เกิดการคอนเดนเซชัน (Condensation) ของดีเอ็นเอ (DNA) ภายในเซลล์ ซิลเวอร์ไอออนจะจับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่หมู่ Thiol เนื่องจากซิลเวอร์ไอออนเป็นด่างอ่อน (Soft base) จึงสามารถจับกับกรดอ่อน (Soft acid) เช่น กำมะถัน (S) และฟอสฟอรัส (P) ได้ดี และซิลเวอร์ไอออน ทำให้โปรตีนเสียสภาพ (Denature) ส่งผลให้การควบคุมการขนส่งสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ ซิลเวอร์ไอออนจึงสามารถแทรกเข้าสู่ภายในเซลล์ได้ซึ่งทำให้ดีเอ็นเอภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากเกิดการรวมตัวและสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวน (Replication) แบคทีเรียจึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ และซิลเวอร์ไอออนที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ยังสามารถจับกับโปรตีนที่สำคัญอื่นๆ อีก เช่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ เมื่อโปรตีนเหล่านั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติจะทำให้แบคทีเรียตาย นอกจากนี้การขนส่งสารเข้าออกเซลล์ที่ผิดปกตินี้จะทำให้เซลล์แตก ทำให้แบคทีเรียตายในที่สุดดังรูปที่ 1.5 แสดงกลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยซิลเวอร์นาโนจะไปทำลายผนังเซลล์ทำให้เซลล์แตกและแบคทีเรียตายในที่สุด กลไกการทำงานของซิลเวอร์ไอออนข้างต้นมีประสิทธิภาพสูงกับแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีชั้น Peptidoglycan ที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวกนั่นเอง

มีหลายงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงซิลเวอร์นาโนในด้านประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ และความปลอดภัยในการใช้งาน ดังเช่นงานวิจัยของ Becker (1985) ได้กล่าวถึงการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยอนุภาคนาโนของเงิน ซึ่ง นอกจากแบคทีเรียแล้วจุลินทรีย์อื่นๆ เช่น ราและยีสต์ อนุภาคระดับนาโนของเงินก็สามารถใช้ได้ผลเช่นกัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kim และ Kim (2006) ได้กล่าวว่า ความเป็นลำดับของเซลล์เดี่ยวที่มีท่อเล็กๆ เชื่อมต่อระหว่างผนังเซลล์แต่ละเซลล์ โดยอาจมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือร่างแหซึ่งใช้สำหรับการสืบพันธุ์ รัยยังแสดงลักษณะเฉพาะเหมือนกับแบคทีเรียเซลล์เดี่ยวอื่นๆ โดยเฉพาะการหายใจระดับเซลล์ด้วยปอดเชิงเคมี (Chemical lung) หรือเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ควบคุมเมตาบอลิซึมของออกซิเจนของเซลล์เชื้อรา จึงสามารถถูก

ยั้งการเจริญเติบโตได้ด้วยสารแขวนลอยระดับนาโนของอนุภาคเงิน และจากงานวิจัยของ Alt และคณะ (2004) ได้อธิบายถึงความปลอดภัยของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อเซลล์สัตว์และเซลล์มนุษย์ โดยให้คำอธิบายไว้ว่า เซลล์ของสัตว์หรือมนุษย์เป็นเซลล์ยูคาริโอต (Eukaryotic cell) ซึ่งมีขนาดใหญ่ มีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีหน่วยย่อยในการทำงานมากกว่าเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งเป็นเซลล์โพรคาริโอต (Prokaryotic cell) ดังนั้นจึงต้องใช้ซิลเวอร์ไอออนปริมาณมากกว่าที่ใช้กับเซลล์แบคทีเรีย เพื่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ยูคาริโอตความต่างนี้จึงทำให้เซลล์แบคทีเรียโดยที่เซลล์ยูคาริโอตไม่ได้รับความเสียหาย ส่วนเรื่องความปลอดภัยก็ได้มีการทดสอบแล้วว่าไม่มีโทษต่อร่างกาย เนื่องจากเงินเป็นธาตุเล็กน้อยที่มีอยู่ในธรรมชาติอยู่แล้วคล้ายกับทองคำ ซึ่งในต่างประเทศมีการนำแผ่นทองคำมาใส่ในเหล้าหรือสาเก เพื่อช่วยให้เร่งปฏิกิริยาในการบ่มและมีรสชาติดีขึ้น และมีการใช้โลหะเงิน ในปริมาณที่น้อยมากก็สามารถแสดงสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้ผลดี จึงไม่มีผลข้างเคียงใดๆ กับร่างกาย (ที่มา: http://matchmaxx.com/onon/silver_nano.pdf) ซิลเวอร์นาโนจะทำปฏิกิริยากับสารโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของจุลทรีย์ แบคทีเรีย แลไวรัสเท่านั้น โดยไม่ทำอันตรายนกับเซลล์ของสัตว์ หรือ มนุษย์แต่อย่างใด (ที่มา: http://www.thaibrush.com/product_th.php?pid=5)



รูปที่ 1.5 กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของซิลเวอร์นาโน

(ที่มา: <http://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-10-29-04-40-02/1574->)

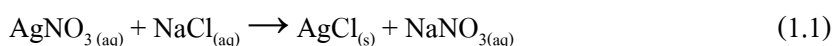
1.2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของซิลเวอร์นาโน

รศ.ดร.สนอง เอกสิทธิ์ รองผู้อำนวยการฝ่ายวัสดุ ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้กล่าวว่าในความเป็นจริงแล้วมีการใช้ซิลเวอร์ในชีวิตประจำวันมานานแล้ว เช่น ในสมัยก่อนใช้ซิลเวอร์เป็นน้ำยาข้อมผมให้เป็นสีดำ หรือจะใช้เป็นน้ำยาล้างฟิล์มขาวดำ (ซิลเวอร์ไนเตรท) ซึ่งใช้ในปริมาณมาก จนปัจจุบันเมื่อมีการค้นคว้าวิจัยในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ให้มีขนาดเล็กเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่สามารถป้องกันและกำจัดแบคทีเรียได้ จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันจนได้รับความนิยมนักันมาอย่างต่อเนื่อง กระทั่ง

ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์มากมายจากงานวิจัยสู่ภาคอุตสาหกรรม ทั้งผงซักฟอกซิลเวอร์นาโนเพื่อไม่ให้เสื้อผ้าอับชื้น รถพยาบาลปลอดเชื้อ หรือสเปรย์กำจัดกลิ่น (ที่มา: หนังสือพิมพ์เดลินิวส์ วันพุธ ที่ 4 กันยายน 2556 <http://www.dailynews.co.th/Content/Article/113613/2>'ซิลเวอร์นาโน'+สัญญาชาติไทย+ช่วยลดการนำเข้า...กำจัดเชื้อแบคทีเรีย) นอกจากนี้ซิลเวอร์นาโนยังมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น เสื้อนาโนป้องกันน้ำ รอยเปื้อนคราบสกปรก ป้องกันเชื้อโรค ป้องกันรังสียูวี ไร้รอยยับและทำความสะอาดตัวเองได้ เจลล้างมือฆ่าเชื้อโรคโดยไม่ต้องใช้น้ำ ไม่เหนียวเหนอะหนะ ระบบฟอกอากาศของเครื่องปรับอากาศ หมึกนำไฟฟ้า ที่สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และวงจรไฟฟ้า แม้กระทั่งอุปกรณ์ด้านไอที และเมื่อไม่นานมานี้ มีการนำเทคโนโลยี Nano Shield Coating มาเคลือบวัสดุผิวหน้าของเมาส์และคีย์บอร์ดเพื่อป้องกันเชื้อแบคทีเรียและเชื้อโรคต่างๆที่สะสมมาจากการใช้งานและยังขจัดกลิ่นตลอดอายุการใช้งานอีกด้วย

1.2.3.3 ซิลเวอร์คลอไรด์ระดับนาโน (Silver Chloride Nanoparticles)

ซิลเวอร์คลอไรด์ค้นพบโดย วิลเลียม เฮนรี ฟอกซ์ เทลบอต (William Henry Fox Talbot) นักวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้ทดลองค้นคว้าเกี่ยวกับสารเคมีไวแสงที่จะนำมาฉายลงบนกระดาษมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1833 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1835 เขาได้ค้นพบว่า “เงินคลอไรด์” (Silver Chloride) เป็นสารที่มีความไวต่อแสงสว่าง ซึ่งสามารถฉายลงบนกระดาษได้ ทำให้ได้กระดาษไวแสงที่จะนำไปอัดภาพ เขาได้ทดลองนำไปไม้ ชนบก มาวางทับกระดาษไวแสง พบว่าส่วนที่วัตถุทับอยู่จะเป็น สีขาวแต่ส่วนที่ถูกแสงสว่างจะเป็นสีดำ เมื่อนำไปล้างในสารละลายเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ได้ภาพที่เรียกว่า “ภาพPhotogenic Drawing” ที่มีลักษณะเป็นสีตรงข้ามกับต้นแบบคือ ขาวเป็นดำ และดำเป็นขาว หรือที่เรียกว่า “ภาพเนกาตีฟ” (ที่มา: http://th.wikipedia.org/wiki/วิลเลียม_ฟอกซ์_เทลบอต) ซิลเวอร์คลอไรด์ มีสูตรทางเคมีคือ AgCl มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีขาว มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เมื่อได้รับแสงหรือความร้อนซิลเวอร์คลอไรด์จะเปลี่ยนเป็นโลหะเงิน (และคลอรีน) โดยจะสังเกตได้จากสีของซิลเวอร์คลอไรด์จะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเทาหรือสีม่วง ซิลเวอร์คลอไรด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของแร่ Chlorargyrite การเตรียมซิลเวอร์คลอไรด์นั้นสามารถทำได้ง่ายโดยการใช้ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO₃) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ดังแสดงในสมการที่ 1.1



1.2.3.4 การประยุกต์ใช้งานซิลเวอร์คลอไรด์

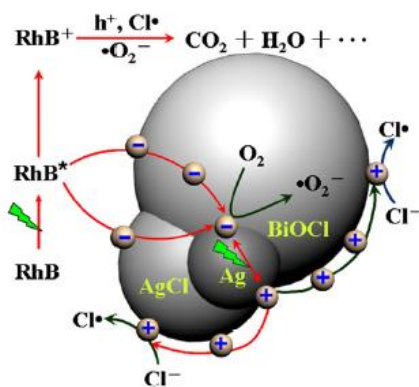
ซิลเวอร์คลอไรด์มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในงานด้านไฟฟ้า นำมาใช้ประโยชน์ในงานเคลือบ นำมาใช้ในการกำจัดพิษจากสารปรอท และกำจัดสารปรอท ฟิล์มถ่ายภาพ เลนส์โฟโตโครมิก ผ้าม้วนแผล และผลิตภัณฑ์รักษาแผล สารต้านจุลชีพ ผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นกาย และการเก็บรักษาสภาพน้ำดื่มในถังให้มีระยะเวลาขุ่น(ที่มา:http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_chloride)

นอกจากการใช้งานดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ การนำอนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์มาใช้ประโยชน์ในด้านของสารเร่งปฏิกิริยาก็ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายเช่นกัน เนื่องจากซิลเวอร์คลอไรด์มีความไวต่อแสงสูงดังเช่นงานวิจัยของ Daupor และ Wongnawa (2014) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ สมบัติ และประสิทธิภาพของซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ($Ag/AgCl$) ที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายหอยเม่น โดยได้อธิบายถึงกลไกการดูดซับโฟตอนของซิลเวอร์เฮไลด์ในการกำเนิดอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนว่า เมื่อได้รับแสงอิเล็กตรอนจะรวมตัวกับซิลเวอร์ไอออนและฟอร์มตัวเป็นอะตอมของโลหะเงิน และกลุ่มของอะตอมเงินดังกล่าวนี้จะรวมตัวขึ้นภายในซิลเวอร์เฮไลด์อีกครั้งเพื่อดูดซับอิเล็กตรอนเข้าไปเข้ามา และเมื่อซิลเวอร์คลอไรด์อยู่ภายใต้แสงยูวีและแสงขาวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติโฟโตแคตะไลติกได้ โดยจากงานวิจัยดังกล่าวนี้ซิลเวอร์คลอไรด์สามารถช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานได้ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม Orange G ได้สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้แสงยูวีและแสงขาว

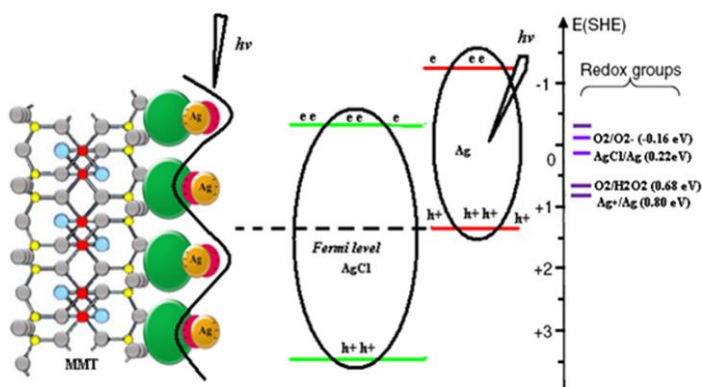
Chen และคณะ (2014) ได้ทำการสังเคราะห์ $Ag/AgCl$ ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นท่อนขนาดเล็ก และศึกษาประสิทธิภาพสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีย้อม RhB และ MB ภายใต้แสงขาว ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง ซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) สังเกตออกไซด์ (WO_4) และ โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) โดย $Ag/AgCl$ ที่สังเคราะห์ได้สามารถย่อยสลายสีย้อม RhB และ MB ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ภายในเวลา 25 และ 40 นาที ตามลำดับ และได้สรุปว่า $Ag/AgCl$ ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นท่อนขนาดเล็ก สามารถย่อยสลายสีย้อมออกแกนิกได้ภายใต้แสงขาว

Xiong และคณะ (2011) ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสม ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์/บิสมัทออกไซด์คลอไรด์ ($Ag/AgCl/BiOCl$) ที่มีรูปร่างคล้ายดอกไม้ และศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีย้อม RhB ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงขาว 500 วัตต์ พบว่า $Ag/AgCl/BiOCl$ สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ภายในเวลา 30 นาที โดยวัสดุผสม $Ag/AgCl/BiOCl$ เมื่อได้รับแสงขาวกระตุ้นจะปลดปล่อยซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ออกมาจากระบบเพื่อเข้าไปย่อยสลายสีย้อม RhB ดังรูปที่ 1.6 และงานวิจัยของ Sohrabnezhad และคณะ(2014) ได้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อม MB ของซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์/

มอนต์มอริลโลไนท์ (Ag/AgCl/MMT) นาโนคอมโพสิต โดยทำการทดสอบในที่มืดนาน 20 นาที เพื่อศึกษาการดูดซับ และรอให้ถึงจุดอิ่มตัว จากนั้นนำมาทดสอบภายใต้แสงขาว 100 วัตต์ พบว่า Ag/AgCl/MMT สามารถย่อยสลายได้สูงสุด 98 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 100 นาที ซึ่งได้อธิบายอิทธิพลของ Ag/AgCl/MMT ไว้ดังนี้ เมื่ออนุภาค Ag/AgCl ที่อยู่ในแร่ MMT ได้รับแสงขาวกระตุ้นจะเกิดหลุมอิเล็กตรอน (h^+) และมีการปลดปล่อยซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) และคลอไรด์ไอออน (Cl) ออกมาในระบบได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีการรับแสง เนื่องจาก AgCl และ Ag มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ต่ำทำให้สามารถลดการหน่วงอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ลงได้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม MB ได้ดีนั่นเอง ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.6 กลไกโฟโตแคตะไลติกของวัสดุผสม Ag/AgCl/BiOCl (ที่มา: Xiong และคณะ 2011)



รูปที่ 1.7 กลไกโฟโตแคตะไลติกของ Ag/AgCl/MMT นาโนคอมโพสิต (ที่มา: Sohrabnezhad และคณะ 2014)

นอกจากการประยุกต์ใช้งานในด้านของสารเร่งปฏิกิริยา และการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมแล้วนั้น อนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ระดับนาโนยังมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการยับยั้ง หรือฆ่าเชื้อแบคทีเรียอีกด้วยดังเช่นงานวิจัยของ Dong และคณะ (2012) ได้นำอนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ทรงลูกบาศก์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Pulsed laser ablation มาทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* โดยใช้อนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ในปริมาณ 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรต่อความเข้มข้นเชื้อ 10^5 CFU/ml ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 0.5, 1, 3, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ โดยที่เวลา 3 ชั่วโมงสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 92 เปอร์เซ็นต์ โดย Dong ได้กล่าวว่าซิลเวอร์คลอไรด์มีประสิทธิภาพในการต่อต้านและยับยั้งเชื้อ *E.coli* และเมื่อนำซิลเวอร์คลอไรด์ไปเติมลงไปในสีที่ใช้สำหรับโพลีเมอร์ก็สามารถช่วยยับยั้งเชื้อ *E.coli* ได้เช่นกัน และได้เสนอแนะว่าควรนำอนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ทรงลูกบาศก์นี้ไปเคลือบ หรือพ่นสเปรย์ลงบนทองแดง ซิลิกอน และวัสดุฐานที่เป็นพลาสติก เพื่อที่การใช้งานของอนุภาคนาโนจะได้หลากหลายมากขึ้น เช่นงานวิจัยของ Min และคณะ (2010) ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ระดับนาโนลงไปในรูพรุนของเม็ดสี SBA-15 โพลีเมอร์คอมโพสิต โดยวิธีแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง $AgNO_3$ ที่อยู่ภายในรูพรุนของ SBA-15 กับไอของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Injection molding) ที่อุณหภูมิ 190-210 องศาเซลเซียส ซึ่งอนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้มีขนาดเท่ากับ 10 นาโนเมตรจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย *E.coli* พบว่าสี SBA-15ที่ผสมร่วมกับซิลเวอร์คลอไรด์ ($AgCl@SBA-15$) สามารถยับยั้งเชื้อ *E.coli* ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงเสถียรภาพของอนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ระดับนาโนอีกด้วยว่าเป็นสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพสูงที่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำนวนมาก และสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันได้เร็ว

1.2.4 กระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

กระบวนการผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีหลากหลายหลายวิธี ดังนี้

1.2.4.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการที่อาศัยปฏิกิริยาระหว่างเกลือกับน้ำ ซึ่งเกลือเป็นอิเล็กโทรไลต์แก่เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวออกเป็นไอออนบวกและลบทั้งหมด ดังนั้นสมบัติของสารละลายเกลือจึงขึ้นอยู่กับไอออนบวกและลบในสารละลายนั้น ไอออนบางตัวสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและให้ H^+ หรือ OH^- ได้ จึงเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

การไฮโดรไลซิสของเกลือ แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1.) การไฮโดรไลซิสที่เกิดจากกรดแก่และเบสแก่ เกิดประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เพราะไอออนบวกจากเบสแก่และไอออนลบจากกรดแก่ต่างก็ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ จึงทำให้ค่า pH ของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง (เป็นกลาง) คือ มีปริมาณ $[H_3O^+]$ และ $[OH^-]$ เท่ากัน ดังนั้น pH ของสารละลายจึงเท่ากับ 7

2.) การไฮโดรไลซิสที่เกิดจากกรดอ่อนกับเบสแก่ เกิดประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะได้ไอออนลบจากกรดอ่อนซึ่งมีสมบัติเป็นคู่เบสโดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ OH^- ไอออน ดังนั้นสารละลายจึงมีสมบัติเป็นเบส ($pH > 7$) เช่น CH_3COONa KCN และ $NaClO$

3.) การไฮโดรไลซิสที่เกิดจากกรดแก่กับเบสอ่อน เกิดประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะได้ไอออนบวกจากเบสที่เป็นคู่กรด โดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำให้ H_3O^+ ดังนั้นสารละลายจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ($pH < 7$) ส่วนไอออนลบจากกรดแก่ จะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เช่น NH_4Cl และ $(NH_4)_2SO_4$

4.) การไฮโดรไลซิสที่เกิดจากกรดอ่อนและเบสอ่อน เกิดประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะได้ไอออนบวกและลบ ไอออนบวกจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ H_3O^+ ส่วนไอออนลบจะได้ OH^- ดังนั้นความเป็นกรด - เบสจึงขึ้นอยู่กับว่าไอออนบวกหรือลบใดเกิดปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสได้ดีกว่ากัน โดยพิจารณาจากค่าคงที่ของการแตกตัวของคู่เบส (K_b) หรือของคู่กรด (K_a) เช่น NH_4CN เนื่องจาก ค่า $K_b > K_a$ แสดงว่า CN^- เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ดีกว่า NH_4^+ จึงแสดงสมบัติเป็นเบสที่มีค่า $pH > 7$

5.) การไฮโดรไลซิสไอออนลบของเกลือที่เกิดจากกรดพอลิโปรติก ไอออนลบของเกลือที่เกิดจากกรดพอลิโปรติก เช่น CO_3^{2-} , PO_4^{3-} จะเกิดปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสได้หลายขั้น เนื่องจากสามารถรับ H^+ จาก H_2O ได้มากกว่า 1 โปรตอน เช่น Na^+ ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เพราะมาจาก เบสแก่ $NaOH$ ส่วน CO_3^{2-} (aq) เกิดปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสได้ 2 ขั้นตอน (ที่มา: <http://reanoanirut.wordpress.com/> เนื้อหาบทเรียน/ปฏิกิริยาของกรดและเบส/ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส/)

ตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส เช่น งานวิจัยของ Shouxin และคณะ (2006) ทำการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจนระดับนาโนด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส เตรียมโดยใช้ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) และกรด HCl ผสมโดยการปั่นกวนเป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และปรับ pH ให้เท่ากับ 8 ด้วย แอมโมเนียมไดออกไซด์ ($NH_3 \cdot H_2O$) จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมนี้ไปเก็บที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมงอีกครั้ง และนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 10 ชั่วโมง ถ้าง

ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionize water, DI) ทำให้แห้ง และบด จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-900 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศแอมโมเนีย/ไนโตรเจน (NH_3/N_2) นาน 5 ชั่วโมง โดยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200-300 นาโนเมตร มีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 15-20 นาโนเมตร และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟีนอลที่ดีภายใต้แสงยูวีและแสงขาว นอกจากนี้ Yu และคณะ (2006) ได้ทำการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส เตรียมโดยใช้ไทเทเนียมซัลเฟต ($\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$) ละลายในสารละลายแอมโมเนีย ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ปั่นกวนเป็นเวลานาน 60 นาที หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วจะได้ตะกอนสีขาวนำตะกอนไปหมุนเหวี่ยง และล้างด้วยน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ 5 ครั้ง จากนั้นนำไปอบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง ทำการบดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง พบว่าการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสได้ผงที่มีสมบัติโฟโตแคตะไลติคดีกว่า P25

1.2.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการที่อาศัยน้ำและความร้อนเป็นหลักในการสังเคราะห์ผลึก หรือผลึกเดี่ยวโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูงในกระบวนการสังเคราะห์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะทำในหม้อความดันสูงหรือที่เรียกว่าอโต้คลอว์ (Autoclave) จะต้องมีผนังที่หนาและสามารถกันป้องกันการรั่วซึมได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงและทนต่อความดันได้เป็นเวลานาน และทนการกัดกร่อนได้ดี ซึ่ง Autoclave จะเป็น เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง เงิน ทองแพลทินัม ไทเทเนียมไดออกไซด์ แก้วควอตซ์ หรือเทฟลอน โดยจะต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับอุณหภูมิและวิธีการใช้งาน มีข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้คือสามารถเตรียมผลึกได้ในขั้นตอนเดียว และได้ผลึกที่มีความสม่ำเสมอขององค์ประกอบและคุณภาพดี นอกจากนี้วัสดุที่มีความดันหรืออุณหภูมิสูงใกล้จุดหลอมเหลวก็สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการนี้ ข้อด้อยก็คือ Autoclave ที่ใช้มีราคาแพง(ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrothermal_synthesis) ตัวอย่างการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เช่น การสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิต่ำด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดย Ho และคณะ (2006) ได้ใช้ไทเทเนียมไดซัลไฟด์ (TiS_2) ละลายในกรด HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ 200 มิลลิลิตร หรือปริมาตร 80 เปอร์เซ็นต์ของ Autoclave บรรจุลงใน Teflon-lined stainless-steel autoclave จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำก็จะได้สารแขวนลอยของไทเทเนียมไดออกไซด์ นำสารแขวนลอยที่ได้ไปหมุนเหวี่ยง และล้างด้วยน้ำ DI หลายๆ ครั้ง จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน

1 ชั่วโมง จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซัลเฟอร์ โดย Ho ได้กล่าวว่าการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซัลเฟอร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นเป็นกระบวนการที่สามารถเสร็จในขั้นกระบวนการเดียว และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นั้นสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาว นอกจากนี้ Tian และคณะ (2009) ได้ทำการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซัลเฟอร์ระดับนาโน เพื่อนำไปทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีย้อม Methyl orange (MO) เตรียมโดยใช้ $TiCl_4$ และไทโอยูเรีย $CS(NH_2)_2$ ปั่นกวนให้เข้าในน้ำกลั่น จากนั้นในสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร บรรจุใส่ใน Teflon-lined stainless-steel autoclave ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสนาน 20 ชั่วโมง และให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารแขวนลอยที่ได้จากกระบวนการมาหมุนเหวี่ยงและล้างด้วยน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์หลายๆครั้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงก็จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซัลเฟอร์ในระดับนาโน โดย Tian ได้กล่าวว่าการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือซัลเฟอร์ที่เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีขนาดอนุภาค รูปร่าง เฟส และสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดี

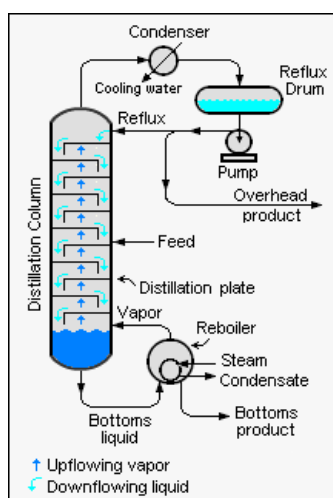
1.2.4.3 กระบวนการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal)

กระบวนการโซลโวเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์สารประกอบเคมีที่คล้ายกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่สังเคราะห์ใน Autoclave แต่มีความแตกต่างกันคือกระบวนการนี้ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยกระบวนการนี้เป็นการนำเอาประโยชน์จากกระบวนการโซลเจล และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมาใช้ร่วมกัน ซึ่งกระบวนการนี้สามารถควบคุมขนาด รูปร่าง และผลึกของโลหะออกไซด์หรือโครงสร้างระดับนาโนได้อย่างแม่นยำ ซึ่งลักษณะต่างๆนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์การสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ เวลา ชนิดของตัวทำละลาย ชนิดของสารลดแรงตึงผิว และชนิดของสารตั้งต้น กระบวนการโซลโวเทอร์มอลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ แกร์ฟีน คาร์บอน และวัสดุอื่นๆ (ที่มา:http://en.wikipedia.org/wiki/Solvothermal_synthesis) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพของสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่สูง สามารถนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ชีวะโมเลกุล และสารที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนมีพื้นที่ผิวสูงส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยามีประสิทธิภาพที่สูงด้วย Wu และคณะ (2013) ได้นำกระบวนการโซลโวเทอร์มอลมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเตรียมโดยใช้ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ (Titanium tetra-n-butoxide) หยดผสมลงในเอทานอลและปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลานาน 30 นาที แล้วนำสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร บรรจุใน Teflon-lined stainless steel autoclave จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสนาน 2

ชั่วโมง นำสารแขวนลอยที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 4 ครั้ง จากนั้นนำไปอบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 165, 265 และ 400 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลโวเทอร์มอลร่วมกับกระบวนการเผาด้วยความร้อน พบว่าผงไทเทเนียมที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 11.5 -21.6 นาโนเมตร และมีประสิทธิภาพที่ดีในการย่อยสลายแก๊ส NO และสีย้อม MO ที่ดีภายใต้แสงขาว

1.2.4.4 กระบวนการรีฟลักซ์ (Reflux)

กระบวนการรีฟลักซ์หรือการสกัดแบบไหลย้อนกลับ (Reflux extraction) คือเทคนิคการกลั่นที่เกี่ยวข้องกับการรวมตัวของไอน้ำของไอระเหยควบแน่นกันและกลับลงมาในระบบอีกครั้ง โดยกระบวนการนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังใช้ในการศึกษาพลังงานและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา กระบวนการนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการกลั่นขนาดใหญ่ เช่น โรงกลั่นปิโตรเลียม, โรงงานปิโตรเคมี โรงงานเคมี และโรงงานแปรรูปก๊าซธรรมชาติ

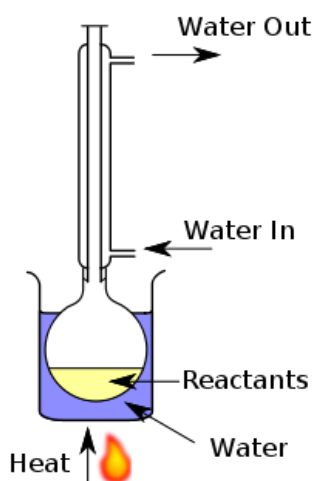


รูปที่ 1.8 กระบวนการกลั่นแบบไหลย้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม

(ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Continuous_Binary_Fractional_Distillation.PNG)

การกลั่นแบบย้อนกลับที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 1.9 โดยจะบรรจุสารตั้งต้นและตัวทำละลายลงในชุดกลั่นโดยมีน้ำเป็นตัวช่วยหล่อเย็นระบบ จากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้สารกลายเป็นไอระเหยขึ้นไปในคอลัมน์ และเมื่อไอของสารไปสัมผัสกับผนังของคอลัมน์ที่ถูกทำให้เย็นโดยระบบหล่อเย็นที่มีทางน้ำเข้า (water in) และออกทางน้ำออก (water out) ก็จะควบแน่น

กลายเป็นของเหลวไหลกลับลงมาในระบบอีกครั้ง โดยการกลั่นแบบย้อนกลับนี้สามารถปรับอุณหภูมิที่ใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของสารนั้นๆได้ หากต้องใช้อุณหภูมิสูงควรเปลี่ยนจากการหล่อเย็นด้วยน้ำมาเป็นน้ำมัน หรือใช้ทรายแทน



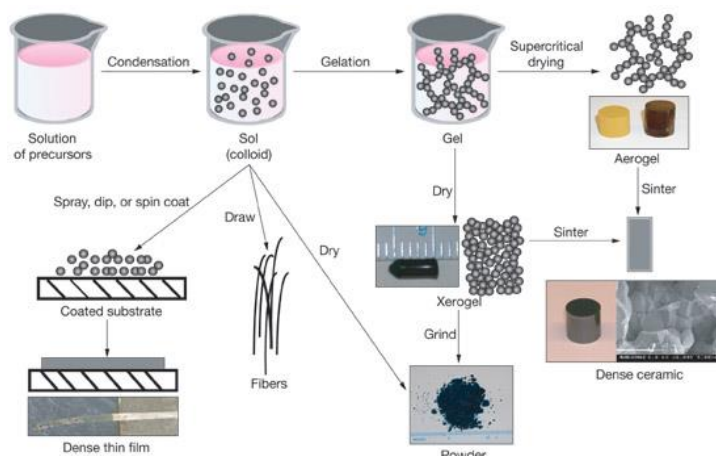
รูปที่ 1.9 ชุดอุปกรณ์และกระบวนการกลั่นแบบย้อนกลับที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

(ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Reflux_labeled.svg)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ก็สามารถสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้กระบวนการกลั่นแบบย้อนกลับได้ดังเช่นงานวิจัยของ Wu และ Wang (2013) ได้สังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือคาร์บอนและไนโตรเจน ที่อุณหภูมิต่ำด้วยกระบวนการกลั่นย้อนกลับ โดยทำการผสม Titanium tetra-n-butoxide ในสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายไทเทเนียมดังกล่าวผสมรวมกับไอโซโพรพานอล (Isopropanol) และนำมาหยดลงในสารละลาย HNO_3 ทำการปั่นกวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง และปรับ pH เท่ากับ 5 จากนั้นนำโซลที่ได้มากลั่นแบบย้อนกลับที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสนาน 6 ชั่วโมง จะได้สารแควนลอยไทเทเนียมสีขาวที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการบด ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง และทำให้แห้ง ก็จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการกลั่นย้อนกลับนี้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 7 นาโนเมตร และมีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีในการย่อยสลายสีย้อม MO ภายใต้แสงขาว

1.2.4.5 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel)

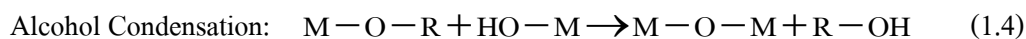
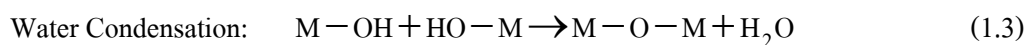
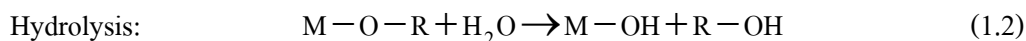
กระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน เช่น วัสดุเซรามิก แก้ว และสารแขวนลอยของโลหะออกไซด์ต่างๆ โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งเล็กๆ จำนวนมากแขวนลอยอย่างเสถียรในสารละลายที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” โดยการนำสารละลายต่างๆ มาทำปฏิกิริยา ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบด้วยพันธะโควาเลนต์ แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือพันธะไฮโดรเจน จะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตทั้งสภาวะที่เป็นโซลและเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง หรือเผาที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย แอโรเจล ซีโรเจล อนุภาคผง และการเคลือบฟิล์ม สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 กระบวนการโซล-เจล และผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ

(ที่มา: <https://www.llnl.gov/str/May05/Satcher.html>)

นอกจากนี้กระบวนการโซล-เจลสามารถเตรียมร่วมกับกระบวนการตกตะกอนได้ โดยกระบวนการตกตะกอนจะไม่เกิดขึ้นตอนการเกิดเจล แต่อนุภาคที่เกิดขึ้นจะเกิดการแยกตัวออกจากสารละลายเกิดเป็นเฟสของไฮดรอกไซด์ของโลหะหรือออกไซด์ของโลหะ ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การควบแน่นด้วยน้ำ และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดเป็นโซลและเจลที่มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Ti, Si, Zr, Al, Sn, Ce และ OR แทนกลุ่มอัลคอกซิล

การนำวิธีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พงละเอียดฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้ว สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสงและการเกาะติดของผิวน้ำ เทคโนโลยี โซล-เจล เป็นประโยชน์อย่างมากในการผลิตวัสดุที่ให้สมบัติเฉพาะตัว หรือต้องการความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลสามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมลักษณะและสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจล เป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคได้จริง (เล็ก สีคง 2547)

กระบวนการโซล-เจล เป็นอีกหนึ่งกระบวนการสังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์ผงหรือฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังเช่นงานวิจัยของ Senthilnathan และ Philip (2010) ใช้กระบวนการโซล-เจลในการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะและอโลหะชนิดต่างๆ เพื่อย่อยสลายสีย้อมลินดาน (Lindane) ภายใต้แสงยูวี และแสงขาว เตรียมโดยใช้ Titanium isopropoxide (TTIP) ผสมกับสารตั้งต้นของสารเจือชนิดต่างๆ เช่น โครเมียมคลอไรด์ (Chromium chloride) ไตรเอทิลเอมีน (Triethylamine) ซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) และไอออนเตตระคลอไรด์ (FeCl_3) ผสมเข้าด้วยกันจากนั้นค่อยๆ หยดกรด HCl พร้อมกับปั่นกววนอย่างรวดเร็วสารละลายเป็นสีใส จากนั้นนำไปเข้า Autoclave และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมง นำสารแขวนลอยที่ได้ไปหมუნเหวียงเพื่อนำตะกอนมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 1 คืน จากนั้นนำเจลที่อบแห้งแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสนาน 4 ชั่วโมง ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่ากระบวนการโซล-เจล สามารถนำมาใช้ได้ดีในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจาก Triethylamine และมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีในการย่อยสลาย Lindane โดยสามารถย่อยสลายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ภายใต้แสงขาวในเวลา 7 ชั่วโมง และนอกจากนี้มีการนำกระบวนการโซล-เจลมาใช้

ในการเตรียมฟิล์มบางอีกด้วย ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Mechiakh และคณะ (2007) ได้สังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล เคลือบบนกระจกด้วยวิธีจุ่มเคลือบ โดยให้เหตุผลว่ากระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตฟิล์มบาง ความโปร่งใส ความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน มีต้นทุนในการผลิตต่ำ และกระบวนการนี้สามารถนำไอออนของธาตุหายาก (Rare earth) มาเตรียมในระบบได้ เหมาะสำหรับการผลิตเป็นสารกึ่งตัวนำตัวเร่งปฏิกิริยาระดับนาโนในลงบนกระจกที่มีความใสสูง ได้ทำการเตรียมโซลไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เตตระบิวทิลออร์โทไทเทเนต (Tetrabutyl-orthotitanate, $(C_4H_9O)_4Ti$) บิวทานอล (C_4H_9OH) กรดอะซิติก ($C_2H_4O_2$) และน้ำผสมเข้าด้วยกันโดยการปั่นกวนเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จะได้โซลไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นนำกระจกอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ที่ทำความสะอาดผิวแล้วมาจุ่มเคลือบ และทำให้แห้งด้วยแสง 500 วัตต์ (100 วัตต์) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจล มีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 11.9-17.1 นาโนเมตร ความหนาของฟิล์ม 1 ชั้นมีความหนาประมาณ 80 นาโนเมตร และฟิล์มมีสมบัติทางแสงที่ดี มีความโปร่งใสในช่วงแสงขาว และทึบแสงในช่วงยูวี

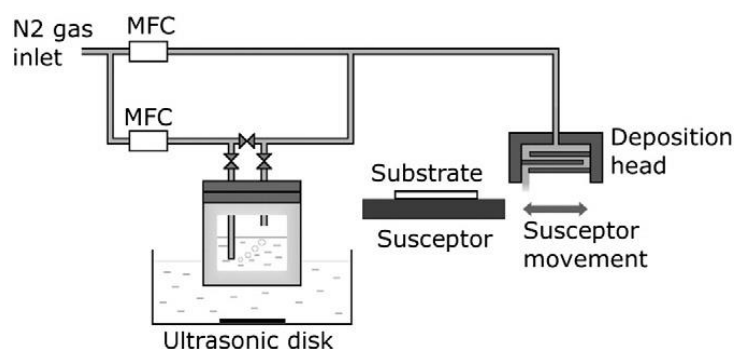
1.2.5 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุฐานต่างๆ

และบนเส้นใยแก้ว (Glass fiber)

1.2.5.1 กระบวนการ Chemical vapor deposition (CVD)

กระบวนการ Chemical vapor deposition (CVD) เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยทำให้สารที่ต้องการนำมาเตรียมฟิล์มอยู่ในสถานะของไอ โดยไอของสารนั้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกันจนได้สารประกอบที่ต้องการ และจับตัวเป็นของแข็งในบริเวณที่กำหนดไว้ (ที่มา: http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/thin_film/test.htm) วิธีการนี้ใช้สำหรับทำแผ่นฟิล์มบางสำหรับเคลือบบนวัสดุฐานต่าง เช่น ฟิล์ม TiC (ไทเทเนียมคาร์ไบด์) Ti(C,N) (ไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์) และ TiN (ไทเทเนียมไนไตรด์) เพื่อให้วัสดุมีความต้านทานการกัดกร่อน และมีความแข็งแรงสูง(ที่มา: <http://www.fujilloy.co.th/index.php/product/coating/cvd-coatng/>) นอกจากการใช้กระบวนการ CVD เคลือบวัสดุต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานแล้วนั้นยังมีการนำมาใช้ในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ย่อยสลายสารอินทรีย์ ย่อยสลายสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ใช้ในงานฟอกอากาศ การบำบัดน้ำ เป็นต้น ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Chua และคณะ (2013) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือติบุก เคลือบบนแก้วโซดาไลม์ เพื่อศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดสเตอริก (Steric acid) ด้วย

กระบวนการ CVD โดยมีละอองหรือฟองก๊าซช่วย (Aerosol assisted chemical vapour deposited (AACVD)) เตรียมโดยนำ TTIP และเตตระบิวทิล ทิน (Tetrabutyl tin) ปั่นจนผสมกันนาน 15 นาที จากนั้นนำไปใส่ในระบบโดยในระบบโดยมีการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบ ดังรูปที่ 1.11 โดยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีความหนา 80 นาโนเมตร ขนาดอนุภาคของฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM มีขนาดอยู่ที่ 42-85 นาโนเมตร มีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบที่ดี และมีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ Lim และคณะ (2014) ก็ได้สังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค Aerosol assisted chemical vapor deposited (AACVD) เช่นกัน พบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีความหนา 612-871 นาโนเมตร ฟิล์มเป็นเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอะนาเทส โดยเนื้อฟิล์มมีความสม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของขนาดสม่ำเสมอ และเป็นฟิล์มที่มีอนุภาคเล็กมาก

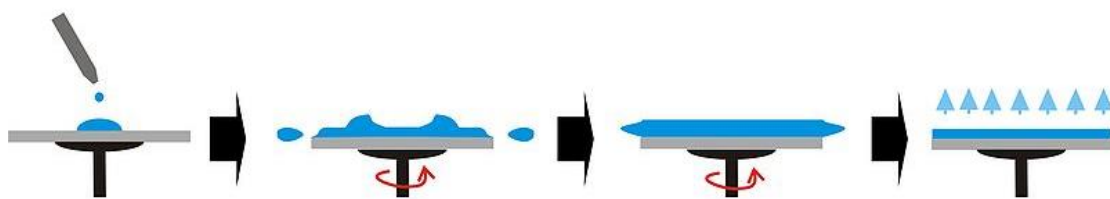


รูปที่ 1.11 การเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิค AACVP ของ Chua และคณะ (2013)

(ที่มา: Chua และคณะ 2013)

1.2.5.2 กระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

กระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้อย่างมากในการเตรียมฟิล์มบางบนวัสดุฐานที่มีผิวเรียบ โดยใช้สารเคลือบเพียงเล็กน้อยหยดลงบนวัสดุฐานที่ต้องการเคลือบโดยทำการหมุนอย่างช้าๆหรือไม่มีการหมุนเลยในขณะที่หยดสารเคลือบ จากนั้นเพิ่มความเร็วในการหมุนให้สูงเพื่อให้สารเคลือบกระจายทั่วผิวหน้าของวัสดุด้วยแรงเหวี่ยง โดยการหมุนจะหมุนอย่างต่อเนื่อง ความหนาของฟิล์มจะขึ้นกับความเร็วในการหมุน เวลาในการหมุนเหวี่ยง ตัวทำละลายที่ใช้และการระเหยได้ของตัวทำละลาย ความหนืดของสารละลาย และมุมที่ใช้ในการหมุน การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงนิยมนำมาใช้ในการเคลือบระดับไมโครเมตรของออกไซด์ โดยจะใช้สารเคลือบที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจล ในการสร้างฟิล์มบางระดับนาโน ดังรูปที่ 1.12 (ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_coating)

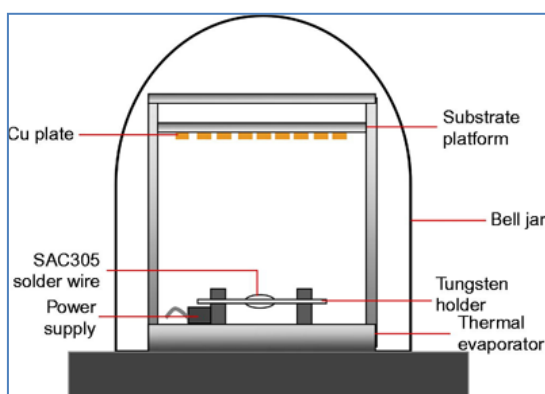


รูปที่ 1.12 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง
(ที่มา: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolGel_SpinCoating.jpg)

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ก็ได้้นำกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงมาใช้เช่นกันดังเช่นงานวิจัยของ Wang และ Hu (2014) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์วิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเคลือบบนกระจก ITO ทำการเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยนำไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ หยดลงในไฮโดเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีการให้ความเย็น ทำการปั่นกวนให้สารผสมเข้ากัน และทำการบ่มโซลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้เคลือบบนกระจก ITO ในการหมุนเหวี่ยงใช้ความเร็วรอบ 1,600 รอบต่อนาที และนำฟิล์มที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที โดยความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้จากความเข้มข้นของสารเคลือบที่ใช้และจำนวนชั้นที่เคลือบ จากงานวิจัยนี้ความหนาของฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้นมีความหนา 80-150 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังมีการนำวิธีหมุนเคลือบมาใช้ในการเตรียมฟิล์มแบบหลายชั้น (Multilayer) ที่มีสารเคลือบแต่ละชั้นที่แตกต่างกันดังงานวิจัยของ Jiang และคณะ(2009) โดยเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์จาก $TiSO_4$ มาควนผสมกับแอมโมเนีย (NH_3) จากนั้นนำตตะกอนที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยงแล้วเอามาล้างด้วย NH_3 และนำมากระจายตัวใน H_2O_2 ที่มีการให้ความเย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลาย NH_3 และปั่นกวนอย่างรุนแรงต่อเนื่องเป็นเวลานาน 48-72 ชั่วโมง ที่ 5 องศาเซลเซียสก็จะได้สารเคลือบที่พร้อมนำมาเคลือบบนแก้ว (Corning-1737 glass) และ Silicon wafers ที่มีความหนา 200 นาโนเมตร การเตรียมฟิล์มบางด้วยการหมุนเหวี่ยงเตรียมที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที นำฟิล์มไปให้ความร้อน 150 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที ในการเคลือบ 1 รอบจะได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 18 นาโนเมตร สุดท้ายนำฟิล์มให้ความร้อน 200-1,000 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ฟิล์มไทเทเนียมที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวนี้มีผิวที่เรียบและมีความหนาแน่นสูง

1.2.5.3 การเคลือบด้วยไอระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation method)

การเคลือบด้วยไอระเหยด้วยความร้อน เป็นวิธีการที่อาศัยกระบวนการพื้นฐาน 2 กระบวนการ คือการระเหยกลายเป็นไอและการควบแน่น โดยเป็นกระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศที่มีความเป็นสุญญากาศสูง (High vacuum) โดยการให้ความร้อนไปยังสารเคลือบด้วยความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารเคลือบ เพื่อให้ระเหยกลายเป็นไอ จากนั้นจะปล่อยก๊าซเข้าไประบบเพื่อให้ก๊าซเป็นตัวพาไอของอนุภาคที่หลุดออกมาจากสารเคลือบไปยังวัสดุฐาน ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ความบริสุทธิ์ของฟิล์มขึ้นกับระบบสุญญากาศหรือความบริสุทธิ์ของก๊าซที่ใช้ในระบบ และความบริสุทธิ์ของสารเคลือบที่ใช้ ความหนาของฟิล์มขึ้นกับความสามารถของก๊าซในการจับกับไอของสารเคลือบ โดยไส้หลอดที่ใช้ในการให้ความร้อน (Filament) ที่ใช้ต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของสารที่ให้เพราะสารบางชนิดต้องการพลังงานสูงในการกลายเป็นไอ การระเหยด้วยวิธีนี้จะมีอัตราการระเหยกลายเป็นไอเร็วกว่าวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และด้วยบรรจุสารเคลือบ (Crucible) ควรเลือกให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของสารเคลือบนั้นๆ ดังรูปที่ 1.13 (ที่มา: [http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_\(deposition\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_(deposition)))



รูปที่ 1.13 กระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยด้วยความร้อน

(ที่มา: <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=17076886>)

กระบวนการนี้ได้นำมาใช้กับการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ดังเช่นงานวิจัยของ Zribi และคณะ (2007) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุฐานแก้ว เตรียมโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจนเป็นวัสดุเคลือบ ทำการระเหยโดยบรรจุสารไว้ใน Crucible ที่ทำจากแลนทานัมในการควบคุมพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยในการเคลือบจะมีการให้อุณหภูมิของแก้วอยู่ที่ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นนำฟิล์มไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 520 องศาเซลเซียสนาน 4 ชั่วโมง ฟิล์มที่ได้จากกระบวนการนี้มีผิวลักษณะ

พรมเนื่องจากการนำไปให้ความร้อนไล่ไอออกไชต์ออก พิล์มมีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบที่ดี และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางแสงก็ให้คุณสมบัติที่ดีเช่นกัน

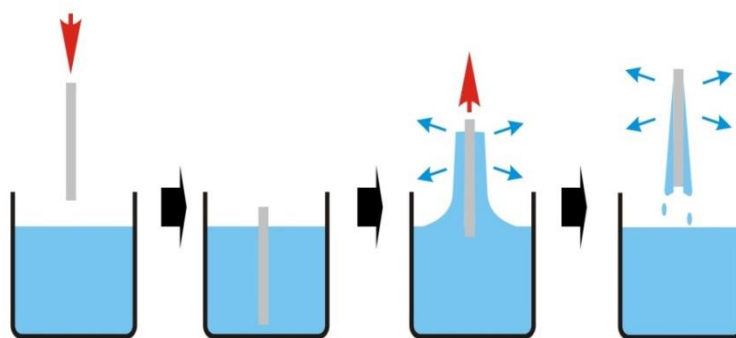
1.2.5.4 กระบวนการเคลือบด้วยของเหลว (Liquid phase deposition)

เป็นหนึ่งในกระบวนการแบบเปียกที่ใช้เตรียมฟิล์มบางของโลหะออกไซด์ โดยวิธีการนี้จะเป็นการสร้างโลหะออกไซด์หรือฟิล์มบางไฮดรอกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกันบนวัสดุฐาน (ที่มา:http://www.chem.ryukoku.ac.jp/aoi/research/LPD_e.htm) ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Yu และคณะ (2005) ได้ใช้วิธีการเคลือบด้วยของเหลวที่อุณหภูมิต่ำในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนใยแก้ว เนื่องจากวิธีนี้กระบวนการที่สามารถทำได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องมีความพิเศษ และไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง สามารถนำมาใช้ได้ง่ายในการเตรียมบนวัสดุที่มีขนาดใหญ่ และมีพื้นผิวที่ซับซ้อนได้ การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมโดยใช้ไทเทเนียมเตตระฟลูออไรด์ (TiF_4) และกรดบอริก (H_3BO_3) ผสมให้เข้ากันในน้ำกลั่น ทำการปรับ pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และแอมโมเนียมไดออกไซด์ (NH_4OH) จากนั้นนำเส้นใยแก้วไปจุ่มแช่ในสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมง และนำเส้นใยแก้วที่เคลือบแล้วนั้นไปล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง

1.2.5.5 กระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating method)

กระบวนการจุ่มเคลือบเป็นกระบวนการเคลือบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งมักจะใช้ร่วมกับกระบวนการโซล-เจล ในการเตรียมสารเคลือบ กระบวนการจุ่มเคลือบสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนคือ ดังรูปที่ 1.14

- 1) Immersion การแช่โดยวัสดุที่ต้องการเคลือบจะถูกแช่อยู่ในสารเคลือบด้วยความเร็วคงที่
- 2) Start-up การเริ่มต้นการดึงวัสดุเคลือบที่อยู่ในสารเคลือบขึ้น
- 3) Deposition การเกิดชั้นฟิล์มบางบนผิวเคลือบขณะดึง ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบนั้นจะขึ้นกับความเร็วในการดึง (ดึงเร็วชั้นฟิล์มจะหนา)
- 4) Drainage การระบายของเหลวส่วนเกินออกจากพื้นผิว
- 5) Evaporation การระเหยตัวทำละลายออกจากของเหลวหรือฟิล์มบาง เช่น แอลกอฮอล์ โดยการระเหยจะเริ่มขึ้นเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ Deposition และ Drainage (ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Dip-coating>)



รูปที่ 1.14 กระบวนการจุ่มเคลือบ

(ที่มา: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sol-Gel-Schicht>)

กระบวนการโซล-เจล และการบวนการจุ่มเคลือบถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Mathews และคณะ (2009) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธีโซล-เจลในการเตรียมสารเคลือบ และเคลือบฟิล์มบางลงบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ ทำการเตรียมสารเคลือบโดยใช้ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ เอทานอล กรดไฮโดรคลอริก และน้ำ ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนนาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระจกที่ทำความสะอาดแล้วมาแช่ในสารเคลือบนาน 3 นาที และทำการดึงขึ้นด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 2 นาที และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200-600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ความหนาของฟิล์มที่ได้ 1 ชั้นมีความหนา 150 นาโนเมตร และที่จำนวนเคลือบ 4 ชั้นฟิล์มมีความหนาประมาณ 650 นาโนเมตร และเมื่อนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสทำให้ความหนาของฟิล์มลดลงประมาณ 20-30 นาโนเมตร โดยฟิล์มมีความหนาอยู่ที่ 620-640 นาโนเมตร Mathews ได้กล่าวในงานวิจัยนี้ว่ากระบวนการจุ่มเคลือบเป็นกระบวนการที่ประหยัด สามารถทำได้ง่ายในการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้จากจำนวนรอบของการจุ่มเคลือบ และการบ่มสารเคลือบ ซึ่งจากงานวิจัยนี้การบ่มฟิล์มที่ 100 องศาเซลเซียสนาน 2 นาที ทำให้ได้ฟิล์มที่มีผิวเรียบ และมีความหนาที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Sonawane และคณะ (2002) ได้สังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโซล-เจลโดยนำไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ ผสมกับน้ำ จะเกิดตะกอน จากนั้นล้างด้วยน้ำ และแอลกอฮอล์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะได้โซลที่มีสีส้มจากนั้นนำโซลไปบ่มนาน 12-13 ชั่วโมง จะได้โซลสีเหลืองที่พร้อมนำไปใช้งาน ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบด้วยอัตราเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400

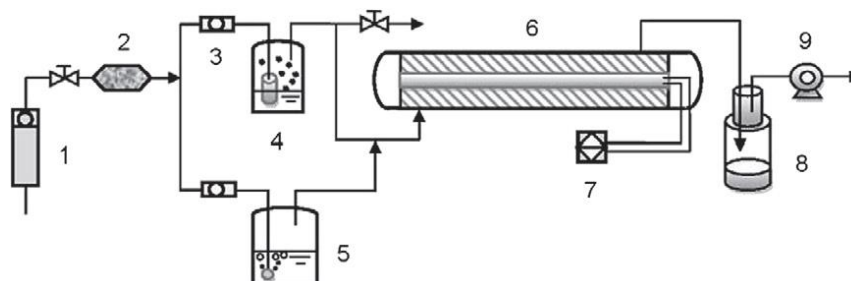
องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง จากงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล และการจุ่มเคลือบ เป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายสามารถนำไปประยุกต์กับ แผ่นกระจก แผ่นซิลิกา และแผ่นสแตนเลส โดยฟิล์มที่ได้มีความใส เป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะที่ดีสม่ำเสมอทั่วผิวเคลือบ โดยความหนาจะขึ้นกับความเข้มข้นและความหนืดของโซล โดยที่ความหนืดในช่วง 4,000-12,000 เป็นความหนืดของโซลที่เหมาะสมที่ให้การยึดเกาะที่ดี โดยฟิล์มมีความหนา 20-100 นาโนเมตร และอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ของฟิล์มมีขนาด 4-10 นาโนเมตร และที่อุณหภูมิเผา 400 องศาเซลเซียส ให้สมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีที่สุดในการย่อยสลายกรดซาลิไซลิก และ MB

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้เตรียมบนวัสดุหลากหลายประเภท เช่น สแตนเลส เช่นงานวิจัยของ Cao และคณะ (2014) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนสแตนเลส เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย *L. acidophilus* และ *C. albicans* และงานวิจัยของ Arman และคณะ (2014) ก็ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนสแตนเลส 304 (304 stainless steel) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีการนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้กับงานทางด้านเซรามิกส์ด้วย เช่นงานวิจัยของ Mollahosseini และ Rahimpour (2014) ได้เตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนไส้กรองเซรามิกส์ พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มสมบัติการกระจายตัวของน้ำ (Wettability) และน้ำที่ผ่านการกรองมีความบริสุทธิ์มากขึ้น งานวิจัยของ Ahmadi และคณะ (2014) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนแก้วเซรามิกส์ และนอกจากนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาเคลือบบนวัสดุประเภทเส้นใยอีกด้วยไม่ว่าจะเป็นเส้นใยจากธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์ เช่นงานวิจัยของ Galkina และคณะ (2014) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยฝ้าย (Cotton) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย *E.coli* ภายใต้แสงยูวี และงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2014) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนขนสัตว์เพื่อเพิ่มสมบัติการทำความสะอาดตัวเองได้ และการนำมาใช้ในเส้นใยสังเคราะห์ เช่นงานวิจัยของ Wang และ Ku (2003) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้วนำแสง โดยได้กล่าวไว้ว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้เส้นใยแก้วนำแสงได้

นอกจากนี้ยังมีการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงเหมาะที่จะนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้งานในด้านแคตะไลต์ ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Liu และคณะ (2011) ได้สังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้วโดยใช้กระบวนการโซล-เจล และการบวนการทางความร้อน สาเหตุที่เลือกใช้เส้นใยแก้วเนื่องจาก เส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มีการยึดหยุ่นที่ดี มีความเสถียรของ pH ราคาถูก

และมีพื้นผิวสูง จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุฐานเพื่อสังเคราะห์วัสดุอื่น ๆ ลงบนพื้นผิว เช่น การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนผิวของท่อเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้ว ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำเอาข้อดีของเส้นใยแก้วและนำมาใช้เป็นวัสดุฐานในการทำวิจัยครั้งนี้ และเมื่อนำเส้นใยแก้วมาเคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายมลพิษต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมได้ดีอีกด้วย เช่นงานวิจัยของ Panniello และคณะ (2012) สังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และเคลือบบนเส้นใยแก้วด้วยกระบวนการโซล-เจล เหนืออุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใยแก้วที่ใช้เป็นใยแก้วชนิด E-Glass ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-12 ไมโครเมตร มีส่วนองค์ประกอบพื้นฐานคือ ซิลิกา (SiO_2) 54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (w/w) อะลูมินา (Al_2O_3) 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (w/w) แคลเซียมออกไซด์+แมกนีเซียมออกไซด์ ($\text{CaO} + \text{MgO}$) 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (w/w) โบรอนไดรอกไซด์ (B_2O_3) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (w/w) และ โซเดียมออกไซด์ + โพแทสเซียมออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (w/w) เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเคลือบติดที่ดี มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดี เหมาะที่จะนำไปย่อยสลายมลพิษในอากาศ และมลพิษในน้ำ เช่นงานวิจัยของ คิว Ao และคณะ (2003) ได้สังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแก้วด้วยกระบวนการโซล-เจล เพื่อฟอกอากาศในที่ร่ม ด้วยกระบวนการโซล-เจล บนเส้นใยแก้วสามารถย่อยสลายก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และสารในกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่าย (BTEX) ได้สูงกว่า P25 ในที่ร่ม โดยเขาได้กล่าวว่าพื้นที่ผิวคือปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายมลพิษในอากาศในที่ร่มและสมบัติโฟโตแคตะไลติก ส่วนการใช้งานในการบำบัดมลพิษทางน้ำก็สามารถทำได้และมีประสิทธิภาพที่ดีเช่นกันตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Wang และคณะ (2014) ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล บนเส้นใยแก้วชนิดเสริมแรง (Glass fiber reinforced cement, GRC) เป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทดไฟ และมีสมบัติทางกลที่ดี ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดี เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดี มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีสามารถย่อยสลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู (Reactive Blue, RB) ได้ในเวลา 20 นาทีภายใต้การฉายแสงยูวี และมีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองได้ดีด้วย และงานวิจัยของ Lin และคณะ (2010) ได้นำเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล และกระบวนการจุ่มเคลือบ มาบรรจุในชุดทดสอบดังรูปที่ 1.15 ในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้แสงที่ความยาวคลื่น 254-365 นาโนเมตร เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้สูงสุด 95 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 20-30 นาทีของการ

ฉายแสงยูวี ซึ่งเป็นอิทธิพลจากพื้นที่ผิวที่มากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้มากเช่นกัน ทำให้มีประสิทธิภาพดีในการฆ่าเชื้อโรค การกำจัดสารอินทรีย์ และการกำจัดสารมลพิษต่างๆ



รูปที่ 1.15 เครื่องทดสอบของ Lin และคณะ (2010)

(ที่มา: Lin และคณะ 2010)

1.2.6 การปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำดื่ม

การเลือกน้ำดื่มที่สะอาดถือเป็นเรื่องสำคัญ เพราะการบริโภคน้ำที่สะอาดและเหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญที่ร่างกายต้องการ แต่รู้หรือไม่ว่า อาจมีสารเคมีอันตรายปนเปื้อนอยู่ในน้ำดื่มได้ โดยที่ตัวกรองที่ใช้อาจไม่สามารถกำจัดออกไป ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะนำไปสู่โรคอันตรายมากมาย และจากการศึกษาพบ 4 สารอันตรายที่พบบ่อยที่สุด คือ

1) สารหนู เป็นธาตุธรรมชาติที่พบในดินและแร่ สารหนูใช้ในการดูแลรักษาเนื้อไม้ ใช้เป็นยาฆ่าแมลง และใช้ในงานอุตสาหกรรม โดยสารหนูสามารถปนเปื้อนอยู่ในทั้งในอากาศ น้ำ และดิน ถ้าน้ำที่ดื่มมีปริมาณของสารหนูสูง สามารถทำให้ปอดเสียหายเทียบเท่ากับการสูบบุหรี่นาน 10 ปี แม้ปริมาณปานกลางก็สามารถลดประสิทธิภาพการทำงานของปอดได้เช่นกัน เราอาจได้รับสารหนูโดย

- การกินอาหาร น้ำ หรืออากาศที่ปนเปื้อน
- การหายใจเอาฝุ่นละอองหรือเขม่าควันจากไม้ที่มีสารหนู
- การอยู่ในบริเวณที่มีระดับสารหนูในหินสูง
- การทำงานที่ต้องทำหรือใช้สารหนู

สิ่งที่น่ากลัวที่สุดก็คือ สารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำใต้ดิน (Contaminated groundwater) ซึ่งมีการพบสารหนูระดับสูงในน้ำใต้ดินหลายประเทศ เช่น อาร์เจนตินา บังกลาเทศ ชิลี จีน อินเดีย เม็กซิโก และสหรัฐอเมริกา

2) ทองแดง เป็นภัยร้ายที่มักพบปนเปื้อนในน้ำดื่ม เพราะเป็นสารที่ใช้ในท่อน้ำ อาจทำให้เกิดการสะสมของแอมัลลอยด์บีตา ซึ่งเป็น โปรตีนที่พับตัวผิดปกติในสมอง จนนำไปสู่โรคอัลไซเมอร์ โรคกล้ามเนื้ออ่อนแอ และโรคที่เกี่ยวข้องกับเส้นเลือดในสมอง

3) คลอรีน เป็นสารเคมีที่ใช้ฆ่าแบคทีเรียในน้ำดื่มและน้ำในสระ แต่น้ำที่ได้รับสารเคมีนี้ สามารถรวมกับสารอินทรีย์ เช่น ฟิชที่เน่าเปื่อย กลายเป็นไตรฮาโลมีเทน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งระดับสูง

4) ตะกั่ว โลหะที่สามารถขึ้นในน้ำและเดินทางไปตามสายเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ เสี่ยงต่อการเป็นโรคความดันโลหิตและปัญหาไต

(ที่มา: [http://haamor.com/น้ำดื่มปนเปื้อน-1 /](http://haamor.com/น้ำดื่มปนเปื้อน-1/))

นอกจากโลหะหนักดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีการพบสารอันตรายฟีนอลปนเปื้อนในน้ำดื่ม ที่ชุมชน ต.หนองแห่น อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา พบฟีนอลปนเปื้อนในน้ำและเลือดชาวบ้าน สำนักงานคณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ (สช.) ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ได้ทำการตรวจหาการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเพื่อวางแนวทางในการฟื้นฟู ต.หนองแห่น ผลการตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นพบสารฟีนอล ที่มีฤทธิ์ทำลายตับไต ระบบสืบพันธุ์ แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมและคน และในบ่อน้ำตื้น (ลึก 8-10 เมตร) สำหรับอุปโภคและบริโภคเกินมาตรฐาน และยังพบสารอันตรายทั้งที่จัดอยู่ในประเภทสารก่อมะเร็งและไม่ก่อมะเร็งอีกหลายตัว (ที่มา: http://www.thia.in.th/welcome/article_read/289) และเมื่อนำน้ำเสียในพื้นที่ไปตรวจสอบหาสารเคมีอันตราย เมื่อเดือนสิงหาคม 2555 พบว่ามีปริมาณสารฟีนอล 29.14 มิลลิกรัมต่อลิตร เกินจากค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้คือต้องต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี 31.16 มิลลิกรัมต่อลิตร เกินจากค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้คือต้องต่ำกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดง 3.53 มิลลิกรัมต่อลิตร เกินจากค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้คือต้องต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียม 1.66 มิลลิกรัมต่อลิตร เกินจากค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้คือต้องต่ำกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นต้น (ที่มา: <http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/politics/analysis/20120908/469309/ที่ ง ส า ร พื ช ฉะเชิงเทรา-พบสารก่อมะเร็งเกินมาตรฐาน.html>)

นอกจากนี้ยังมีรายงานการตรวจสอบสารเคมีอันตรายในน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมและการปนเปื้อนของสารเคมีในคลองบริเวณใกล้เคียงซึ่งเชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ประเทศไทย พ.ศ. 2553 เป็นผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดินที่เก็บโดยหน่วยศึกษาและเฝ้าระวังมลพิษทางน้ำพบโลหะหนัก และสารเคมีอันตรายที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงในน้ำและตะกอนดินในคลองที่เชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยา สารเคมีบางชนิดที่พบนั้นมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานน้ำผิวดินในประเทศไทย นอกจากนี้ยังพบสารเคมีที่ยังไม่ถูกบรรจุอยู่ในมาตรฐานของประเทศไทยอีกด้วยจากตัวอย่างน้ำที่มาจากโรงงานฟอกย้อมพบสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น สารโนนิลฟีนอล (Nonyl

phenols) ซึ่งเป็นสารที่คงทนในสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติรบกวนการทำงานของฮอร์โมนในสิ่งมีชีวิต และสาร 2-เนฟทาเลินาามีน หรือ 2-เนฟทิลเอมีน (2-Naphthalenamine หรือ 2-Naphthylamine) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากการสลายตัวของสีย้อมผ้าบางชนิด เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ในน้ำทิ้งที่ปล่อยจากโรงงานสามชัยพิมพ์ผ้า และพบสาร ไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต (Tri-iso-butyl phosphate; TiBP) ซึ่งเป็นสารพิษที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ จากผลการสำรวจที่ออกมาเป็นอีกหนึ่งของสัญญาณเตือนถึงอันตรายที่แฝงอยู่ในมลพิษอุตสาหกรรม เมื่อสารพิษเหล่านี้ถูกปล่อยออกมาแล้ว เป็นเรื่องยากที่จะตรวจสอบและที่สำคัญคือยากที่จะกำจัดสารเคมีเหล่านี้ให้หมดไปจากแหล่งน้ำ ซึ่งบางชนิดก็เป็นสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากคลองลำโรง พบสาร โนนิลฟีนอล และสาร ไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต รวมถึงโลหะหนักอย่างทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสี มีค่าเกินมาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินของไทยประมาณ 3-8 เท่า และตัวอย่างตะกอนดินพบปนเปื้อนโครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสีในระดับสูง โดยสังกะสีมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นพื้นฐานมากถึง 30 เท่า ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากคลองบางนางเกร็งพบปนเปื้อนสาร โนนิลฟีนอลและ ไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต เช่นกัน และยังพบทองแดงและนิกเกิลสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำผิวดินของประเทศไทยถึง 2 เท่า นอกจากนี้ตัวอย่างตะกอนดินจากคลองบางนางเกร็งมีการปนเปื้อนโครเมียม ทองแดง สังกะสี และนิกเกิลสูงที่สุดในตัวอย่างตะกอนดินทั้งหมดที่เก็บในการศึกษาครั้งนี้ โดยค่าสังกะสีและนิกเกิลมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นพื้นฐานปกติถึง 30 และ 80 เท่า ตามลำดับ

(ที่มา: <http://www.greenpeace.org/seasia/th/press/releases/water-report-launch/>)

1.2.7 การปนเปื้อนของแบคทีเรียในน้ำดื่ม

การตรวจสอบทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่มเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งจะต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำดื่มนั้นสามารถนำไปใช้บริโภคหรือดื่มได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยทั่วไปน้ำที่นำมาบริโภค เช่น น้ำประปา จะผลิตจากแหล่งน้ำผิวดิน (Surface water) ซึ่งมีแบคทีเรียในธรรมชาติอาศัยอยู่ เช่น *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Spirillum* และ *Bacillus* เป็นต้น สำหรับน้ำดื่มจำเป็นจะต้องปราศจากแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร เช่น อหิวาห์ ตกโรค หรือโรคบิด การตรวจสอบคุณภาพของน้ำดื่มไม่นิยมตรวจวิเคราะห์แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคโดยตรง ทั้งนี้เพราะต้องใช้เทคนิค และวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก แต่จะใช้วิธีการที่จะตรวจหาแบคทีเรียบางกลุ่มซึ่งไม่ก่อให้เกิดโรค เช่น *Escherichia coli* (*E.coli*) หรือ *Streptococcus faecalis* แบคทีเรียเหล่านี้ถูกพบเป็นประจำในทางเดินอาหารของคนและสัตว์เลื้อยคลาน แต่ไม่พบในดินและน้ำ ดังนั้นถ้าตรวจพบแบคทีเรียดังกล่าวนี้ในน้ำดื่มก็จะแสดงให้เห็นถึงการปนเปื้อนของน้ำจากอุจจาระ ซึ่งกระทรวงสาธารณสุขได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของน้ำที่จะนำมาใช้ดื่มได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพจะต้องมีจำนวนของโคลิฟอร์ม (Coliform bacteria) น้อยกว่า 2.2 เซลล์ต่อ

น้ำ 100 มิลลิลิตร (MPN/100ml) และต้องไม่มีโคลิฟอร์มของแบคทีเรีย *E.coli* (ที่มา: <http://www.technoinhome.com/front/webboard/show.php?tbl=tblwb03&id=19>)

จากผลงานวิจัยของคุณฉวีและคณะ (2539) จากคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในหัวข้อ “คุณภาพน้ำดื่มในกรุงเทพฯ” จากการสำรวจแหล่งน้ำดื่มของชาวกรุงเทพมหานคร โดยการสุ่มสัมภาษณ์หัวหน้าครอบครัวผู้ใช้น้ำ จำนวน 406 หลังคาเรือนในเขตพื้นที่ห้วยขวาง พญาไท สามเสน บางเขน และจตุจักร สรุปว่า แหล่งน้ำดื่มของชาวกรุงเทพมหานคร ร้อยละ 86.2 ได้จากน้ำประปา รองลงมา ร้อยละ 36.2 ได้จากน้ำดื่มบรรจุขวด โดยที่น้ำประปาที่ใช้ดื่ม ร้อยละ 92.6 นำมาต้มก่อนดื่ม ร้อยละ 40.9 กรองก่อนดื่ม และร้อยละ 15.7 ทั้งกรองแล้วต้มก่อนดื่ม เมื่อออกนอกบ้านจะดื่มน้ำอัดลมหรือน้ำหวานเป็นอันดับแรก รองลงมาจะดื่มน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวดตามลำดับ โดยคำนึงถึงความสะอาด ความทันสมัย และความสดชื่นรวมทั้งราคา น้ำดื่มบรรจุขวดพบปริมาณเชื้อแบคทีเรียมากกว่าน้ำประปา โดยพบว่าปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (Heterotrophic plate count, HPC) ที่เกินมาตรฐานในน้ำประปา เพียงร้อยละ 2 แต่ในน้ำดื่มบรรจุขวดกลับสูงถึงร้อยละ 97 ส่วนแบคทีเรียกลุ่มฉวยโอกาสก่อโรค ได้แก่ *P.aeruginosa*, *S.aureas* และ *C.perfringens* พบในน้ำประปา ร้อยละ 8.2 และร้อยละ 2 ตามลำดับ แต่กลับพบในน้ำดื่มบรรจุขวดสูงถึงร้อยละ 23.3 และร้อยละ 9 ตามลำดับ ส่วนแบคทีเรียกลุ่มทำให้เกิดโรคอุจจาระร่วง ไม่พบทั้งในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวด จากตัวอย่างทั้งหมด 155 ตัวอย่าง เป็นน้ำดื่มบรรจุขวดที่ผลิตจากสถานที่เข้าข่ายโรงงาน 10 ตัวอย่าง และไม่เข้าข่ายโรงงาน 145 ตัวอย่าง โดยมีเครื่องหมาย อย. จริงกำกับ เพียง 38 ตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งทั้ง 38 ตัวอย่าง ตรวจพบเชื้อแบคทีเรียที่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ดังนี้

ร้อยละ 78.9 พบโคลิฟอร์มทั้งหมด

ร้อยละ 15.8 พบ *Pesudomonas aeruginosa*

ร้อยละ 26.0 พบ *Staphylococcus aureus* และ

ร้อยละ 10.5 พบ *Clostridium perfringens*

จากการสุ่มตรวจตู้ น้ำดื่มไม่ผ่านมาตรฐานในกรุงเทพมหานครพบมีเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อนกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ สภาพตู้สกปรก แจ็งผู้ประกอบการหมั่นทำความสะอาด ขูยัดใบอนุญาตหากผิดซ้ำซาก เตือนเจ้าของตู้ น้ำขอใบอนุญาตหากฝ่าฝืนจะอายัดเครื่องทันที เมื่อวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2553 นางอินจิรา นิยมธูร ผู้อำนวยการกองสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร กล่าวถึงการควบคุมตู้ น้ำดื่มหยอดเหรียญในเขตกรุงเทพมหานครให้มีมาตรฐาน ถูกสุขลักษณะว่า จากการลงพื้นที่ตรวจสอบคุณภาพน้ำดื่มจากตู้หยอดเหรียญเมื่อช่วงปลายปี 2553 โดยสุ่มตรวจตัวอย่างน้ำดื่มจำนวน 618 ตัวอย่างทั้ง 50 เขตในกรุงเทพมหานคร พบการปนเปื้อน

ของเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำดื่มจำนวน 44 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 7.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ได้มาตรฐาน โดยแจ้งให้ผู้ประกอบการล้างทำความสะอาดตู้และอุปกรณ์ เมื่อนำตัวอย่างน้ำดื่มไปตรวจสอบอีกครั้งก็ไม่พบการปนเปื้อนซ้ำ แต่ถ้ามีตู้ใดที่ปนเปื้อนซ้ำก็จะยึดใบอนุญาตและปิดบริการทันที สำหรับการควบคุมตู้ น้ำดื่มเน้นการเฝ้าระวัง โดยลงพื้นที่สุ่มตรวจการปนเปื้อนเชื้อโรคปีละ 3 ครั้ง ตามนโยบายผู้บริหารกรุงเทพมหานคร นางอินจิรา กล่าวว่าการแก้ปัญหาการปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดโอกาสที่จะปนเปื้อนเชื้อโรคและเป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกายแล้ว ยังพบว่าผู้ประกอบการตู้ น้ำดื่มหยอดเหรียญไม่ดูแลรักษาเครื่องให้สะอาดและมีคราบฝุ่นละอองจับสกปรก รศ.ดร.วิสิฐ จะวะสิต ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล ระบุว่า ตู้ น้ำดื่มหยอดเหรียญทั่วไปผ่านกระบวนการผลิตน้ำที่เรียกว่าอาร์โอ เป็นการกรองน้ำให้สะอาดบริสุทธิ์ หากน้ำผ่านการกรองที่ได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งยึดหลักเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก ผู้บริโภคน้ำก็จะไม่เป็นอันตราย แต่ น้ำดื่มปนเปื้อนเชื้อโรคเกิดจากผู้ประกอบกิจการไม่ดูแลรักษาตัวเครื่องและอุปกรณ์ให้สะอาดอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวไส้กรองที่มีอายุการใช้งาน จะต้องทำความสะอาดอย่างถี่ตามระยะเวลาที่เหมาะสม ไม่ปล่อยให้เชื้อโรคสะสมหรือตกค้างอยู่ในเครื่อง อีกทั้งเจ้าของเครื่องมักจะคัดแปลงหรือซ่อมแซมตู้ น้ำดื่มด้วยตัวเอง ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค น้ำดื่ม (ที่มา: <http://www.hiso.or.th/hiso/ghealth/newsx2226.php>)

1.2.8 วิธีบำบัดแบคทีเรียในน้ำดื่มแบบพื้นฐาน และการบำบัดด้วยปฏิกิริยา

โฟโตแคตะไลติก

การบำบัดน้ำดื่มที่ปนเปื้อนแบคทีเรียจึงมีความจำเป็นสำหรับน้ำดื่มที่ใช้ในการบริโภค การบำบัดน้ำดื่มปนเปื้อนแบคทีเรียด้วยวิธีพื้นฐานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1) คลอรีน สำหรับคลอรีนจะเป็นการเติมก๊าซคลอรีน หรือ โซเดียมหรือ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ลงในน้ำโดยปริมาณการเติมขึ้นอยู่กับชนิดของคลอรีนและความต้องการของน้ำชนิดนั้นๆ สำหรับน้ำดื่มจะมีการกำหนดปริมาณคลอรีนหลงเหลืออยู่ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาขั้นต่ำอยู่ที่ 20 นาที ประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากไม่มีความเชี่ยวชาญในการใช้ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อลดลงและเป็นปัญหาตามมาในภายหลังได้

2) คลอรีนไดออกไซด์ เป็นกลวิธีการฆ่าเชื้อซึ่งจะนำมาแทนที่คลอรีนมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากคุณสมบัติอันมหัศจรรย์ของคลอรีนไดออกไซด์ ที่มีความรุนแรงในการฆ่าเชื้อมากกว่า และนอกเหนือสิ่งอื่นใด คลอรีนไดออกไซด์ไม่มีผลกระทบจากค่า pH และ คลอรีนไดออกไซด์ยังไม่เหลือคลอรีนเป็นผลพลอยได้หลังจากการฆ่าเชื้อ ด้วยความคงทนที่มากกว่าคลอรีน ช่วยให้เกิดผลตกค้างนานขึ้นและเกิดการปกป้องที่นานขึ้น สำหรับน้ำดื่มจะต้องมีความเข้มข้น

หลงเหลือเป็นอย่างต่ำ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เวลาการฆ่าเชื้อ 15 นาทีเป็นขั้นต่ำ เป็นสิ่งที่ต้องเข้าใจว่าคลอรีนไดออกไซด์ไม่ใช่คลอรีน การทำลายไบโอฟิล์มในท่อหรือภาชนะบรรจุ ไปจนถึงป้องกันการเติบโตของเชื้อลิจิโอเนลล่า

3) โอโซน เป็นตัวฆ่าเชื้อที่แรงที่สุดที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำ โอโซนเมื่อฆ่าเชื้อแล้วจะไม่มีผลตกค้างใดๆทั้งสิ้นเพราะตัวโอโซนจะสลายตัวเป็นออกซิเจน ข้อเสียของโอโซนคือมีอายุสั้นและละลายน้ำได้ยาก ในระบบฆ่าเชื้อในน้ำดื่มโอโซนจะเป็นตัวหลักในการฆ่าเชื้อเพราะสามารถกำจัดได้หมดจดแม้กระทั่ง คลอรีน เหล็ก แมงกานีส หรือสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดฮิวมิก เป็นต้น ในประเทศเยอรมนีใช้โอโซนเป็นสารที่ใช้เพื่อจุดมุ่งหมายในการฆ่าเชื้อเท่านั้น

4) การฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวี สำหรับการฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวี น้ำที่ได้รับการฆ่าเชื้อจะถูกเคลื่อนจากรังสียูวีแพร่ผ่าน ซึ่งเป็นการฆ่าเชื้อที่ไม่มีผลต่อคุณภาพของน้ำ การฉายรังสียูวีจะไม่ก่อให้เกิดผลตกค้างใดๆทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามการฉายรังสียูวีสามารถฆ่าเชื้อโดยไม่ต้องใช้สารเคมีปะปนในน้ำได้ทันที

5) การฆ่าเชื้อด้วยประจุเงิน การฆ่าเชื้อชนิดนี้ทำได้โดยเติมประจุเงินเข้าไปในระบบประมาณ 0.05 ถึง 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประจุเงินมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแต่อย่างไรก็ตาม ความเกี่ยวข้องกับส่วนต่างๆยังไม่เป็นที่แน่นอน เวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อคือ 5-6 ชั่วโมงเป็นอย่างต่ำ และยังไม่เกิดการป้องกันระยะยาวซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ

6) การกรองเชื้อ ค่าใช้จ่ายสูงซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าการกรองเชื้อเป็นกรรมวิธีขั้นสูงสำหรับงานทางด้านเภสัชกรรม กระบวนการนี้ใช้การกรองระดับอุลตราซึ่งกรองอนุภาคเล็กถึง 0.000005 เมตร อย่างไรก็ตามการฆ่าเชื้อยังคงเป็นสิ่งจำเป็นอยู่ดี

7) การกรองทรายแบบช้า การกรองทรายแบบช้ามีความเร็วอยู่ที่ 0.1 เมตรต่อวินาที เพื่อลดจำนวนของเชื้อ แต่ด้วยการที่ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งเยอะและต้องมีการฆ่าเชื้อประกอบจึงทำให้การกรองชนิดนี้ลดลงอย่างรวดเร็ว

ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีพื้นฐานนี้อาจไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ และบางวิธีมีสารตกค้างเกิดขึ้นในระบบ อาจทำให้เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ ดังแสดงในตารางที่ 1.7 จึงมีการนำสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำ เช่นกำจัดเชื้อ *E.coli* ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จากงานวิจัยของ Sikong และคณะ (2011) ได้นำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการบำบัดน้ำที่เชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อตั้งต้น 10^3 CFU/ml โดยใช้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}/TiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับติบุกออกไซด์ (N-doped $3SnO_2/TiO_2$) โดยทำการทดสอบผ่านชุดกรองน้ำโฟโตแคตะไลติกที่บรรจุเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ ทำ

การทดสอบ 1-5 รอบ จากการทดสอบพบว่าฟิล์มสูตร 20N/3SnO₂/TiO₂ สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ในการทดสอบ 5 รอบ หรือที่เวลาประมาณ 93 นาที และจากงานวิจัยของ Boonyod และคณะ (2011) ได้ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วย ไอออนของเหล็ก สังกะราหที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับกระบวนการโซล-เจล จากงานวิจัยนี้พบว่าผง ไทเทเนียมที่สังกะราหได้สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ในเวลา 20 นาทีภายใต้แสงยูวี และสามารถฆ่า เชื้อ *E.coli* ได้ในเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ และนอกจากนี้ยังมีการนำไทเทเนียมได ออกไซด์ในการฆ่าไวรัสด้วย เช่นงานวิจัยของ Liga และคณะ (2011) ได้ทำการยับยั้งไวรัส MS2 (ATCC 15597-B1) ซึ่งเป็นไวรัสที่ปนเปื้อนในน้ำและสามารถขยายพันธุ์ได้ง่าย ทนต่อการฆ่าเชื้อ ด้วยคลอรีน และทนต่อรังสียูวี โดย Liga ได้นำไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงิน สูตรที่ดี ที่สุดคือ 5.95%Ag/P25TiO₂มาฆ่าเชื้อไวรัสดังกล่าว โดยสามารถฆ่าเชื้อไวรัส MS2 ได้ 37 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 10 นาที ด้วยอัตราการฆ่าเชื้อ 0.089 ต่อวินาที เขาได้กล่าวว่าไทเทเนียมได ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินสามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้

ตารางที่ 1.7 เปรียบเทียบวิธีพื้นฐานในการบำบัดเชื้อแบคทีเรีย

	คลอรีน	คลอรีนได ออกไซด์	โอโซน	อุลตราไวโอเลต
ความรุนแรง	ปานกลาง	รุนแรง	รุนแรงที่สุด	ปานกลาง
ผลตกค้าง	ชั่วโมง	วัน	นาที	ไม่มี
ความเกี่ยวข้องกับค่า pH	มาก	ไม่มี	ปานกลาง	ไม่มี
สารตกค้าง	THM,AOX	คลอไรด์	อาจจะเกิดโบรมेट	อาจจะเกิดไนไตรท์
การลงทุน	ต่ำ-สูง	ปานกลาง	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง
การบำรุงรักษา	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ

(ที่มา: <http://www.prominent.co.th/application/potable.html>)

1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการพัฒนาขึ้นในปี 1970 จนถึงปัจจุบัน โดยมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้กับสิ่งแวดล้อมในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ซึ่งมีจำนวนสารปนเปื้อนมากกว่า 1,000 ชนิด (พวงรัตน์ 2004) ได้ถูกนำมาทดสอบและพบว่าสามารถใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสในการกำจัดสารเหล่านั้นได้อย่างดีเยี่ยม ทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่มของฟีนอล ยาฆ่าแมลง สี สารในกลุ่มของ BTEX (เบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซิล และไซลีน) ซึ่งมาจากการปนเปื้อนของน้ำมัน ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีน เช่น ไตรคลอโรเอธิลีน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น และสารอินทรีย์ในกลุ่มโลหะหนัก และในปัจจุบันได้มีงานวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อย่างมากมาย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเป็นสารโฟโตแคตะไลสต์ที่ดี มีสมบัติทางเคมีที่ดีหลายอย่าง มีความเสถียรทางเคมี ราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยสมบัติเหล่านี้ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง (Fujishima และคณะ 2000) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ สารเคลือบผิววัสดุ การบำบัดอากาศและน้ำเสีย การทำความสะอาดตัวเอง และการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น

ด้วยข้อดีของสมบัติโฟโตแคตะไลติก จึงมีการนำสมบัติโฟโตแคตะไลติกมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น สีของเมทิลีนบลู ดังเช่นงานวิจัยของ Wen และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไอโอดีน และฟลูออไรด์ ในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวีและแสงขาวในเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดี และฟิล์มสามารถย่อยสลายไอออนของสารอินทรีย์ เช่น NO_3^- , NH_4^+ และ SO_4^{2-} ได้ดีเช่นกัน Hamadani และคณะ (2010) ได้ศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์และซัลเฟอร์ในการย่อยสลายสีย้อม Methyl range (MO) ภายใต้แสงยูวีและแสงขาว พบว่าฟิล์มสามารถย่อยสลายสีย้อม MO ได้ดีทั้งสองสภาวะแสง นอกจากการย่อยสลายสีย้อมแล้วสมบัติโฟโตแคตะไลติกยังสามารถใช้ในการย่อยสลายสารเคมีอันตราย เช่น สารฟีนอล หรือสารประกอบฟีนอลต่างๆ ดังเช่นงานวิจัยของ Rasalingam และคณะ (2014) ได้ศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยซิลิกาในการย่อยสลายสารฟีนอลโดยที่ไม่มีการฉายแสงในระบบพบว่าสามารถย่อยสลายฟีนอลได้ 24 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 120 นาที และเมื่อทำการฉายแสงยูวีพบว่าความสามารถในการย่อยสลายสารฟีนอลเพิ่มเป็น 57-100 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลาเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าแสงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก และจากงานวิจัยของ Guo และคณะ (2006) ได้นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตร มาย่อยสลาย

สารฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวี โดยสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายสารฟีนอลได้ 40 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาในการฉายแสงยูวีนาน 3 ชั่วโมง และสามารถย่อยสลายได้มากขึ้นถึง 81.6 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาในการฉายแสงนาน 12 ชั่วโมง จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการฉายแสงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

สารบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) ที่เป็นอันตรายและมักพบได้ง่ายในผลิตภัณฑ์จากพลาสติก เช่น ขวดน้ำพลาสติก ขวดนมพลาสติก และภาชนะบรรจุอื่นๆ ถ้าได้รับเข้าไปจะสะสมในร่างกายและทำให้เป็นมะเร็งได้ และหากสูดดมเข้าไปก็จะไปทำลายระบบทางเดินหายใจและอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ การกำจัดหรือย่อยสลายสารบิสฟีนอลเอด้วยวิธีการทั่วไปไม่สามารถทำได้เนื่องจากเป็นสารที่มีความซับซ้อนของโครงสร้าง จึงมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลาย ดังเช่นงานวิจัยของ Chiang และ Doong (2014) ได้นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล มาทำการย่อยสลายสาร BPA ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวี และแสงขาวโดยใช้ความเข้มแสง 8 วัตต์ พบว่าสามารถย่อยสลายสาร BPA ได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การฉายแสงยูวีนาน 120 นาที และสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 77 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงขาวนาน 120 นาที นอกจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วยังมีการนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มาย่อยสลายสาร BPA เช่นกัน ดังเช่นงานวิจัยของ M และคณะ (2011) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนโลหะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล เพื่อย่อยสลายสาร BPA ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ไมโครกรัมต่อลิตร ภายใต้การฉายแสงอาทิตย์นาน 180 นาที โดยสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 85 เปอร์เซ็นต์ภายใต้เวลาในการฉายแสงนาน 180 นาที และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร BPA เป็น 600 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลงเหลือ 60-65 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 180 นาที แต่ยังคงมีประสิทธิภาพดีในการย่อยสลายอยู่ นอกจากสาร BPA แล้วสารประกอบฟีนอลที่มีความอันตรายอีกตัวหนึ่งก็คือสารไดคลอโรฟีนอล (2,4-Dichlorophenol, 2,4-DCP) ซึ่งเป็นสารอันตรายสามารถทำให้เป็นมะเร็งได้ โดยสารดังกล่าวมักจะอยู่ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก ยาแก้แสบ เป็นต้น จึงมีการศึกษาการย่อยสลายสารดังกล่าวโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย ดังเช่นงานวิจัยของ Chang และคณะ (2009) ได้ศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยโพรพิริน (Prophyrin/TiO₂) ในการย่อยสลายสาร 2,4-DCP ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงขาว พบว่าสามารถความเข้มข้นที่ดีที่สุดที่สามารถย่อยสลายได้ คือที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถย่อยสลายได้ 81 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อความเข้มข้นของ 2,4-DCP เพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลงเช่นกัน โดยที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถ

ย่อยสลายได้ 42 เปอร์เซ็นต์ และจากงานวิจัยของ Melian และคณะ (2013) ได้ทำการย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP โดยใช้สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ทดสอบการย่อยสลายภายใต้ความเข้มแสง 60 วัตต์ นาน 2 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 2,4-DCP เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อปริมาณสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 1, 2 และ 3 กรัมต่อลิตร จากการทดสอบพบว่าสามารถย่อยสลายได้ 91.1, 91.5 และ 92.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่ง Melian ได้กล่าวว่าการศึกษาการย่อยสลายสารฟีนอลและสารประกอบฟีนอลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายได้ดีและเหมาะที่จะนำไปใช้งานในการบำบัดน้ำต่อไป

นอกจากประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารเคมีต่างๆแล้วนั้น สมบัติโฟโตแคตะไลติกยังมีความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย หรือเชื้อราอีกด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Sikong และคณะ (2010) ได้ทำการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Salmonella Typhi* ที่มีความเข้มข้นเชื้อตั้งต้น 1×10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ภายใต้การรับแสงยูวีและแสงขาวด้วยผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไอรอนและทินออกไซด์ ($\text{Fe}^{3+}/\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$) ทำการเตรียมอนุภาคผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร $0.5\text{Fe}^{3+}/\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ สามารถฆ่าเชื้อ *S.typhi* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 120 นาทีภายใต้การฉายแสงยูวี และ 25.87 เปอร์เซ็นต์ภายใต้แสงขาว ส่วนฟิล์ม $0.5\text{Fe}^{3+}/\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ ที่เคลือบบนพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) สามารถฆ่าเชื้อ *S.typhi* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 120 นาที ภายใต้แสงยูวี และ 74.13 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงขาว และจากงานวิจัยของ Ubonchonlakate และคณะ (2011) ได้นำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงินและนิกเกิลมาทดสอบการยับยั้งเชื้อรา *P. aeruginosa* ที่มีความเข้มข้นเชื้อตั้งต้น 7×10^2 โคโลนีต่อมิลลิลิตร โดยใช้ฟิล์ม $\text{Ag}/\text{Ni}/\text{TiO}_2$ ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล เคลือบบนเส้นใยแก้ว และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่าฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2\text{-1Ag}$ และ $\text{TiO}_2\text{-1Ag-1Ni}$ สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 15 นาทีของการรับแสงยูวี และฟิล์มสูตร $\text{TiO}_2\text{-1Ni}$ สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 15 นาทีของการรับแสงขาว และนอกจากการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแล้วนั้น การฆ่าเชื้อราก็สามารถทำได้เช่นกัน ดังเช่นงานวิจัยของ Yaithongkum และคณะ (2011) ได้นำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมาใช้ในการยับยั้งเชื้อรา *P. Expansum* ที่มีความเข้มข้นเชื้อตั้งต้น 1×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร โดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน ดิบบุกออกไซด์ และซิลิกอน ($\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2$) โดยสูตรที่ดีที่สุดจากงานวิจัยนี้ $1\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2$ สามารถฆ่าเชื้อ *P. Expansum* ได้ 95 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การรับแสงยูวี

1.3.1 กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

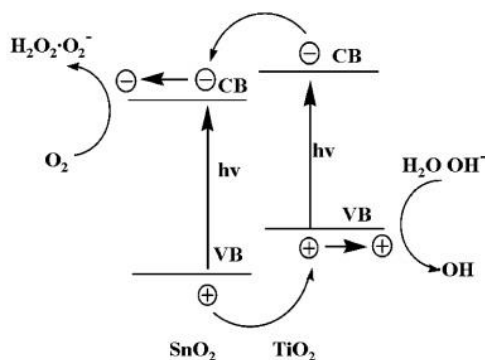
1.3.1.1 การเจือด้วยโลหะหรืออโลหะ

การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งทำได้โดยการเจือโลหะและอโลหะ เช่น SnO_2 , ZnO_2 , Fe, Ag, Au, Pt, Si, C, B, S, และ N เป็นต้น สำหรับกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของการเจือโลหะและอโลหะสามารถอธิบายได้หลายรูปแบบ โดยแตกต่างกันไปตามชนิดของสารเจือ

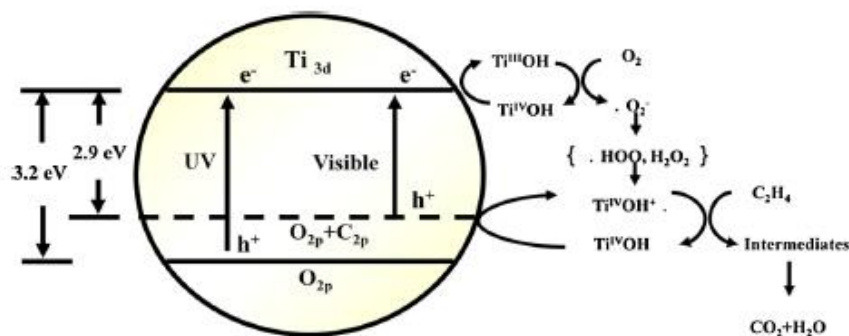
Hou และคณะ (2007) ได้อธิบายกลไกการเจือด้วยโลหะออกไซด์คือดีบุกออกไซด์ (SnO_2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก โดยได้อธิบายไว้ว่าแถบช่องว่างพลังงานของ SnO_2 และ TiO_2 (อะนาเทส) เท่ากับ 3.80 และ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งแถบช่องว่างพลังงานของ SnO_2 จะกว้างกว่า TiO_2 ดังนั้นตำแหน่งแถบการนำของ SnO_2 มีค่าต่ำกว่า TiO_2 แสดงดังรูปที่ 1.16 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสง อิเล็กตรอนจะหลุดจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำของ TiO_2 ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำของ SnO_2 ที่มีพลังงานน้อยกว่า และจะกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่ผิว ทำให้เกิดการหน่วงการกลับมารวมตัวของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกของ TiO_2 มีผลให้หลุมประจุบวกที่เกิดบนผิวของ TiO_2 สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และจากงานวิจัยของ Lin และคณะ (2008) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนไดรอกไซด์ (TiO_2/WO_3) และผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยดีบุกออกไซด์ ($\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$) เพื่อย่อยสลายเตตระ-คลอโรฟีนอล (4-Chlorophenol, 4-CP) ภายใต้อิทธิพลของสารเจือมีผลต่อแถบช่องว่างพลังงาน โดย TiO_2/WO_3 สามารถลดแถบช่องว่างพลังงานของ TiO_2 ลงเหลือ 2.61 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจาก WO_3 บริสุทธิ์มีแถบช่องว่างพลังงานที่ต่ำกว่า TiO_2 คือ 2.76 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อนำมาเจือ WO_3 จึงสามารถช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานของ TiO_2 ลงมาได้ ส่วน $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ไม่สามารถลดแถบช่องว่างพลังงานลงได้เนื่องจาก SnO_2 ที่สังเคราะห์มาเป็นสารเจือนั้นมีแถบช่องว่างพลังงานที่สูงกว่า TiO_2 คือ 3.70 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้ไม่สามารถช่วยลดขนาดช่องว่างพลังงานลงได้ จากงานวิจัยนี้พบว่านอกการเจือส่งผลต่อแถบช่องว่างพลังงานแล้วยังส่งผลต่อขนาดอนุภาคด้วยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของผง TiO_2/WO_3 มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 300 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดอนุภาคของ TiO_2/SO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร และ TiO_2/WO_3 สามารถย่อยสลาย 4-CP ที่ความยาวคลื่น 435 นาโนเมตร ภายในเวลา 180 นาทีได้สูงสุดคือ 65 เปอร์เซ็นต์ และที่ความยาวคลื่น 396 นาโนเมตร ประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเจือ WO_3 ทำให้ OH radical ในระบบเพิ่มมากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้การเจือด้วยโลหะก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติโฟโตแคตะไลติกได้เช่นกันดังเช่นงานวิจัยของ Yung และคณะ (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารเจือคาร์บอนในการลดแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ลงเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงภายใต้แสงขาว จากการเจือคาร์บอนทำให้แถบช่องว่างพลังงานลดลงจาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็น 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้มีประสิทธิภาพโดดเด่นในการย่อยสลายสารฟีนอลภายใต้แสงขาวที่ดี และจากงานวิจัยของ Lin และคณะ (2013) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารเจือคาร์บอนต่อสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเอทิลีนภายใต้แสงขาว พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เจือคาร์บอนมีแถบช่องว่างพลังงานแคบลง โดยคาร์บอนที่เจือลงไปในระบบจะไปแทนที่ออกซิเจน และฟอร์มตัวเป็น Ti-O-C การแทนที่ของออกซิเจนด้วยคาร์บอนทำให้แถบช่องว่างพลังงานลดลง นั้นหมายถึงทำให้ระยะในการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนลดลง ทำให้มีประสิทธิภาพของสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาว ดังรูปที่ 1.17 และจากงานวิจัยของ Darzi และคณะ (2012) ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล เผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสนาน 5 ชั่วโมง พบว่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนแคบลงเหลือ 2.8 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงให้เห็นว่าการเจือไนโตรเจนช่วยให้แถบช่องว่างพลังงานแคบลง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสงขาวซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าแสงยูวี จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ดังเช่นงานวิจัยของ Surmacki และคณะ (2013) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสมบัติโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้สารเจือไนโตรเจนจากยูเรีย ทดสอบปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารฟีนอลภายใต้แสงขาว เนื่องจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจนที่สังเคราะห์ได้มีการดูดกลืนแสงไปทางแสงขาว มีค่าแถบช่องว่างพลังงานลดลง สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีภายใต้แสงขาว พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวสามารถย่อยสลายสารฟีนอลความเข้มข้น 5×10^{-4} โมลาร์ได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมสารเจือ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาชนิดของสารเจือไนโตรเจนจากสารตั้งต้นชนิดอื่นๆ เช่นงานวิจัยของ Ohno และคณะ (2004) ได้ศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนจากสารตั้งต้นไทโอยูเรีย ในการย่อยสลายสีของ MB และไดโพรพานอล (2-propanol) ภายใต้แสงขาว พบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไทโอยูเรียมีแถบการดูดกลืนแสงเคลื่อนไปทางแสงขาว และจากการวิเคราะห์ Density of state (DOS) พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวสามารถลดความกว้างของชั้นระหว่างชั้นเวเลนซ์แบนด์ (VB) และคอนดักชันแบนด์ (CB) ได้ ดังรูปที่ 1.18 และสามารถย่อยสลาย MB และ 2-propanol ได้ดีภายใต้แสงขาวได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือ

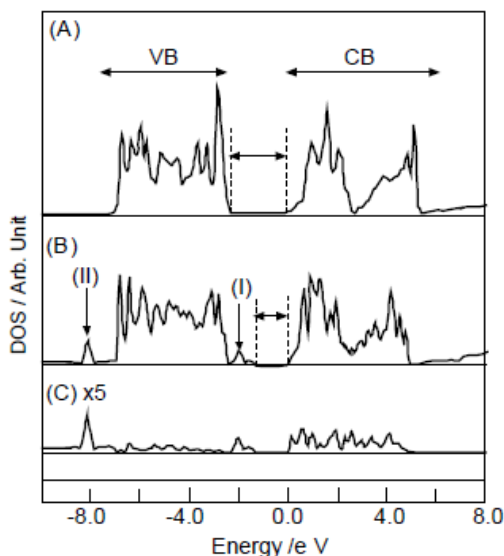
การเติมสารเจือสองชนิด หรือการเจือร่วม (Co-Doped) หรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกให้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีภายใต้แสงขาว หรือแสงฟลูออเรสเซนต์ หรือแสงอาทิตย์ ดังเช่นงานวิจัยของ Rengifo-Herrera และ Pulgarin (2009) ได้ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือร่วมด้วยไนโตรเจนและซัลเฟอร์ที่เตรียมโดยใช้ไทโอยูเรียเป็นสารตั้งต้นให้ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ (N,S co-doped TiO_2) และผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนเตรียมโดยใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้นให้ไนโตรเจน (N- TiO_2) ในการย่อยสลายสารฟีนอล และการฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้แสงขาว พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสองสูตร สามารถลดแถบช่องว่างพลังงานลงได้จาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เหลือ 2.85 และ 2.73 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โดยได้อธิบายว่า N, S co-doped TiO_2 มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแคบที่สุดเนื่องจากเป็นอิทธิพลจากการแทรกของ N ในแลตทิซของ TiO_2 และฟอร์มตัวเป็น N-O-Ti และอิทธิพลของ S ที่อยู่ในรูปของ S^{6+} ทำให้มีแถบช่องว่างพลังงานลดลงและมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารฟีนอล และฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ภายใต้ขาว นอกจากนี้ Rengifo-Herrera และ Pulgarin (2010) ยังได้ทำการศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ N, S co-doped และ N-doped เปรียบเทียบกับ P25 ในการย่อยสลายสารฟีนอล และฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้สภาวะเสมือนแสงอาทิตย์ พบว่า N, S co-doped TiO_2 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย และฆ่าเชื้อ *E.coli* สูงกว่า N-doped TiO_2 และ P25



รูปที่ 1.16 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุใน $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ composite
(ที่มา: Hou และคณะ 2007)



รูปที่ 1.17 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ C-TiO₂ (ที่มา: Lin และคณะ 2013)



รูปที่ 1.18 Total DOS ของ (A) undoped TiO₂, (B) S-doped TiO₂, (C) partial DOS of S atoms in S-doped TiO₂ (ที่มา: Ohno และคณะ, 2004)

1.3.1.2 การเกิดเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและเฟสรูไทล์

การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง คือ การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเฟสผสม ระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง อะนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 75:25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลิตโดยวิธีไฮโดรไลซิส และวิธีการเพิ่มความหนาแน่นด้วยกระบวนการสร้างความหนาแน่น (Densification) ภายใต้อุณหภูมิ 1,500-4,000 กิโลปาสกาล (Zhao และคณะ 2007) นอกจากเฟสอะนาเทสให้ผลปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีแล้ว การเกิดเฟสผสม

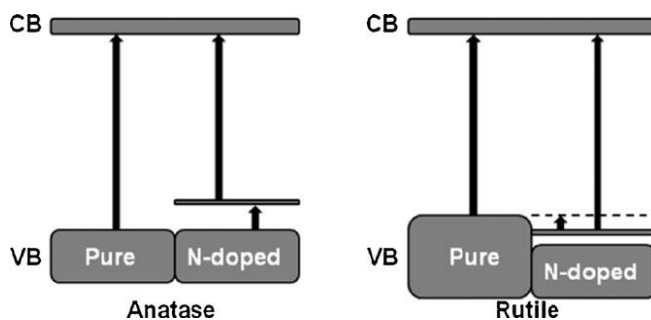
ยังให้ผลดีเช่นกัน โดยเมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยแสงทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์ถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทสที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังแถบการนำของรูไทล์ ทำให้เกิดการหน่วงการกลับมารวมตัวของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก ในที่สุดอิเล็กตรอนปรากฏผู้ผิวทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้

ซึ่งการทำให้เกิดเฟสผสมนั้นสามารถทำได้โดยอาศัยอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ และการเติมสารเจือเป็นตัวช่วยให้เกิดเฟสผสมได้ดังเช่นงานวิจัยของ Ubonchonlakit และคณะ (2008) ได้เตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน เคลือบบนแผ่นกระเบื้องเคลือบ โดยกระบวนการโซล-เจล พบว่าปริมาณของเงินที่เจือส่งผลต่อขนาดผลึก ปริมาณเฟส และปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าจะเกิดเฟสอะนาเทสเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และจะเริ่มเกิดเฟสรูไทล์เมื่อมีอุณหภูมิเผาสูงขึ้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และปริมาณเฟสอะนาเทสจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเงินที่เจือเพิ่มมากขึ้น และจากงานวิจัยของ Kim และ Ehrman (2009) ได้ศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสผสมอะนาเทสและรูไทล์ที่อัตราส่วนเฟสเท่ากับ 4:1 มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลูภายใต้แสงยูวี และจากงานวิจัยของ Gua และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทส เฟสรูไทล์ และเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ พบว่าจากการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายฟีนอล และสีย้อม RhB ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสผสมอะนาเทสและรูไทล์ที่อัตราส่วนเฟสรูไทล์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟีนอลและสีย้อม RhB ได้สูงสุดที่เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเดียว และที่อัตราส่วนอื่นๆ

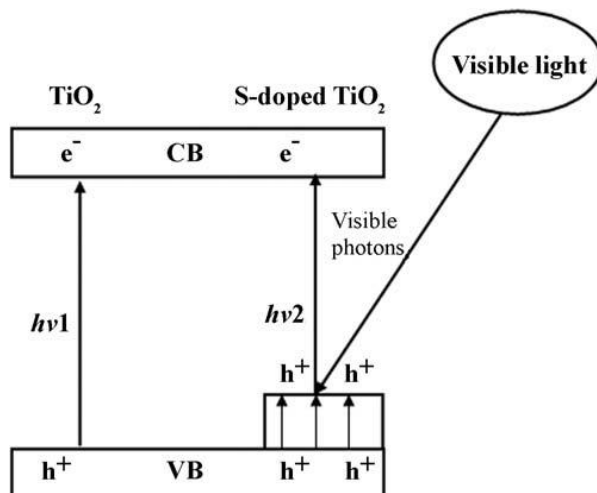
1.3.1.3 การลดช่องว่างของแถบพลังงาน

การใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องการแสงยูวีในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่น่าสนใจคือแสงในช่วงแสงขาว เพราะสามารถใช้ในร่มหรือแสงอาทิตย์ในที่แจ้ง จึงเริ่มมีการศึกษาเรื่องนี้ในปี 2001 โดยนักเคมีชื่อ Asahi เขาได้ทำการศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจน พบว่าการเจือไนโตรเจนสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่มีประสิทธิภาพสูงภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี และแสงขาว ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 390-500 นาโนเมตร การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเจือไนโตรเจนได้อธิบายโดย Nakoto (2004) และ Trie (2003) เขาได้อธิบายไว้ว่าการเติมไนโตรเจน ทำให้แถบช่องว่างพลังงานแคบลงเนื่องจากในชั้นออบิทัลของ N_{2p} มีช่องว่างที่น้อยกว่าออบิทัลของ O_{2p} ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดจาก O_{2p} ไปยัง N_{2p}

และกระโดดต่อไปยัง $Ti3d$ ได้จึงทำให้สามารถลดพลังงานในการกระตุ้นลงได้ และ Nolan และคณะ (2011) ก็ได้อธิบายถึงอิทธิพลของสารเจือไนโตรเจนต่อการลดลงของแถบช่องว่างพลังงานไว้ว่าการเจือไนโตรเจนสามารถลดแถบช่องว่างพลังงานลงได้ เนื่องจากไนโตรเจนจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในแลคทิซของ $O-Ti-O$ และฟอร์มเป็น $N-Ti-O$ ซึ่งจากการเข้าไปแทนที่ออกซิเจนทำให้มีชั้นออร์บิทัลของ $N2p$ ซึ่งจะแคบกว่าการที่อิเล็กตรอนจะกระโดดจากชั้น $O2p$ ไปยัง $Ti3d$ เลย จึงสามารถลดพลังงานในการกระตุ้นลงได้ ดังรูปที่ 1.19 และนอกจากการกระตุ้นด้วยแสงยูวีและแสงขาวแล้วนั้นยังมีการกระตุ้นด้วยแสง LED อีกด้วยดังงานวิจัยของ Liu และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการลดลงของแถบช่องว่างพลังงาน และปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่มีพลังงานต่ำอย่างหลอด LED พบว่าการเจือซัลเฟอร์สามารถลดแถบช่องว่างพลังงานลงได้ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีในการย่อยสลายสีย้อม MO ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 5 ชั่วโมงภายใต้การรับแสงจากหลอด LED 12 วัตต์ โดยเขาได้อธิบายว่าการที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีนั้นเป็นอิทธิพลมาจากการแทนที่ของ S ใน $O-Ti-O$ และฟอร์มตัวเป็น $O-Ti-S$ และนอกจากนี้ยังมี $O-S-O$ ในชั้นออร์บิทัล $S2p$ ทำให้ช่องว่างพลังงานแคบลงและมีขอบการดูดกลืนแดงเลื่อนไปยังแสงสีแดงมากขึ้น นอกจากนี้ S ยังไปช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนอีกด้วย จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงภายใต้พลังงานกระตุ้นที่ต่ำ ดังรูปที่ 1.20 ที่แสดงถึงแถบช่องว่างพลังงานที่ลดลง



รูปที่ 1.19 การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาทาส และรูไทล์ที่เจือด้วยไนโตรเจน (ที่มา: Nolan และคณะ 2011)



รูปที่ 1.20 การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซัลเฟอร์ภายใต้แสงขาว
(ที่มา: Liu และคณะ 2009)

1.3.1.4 การลดขนาดอนุภาค

การลดขนาดอนุภาคเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสมบัติโฟโตแคตะไลติก ดังงานวิจัยของ Li และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารเจือคาร์บอนในการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณขนาดผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอนมีขนาดผลึกลดลงเมื่อเทียบกับผง P25 โดยผงที่สังเคราะห์ได้มีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 5.5-6.2 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HRTEM (High Resolution TEM) เท่ากับ 0.35 นาโนเมตร ซึ่งจากการลดลงของขนาดอนุภาคส่งผลให้มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกเพิ่มขึ้นโดยสามารถย่อยสลายสีย้อม MO ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 4 นาทีภายใต้แสงยูวีซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าผง P25 ที่สามารถย่อยสลายได้เพียง 8 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากการเติมสารเจือแล้วนั้น การเติมสารลดแรงตึงผิวก็เป็นอีกหนึ่งวิธีในการลดขนาดอนุภาค ดังเช่นงานวิจัยของ Lee และคณะ (2012) ได้ทำการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยใช้ซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Cetyltrimethylammonium chloride) เป็นสารลดแรงตึงผิวเติมลงไปในระบบ พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีขนาดอนุภาคเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับผง P25 โดยมีขนาดอนุภาคจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM ประมาณ 5 นาโนเมตร และสามารถย่อยสลายสีย้อมผ้าแอซโซ (Azo dye) ได้ 98 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงยูวีและแสงขาวในเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.1.5 การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการเพิ่มความพรุน

การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการเพิ่มความพรุนเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการเพิ่มความพรุนสามารถทำได้โดยการเติมสารเจือ เช่น งานวิจัยของ Yu และคณะ (2006) ได้ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยซิลิกอน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยกระบวนการโซล-เจล และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 4 ชั่วโมง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Surface Area and Porosity Analyzer, BET ในการหาพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยซิลิกอน ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) พบว่ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 957 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาณรูพรุน (Pore volume) เท่ากับ 0.48 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวที่สูงเกือบเทียบเท่าผงซิลิกอนบริสุทธิ์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 999 ตารางเมตรต่อกรัม และนอกจากนี้พบว่าคาร์บอนสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและสามารถทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกที่ดีอีกด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Lin และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารเจือคาร์บอนต่อฟอล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล และกระบวนการทางความร้อน จากการทดสอบด้วยเทคนิค BET เพื่อศึกษาปริมาณพื้นที่ผิวพบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมากกว่าฟิล์มไทเทเนียมที่ไม่มีสารเจือ และการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวทำให้มีสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ดีเช่นกัน จากการทดสอบ 5 รอบภายใต้แสงยูวี พบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถย่อยสลายได้มากกว่า 87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เจือด้วยคาร์บอน และฟิล์มที่เตรียมจาก P25 นอกจากนี้การเพิ่มความพรุนหรือผิวพรุนก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสมบัติโฟโตแคตะไลติกได้เช่นกัน เช่นงานวิจัยของ Grandcolas และคณะ (2014) ได้นำเทคนิคการสร้างชั้นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นนาโนโดมมาช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนโดมด้วยเทคนิค Magnetron sputtering บนแผ่นซิลิกอนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนโดมมีลักษณะพื้นที่ผิวที่ขรุขระ และสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 64 เปอร์เซ็นต์ จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและลักษณะผิวที่ขรุขระนี้ทำให้มีปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่สูงขึ้นด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เรียบ และได้กล่าวไว้ว่าการเพิ่มความพรุน การเพิ่มพื้นที่ผิว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสมบัติโฟโตแคตะไลติกได้

1.3.2 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีต่างๆ สารฟีนอล และสารประกอบฟีนอล และการประยุกต์ใช้กับ Reactor ต่างๆ

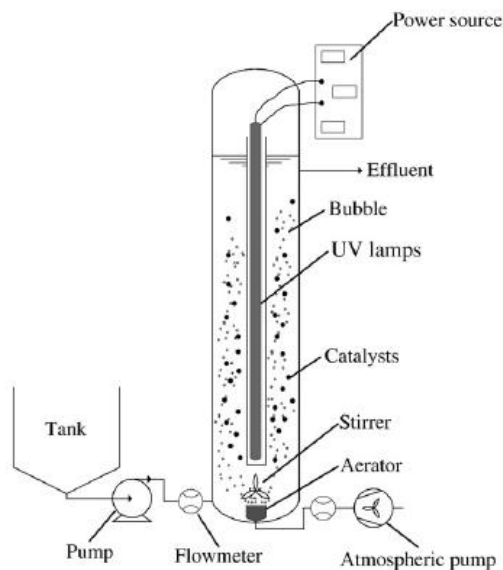
ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ การประยุกต์นำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการบำบัดน้ำก็เป็นอีกหนึ่งเรื่องที่น่าสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารเคมีต่างๆ สารฟีนอล และสารประกอบฟีนอลต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่นการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาบำบัดน้ำเสียจากโครงการอุตสาหกรรมสิ่งทอของ Neelavannan และคณะ (2007) ได้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์มากำจัดสีย้อมอินทรีย์ที่ปนเปื้อนน้ำในปริมาณสูงโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกร่วมกับไฟฟ้าเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายให้สูงขึ้น สามารถย่อยสีย้อมอินทรีย์ และสารเคมีที่มีอันตราย (Chemical oxygen demand, COD) ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ 96 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 7 ชั่วโมง โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และ Zainal และคณะ (2007) ได้นำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการกำจัดสีย้อม และสิ่งปนเปื้อนจากโรงงานสิ่งทอเส้นใยฝ้าย โดยอาศัยการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกร่วมกับไฟฟ้าเคมี พบว่าสามารถย่อยสลาย COD ได้ 73.1 เปอร์เซ็นต์ และสามารถย่อยสลาย Biochemical oxygen demand (BOD) ได้ 21.48 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 150 นาทีภายใต้แสงยูวี นอกจากการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอแล้วยังมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้กับงานออฟชอร์ (Offshore) จากน้ำทะเลอีกด้วยโดย Brosillon และคณะ (2014) ได้ใช้สมบัติโฟโตแคตะไลติกในการกำจัดสารปนเปื้อน Tributyltin (TBT) Dibutyltin (DBT) และ Monobutyltin (MBT) ที่ปนเปื้อนในน้ำทะเล และตะกอนจากทะเล โดยทำการทดสอบภายใต้แสงยูวีนาน 12 ชั่วโมง พบว่าสามารถย่อยสลาย TBT, DBT และ MBT ได้ 99.8 เปอร์เซ็นต์ 32 เปอร์เซ็นต์ และ 37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายสารฟีนอล และสารประกอบฟีนอลต่างๆ ในน้ำได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลายเช่นกัน เนื่องจากสารฟีนอลและสารประกอบฟีนอลเป็นสารที่มีความอันตรายสูง และสามารถพบได้ในภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำพลาสติก ขวดนมพลาสติก หรือในน้ำยาป้ายวนปาก ยาฆ่าเชื้อต่างๆ เป็นต้น ด้วยอันตรายจากสารฟีนอลที่สามารถทำให้เกิดมะเร็ง และเป็นอันตรายต่ออวัยวะภายในและระบบทางเดินหายใจ ตัวอย่างการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการกำจัดหรือย่อยสลายสารฟีนอล และสารประกอบฟีนอล เช่นงานวิจัยของ Cruz และคณะ (2011) ได้นำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมาย่อยสลายสารฟีนอล และสารประกอบฟีนอลในอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมซึ่งได้แก่สาร 2,4-Dimethylphenol (2,4-DMP), 2,4-Dichlorophenol (2,4-DCP) และ 2-Chloro-phenol (2-CP) ทำการ

ทดสอบโดยนำสารฟีนอลที่ได้จากน้ำทิ้งที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 2, 3, 8 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำการทดสอบกับสารแขวนลอย P25 ที่เฟสผสมอะนาเทส 80 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวแคตะลิส โดยนำผง P25 มา 300 มิลลิกรัมกระจายตัวลงไปน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของฟีนอลต่างๆที่มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร ในขวดลูกชมพู และแปรค่า pH ที่ใช้ในการในระบบที่ 3 และ 5 ทดสอบภายใต้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร บรรจุในกล่องทึบ และให้มีการปั่นกวนของสารตลอดการทดสอบ ผลจากการทดสอบพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ เช่น 2, 3 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการย่อยสลายเร็วมาก จึงศึกษาที่ความเข้มข้นสูงคือ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่แปรค่า pH เท่ากับ 3 สามารถย่อยสลายฟีนอล 2-CP, 2,4-DMP และ 2,4-DCP ได้ 99, 61, 83 และ 46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่แปรค่า pH เท่ากับ 5 สามารถย่อยสลายได้ 99, 92, 83 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากการปนเปื้อนของสารฟีนอล และสารประกอบฟีนอลต่างๆในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแล้วนั้นยังมีการปนเปื้อนของสารฟีนอลในน้ำประปาอีกด้วย Suryaman และคณะ (2009) ได้นำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมาใช้ในการย่อยสลายสารฟีนอลในน้ำประปาที่มีการไหลแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหล 600 มิลลิลิตรต่อนาที โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรผสมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 10 กรัม ให้มีการไหลอย่างต่อเนื่องผ่านแสงยูวี และแสงอาทิตย์แบบจำลองที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-390 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสง 1.7 และ 2.9-3.3 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าสามารถย่อยสลายละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 72 ชั่วโมง และเมื่อมีการลดอัตราการไหลให้ช้าลงเหลือ 15 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถลดเวลาในการย่อยสลายได้ โดยสามารถย่อยสลายได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 6 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลายสารบิสฟีนอลเอ (BPA) ในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสงอาทิตย์โดย Kaneco และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารแคตะลิส ค่า pH อุณหภูมิ เวลาในการฉายแสง และความเข้มแสง ต่อการย่อยสลายสาร BPA ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณผงไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 500 มิลลิกรัม ที่ pH เท่ากับ 6 ภายใต้การรับแสงอาทิตย์นาน 60 นาที และความเข้มแสงเท่ากับ 1.3 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย BPA ดีที่สุด

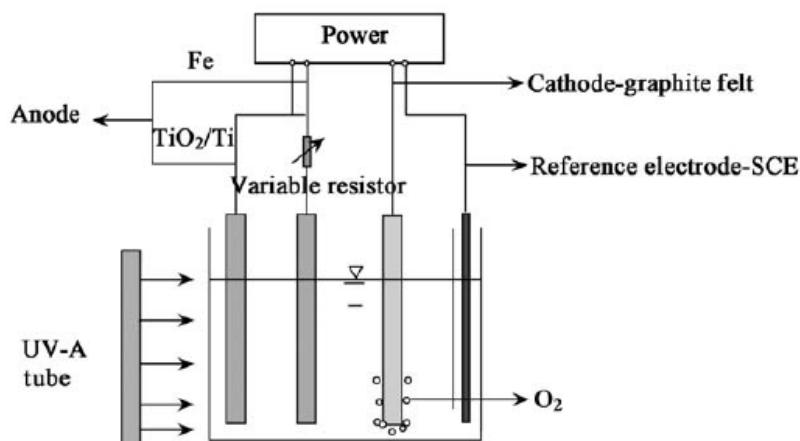
การออกแบบชุดปฏิกรณ์หรือชุดทดสอบแบบต่างๆให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญเช่นกันในการทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ตัวอย่างชุดทดสอบในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารฟีนอล และสารประกอบฟีนอล เช่นงานวิจัยของ Gu และคณะ (2010) ได้ออกแบบชุดทดสอบโฟโตแคตะไลติกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยแอคติเวตเต็ดคาร์บอน (Activated Carbon) ดังแสดงในรูปที่ 1.21 ใน

การย่อยสลายสาร 2,4-DCP ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 22 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารแคทตะลิส 5 กรัมต่อลิตรในการย่อยสลาย พบว่าสามารถย่อยสลายสาร 2,4-DCP ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 90 นาที และเมื่อเพิ่มปริมาณแคทตะลิสเป็น 9 กรัมต่อลิตร สามารถย่อยสลายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 90 นาที และเมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบกับ การบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การกรองทางชีวภาพ (Bio-filtration) การตกตะกอน (Sedimentation) และ การกรอง (Filtration) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารประกอบฟีนอล (2,4-DCP) ด้วยชุดทดสอบโฟโตแคตะไลติกของ Gu โดยให้ประสิทธิภาพดีเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ และจากการทดสอบการย่อยสลาย 2,4-DCP ด้วยชุดทดสอบของ Xiu และคณะ (2007) แสดงดังรูปที่ 1.22 โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็กและแกรไฟท์ ($\text{TiO}_2/\text{Ti-Fe-Graphite}$) ที่เตรียมด้วยวิธีโฟโตอิเล็กโตรแคตะไลติก (Photoelectrocatalytic, PEC) ซึ่งสามารถย่อยสลายสาร 2,4-DCP ได้ 93 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 60 นาทีด้วยชุดทดสอบของเขา นอกจากนี้สาร 2,4-DCP แล้วยังมีสาร BPA ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยชุดทดสอบโฟโตแคตะไลติก เช่นงานวิจัยของ Subaglo และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสาร BPA ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีพิษรุนแรงที่ปนเปื้อนในน้ำ โดย BPA จะปนเปื้อนผ่านทางภาชนะบรรจุที่ทำมาจาก โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate plastic) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) ซึ่งมักจะพบโดยทั่วไปในขวดน้ำเด็ก ขวดบรรจุน้ำดื่ม งานทางทันตกรรม เลนส์แว่นตา เครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น โดยได้ทำการศึกษาโดยใช้ไนโตรเจนเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การกระตุ้นโดยแสงสีน้ำเงิน เขียว และเหลืองจากหลอด LED เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับไทเทเนียมที่ไม่ได้เจือ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าไทเทเนียมที่เจือด้วยไนโตรเจนสามารถย่อยสลายสาร BPA ได้ดีที่สุดที่เวลา 2 ชั่วโมง สามารถย่อยสลาย BPA ได้ 66 เปอร์เซ็นต์ และจากงานวิจัยของ Wang และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือร่วมด้วยคาร์บอนและไนโตรเจน (C-N co-doped TiO_2) ในการย่อยสลายสาร BPA โดยใช้แสงจากหลอด LED ที่มีแสงสีต่างๆ เช่น ขาว น้ำเงิน เขียว และเหลือง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถย่อยสลาย BPA พบว่าสีขาวยุติและสีน้ำเงินสามารถย่อยสลายได้ 99 เปอร์เซ็นต์ สีเขียวสามารถย่อยสลายได้ 84 เปอร์เซ็นต์ และสีเหลืองสามารถย่อยสลายได้ 24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาในข้างต้นนี้เป็นการพิสูจน์และยืนยันให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพเพียงพอในการนำมาย่อยสลายสารเคมี



รูปที่ 1.21 ชุดทดสอบของ Gu และคณะ (2010)

(ที่มา: Gu และคณะ 2010)

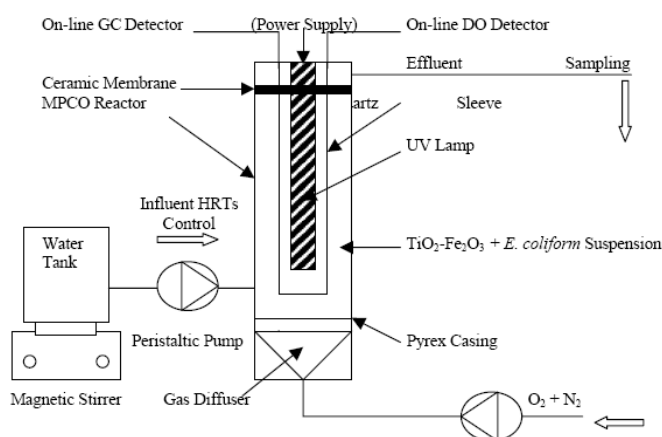


รูปที่ 1.22 ชุดทดสอบของ Xiu และคณะ (2005)

(ที่มา: Xiu และคณะ 2005)

นอกจากการย่อยสลายสารเคมีแล้วนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียต่างๆ ได้ดีอีกด้วยเช่นกัน มีการศึกษาและออกแบบชุดทดสอบโฟโตแคตะไลติก สำหรับใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำอย่างกว้างขวาง ซึ่งใช้ประสิทธิภาพที่ดีในการฆ่าเชื้อ ดังเช่นงานวิจัยของ San และคณะ (2003) ได้ศึกษาการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำด้วยชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1.23 โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก (Ti/Fe^{3+}) เติมลงไปลงในน้ำโดยตรงและทำการเพิ่มก๊าซออกซิเจน และไนโตรเจนลงไปในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยา จากการทดสอบด้วยชุดทดสอบพบว่าสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา

30 นาที โดยใช้ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ *E. coli* 10^8 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และนอกจากเชื้อ *E. coli* แล้วนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถใช้กับแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วยดังเช่นงานวิจัยของ Erkan และคณะ (2006) ได้ศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส ที่เจือด้วยพัลลาเดียม เคลือบบนแก้วไพเร็กซ์ (Pyrex) ด้วยกระบวนการ โซล-เจล พบว่าสามารถยับยั้งการเกิดเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Saccharomyces cerevisiae* และ *Aspergillus niger spores* ได้โดยสามารถทำให้เชื้อแบคทีเรียลดลงถึง 68 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจและนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ในการย่อยสลายสารพิษของเมทิลินบลู สาร 2,4-DCP สาร BPA และฆ่าเชื้อ *E. coli*



รูปที่ 1.23 ชุดทดสอบของ Sun และคณะ (2003)
(ที่มา: Sun และคณะ 2003)

1.3.3 การประยุกต์ใช้ซิลเวอร์นาโนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนน้ำ

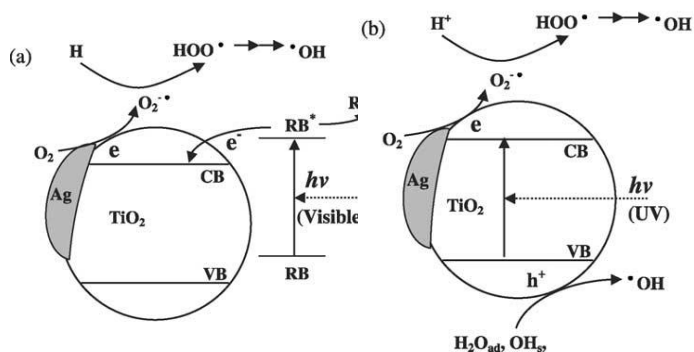
ซิลเวอร์นาโน (Silver nano) เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการฆ่าเชื้อที่ดีโดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยแสงเหมือนไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้ซิลเวอร์นาโนเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลายโดย Sharma และคณะ (2014) ได้กล่าวถึงการนำซิลเวอร์นาโนมาใช้ในการเคลือบ หรือการใช้งานร่วมกับสารอินทรีย์ วัสดุอินทรีย์ต่างๆ เช่นการเคลือบลงบนวัสดุอินทรีย์ สามารถนำมาใช้งานในระบบชีวภาพ และสภาพแวดล้อมในน้ำได้ การเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะทำให้วัสดุมีประสิทธิภาพ ในการกำจัดมลพิษในน้ำ ในระบบชีวภาพ และสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพรุนแรงในการทำลายเชื้อโรค โดยซิลเวอร์นาโนเมื่อสัมผัสกับความชื้นในอากาศสามารถแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) และซิลเวอร์ไอออนจะกระจายอยู่ตามผนังเซลล์ของแบคทีเรียและสามารถแทรกตัวเข้าไปภายในผนังเซลล์

ของแบคทีเรียไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate, ATP) หรือสารที่ให้พลังงานสูงแก่เซลล์ และจำลองแบบดีเอ็นเอ (DNA) ทำให้เซลล์ของแบคทีเรียแตก และตายในที่สุด จากประสิทธิภาพการทำลายแบคทีเรียที่รุนแรงนี้ทำให้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานซิลเวอร์นาโนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียอย่างกว้างขวางเช่น Chen และ Chiang (2008) ได้นำซิลเวอร์นาโนมาประยุกต์ใช้งานกับเส้นใยฝ้ายในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* โดยทำการเคลือบเส้นใยฝ้ายด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-75 นาโนเมตร และนำไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E. coli* ที่มีความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 1×10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร พบว่าเส้นใยที่เคลือบด้วยซิลเวอร์นาโนสามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีการนำซิลเวอร์นาโนมาเคลือบบนวัสดุฐานอื่นๆ เช่น เซรามิกส์ ดังเช่นงานวิจัยของ Lv และคณะ (2009) ได้นำซิลเวอร์นาโนมาเคลือบบนไส้กรองเซรามิกส์เพื่อบำบัดน้ำ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่ปนเปื้อนในน้ำเพื่อพัฒนาไปสู่การบำบัดน้ำดื่มต่อไป ทดสอบโดยใช้ความเข้มข้นเชื้อตั้งต้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.01 ลิตรต่อนาที จากการทดสอบพบว่าไส้กรองเซรามิกส์ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำไปทดสอบเขตปลอดเชื้อ หรือ Clear zone ก็เกิดเขตปลอดเชื้อที่ชัดเจนและมีวงกว้างแสดงให้เห็นว่าซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพที่ดีในการฆ่าเชื้อ *E. coli* และจากงานวิจัยของ Mthombeni และคณะ (2013) ได้นำซิลเวอร์นาโนมาใช้ในการบำบัดน้ำ โดยการนำซิลเวอร์นาโนมาเคลือบบนเม็ดเรซิน โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เคลือบบนเม็ดเรซินมีขนาดเท่ากับ 15-50 นาโนเมตร มาทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ พบว่าให้ประสิทธิภาพที่ดี และเหมาะที่จะพัฒนาไปใช้กับน้ำในสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.3.4 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์นาโน

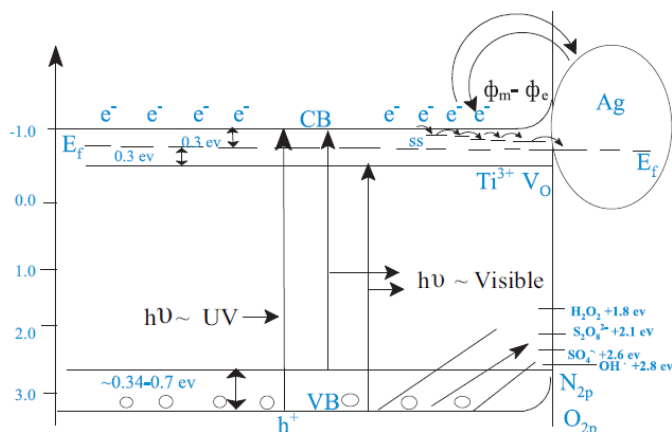
จากประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สารเคมีต่างๆ รวมถึงการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ดีของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจากไทเทเนียมไดออกไซด์ และจากประสิทธิภาพของซิลเวอร์นาโนหรือสารประกอบซิลเวอร์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยา และสามารถเกิดปฏิกิริยาแอนติไมโครเบียล (Antimicrobial) หรือกลไกการกำจัดเชื้อโรคต่างๆ ได้โดยไม่ต้องอาศัยการกระตุ้นด้วยแสง และสามารถเกิดกลไกดังกล่าวได้ในที่มืด ด้วยจุดเด่นดังกล่าวของซิลเวอร์นาโนและไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีการนำจุดเด่นจากทั้งสองวัสดุนี้มาใช้งานร่วมกันเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และซิลเวอร์นาโนยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติโฟโตแคตะไลติกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอีกด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Sung-Suh และคณะ (2003) ได้นำอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาเคลือบลงบนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อศึกษาการทำงานร่วมกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีย้อม RbB ภายใต้แสงยูวีและแสงขาวเปรียบเทียบกับ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีซิลเวอร์นาโนเคลือบอยู่บนผิว โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกาะบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาด 2-4 นาโนเมตร สามารถย่อยสลายสีย้อม RhB ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ได้ดีกว่าไทเทเนียมที่ไม่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนประกอบถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงขาวสามารถย่อยสลายได้สูงสุด 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 4 ชั่วโมง และภายใต้แสงยูวีสามารถย่อยสลายได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 40 นาที โดยได้อธิบายกลไกการย่อยสลายภายใต้แสงยูวีและแสงขาวดังแสดงในรูปที่ 1.24 และได้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบนี้มาใช้ในการย่อยสลายสารฟีนอล ดังเช่นงานวิจัยของ Gomathi Devi และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจน และมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการย่อยสลายฟีนอลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรภายใต้การฉายด้วยแสงอาทิตย์ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสามารถย่อยสลายสารฟีนอลได้สูงสุด 92 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงอาทิตย์ โดยได้ให้เหตุผลว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ดี โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายดังรูปที่ 1.25 และนอกจากยังมีการนำไปใช้ในงานในด้านการบำบัดน้ำด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Liu และคณะ (2011) ได้นำอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาเกาะบนเส้นใยที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อทำเป็นเมมเบรนที่ทำจากเส้นใยระดับนาโน (Nanofiber membrane) โดยมีลักษณะของเมมเบรนดังแสดงในรูปที่ 1.26 สำหรับการบำบัดน้ำด้วยแสงอาทิตย์ จากการทดสอบพบว่าเส้นใยดังกล่าวสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่มีความเข้มข้นเชื้อ 10^7 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และย่อยสลายสีของ MB ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 99.9 เปอร์เซ็นต์ และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้แสงอาทิตย์นาน 30 นาที

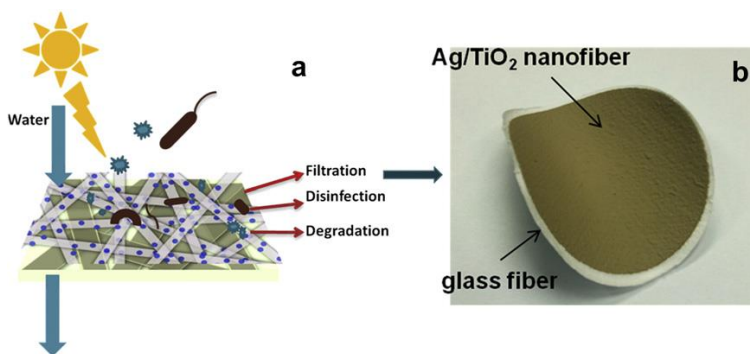


รูปที่ 1.24 กลไกการย่อยสลายภายใต้ RhB ของภายใต้ (a) แสงขาว และ (b) แสงยูวี

(ที่มา: Sung-Suh และคณะ 2003)



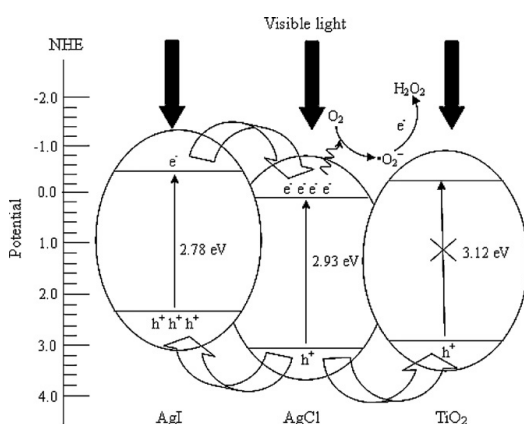
รูปที่ 1.25 กลไกการย่อยสลายฟีนอลของ Gomathi Devi และคณะ (2011)
(ที่มา: Gomathi Devi และคณะ 2011)



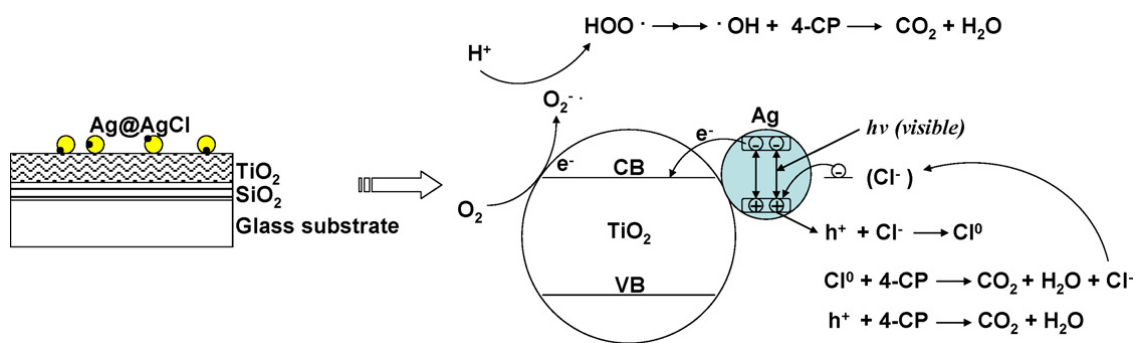
รูปที่ 1.26 กลไกการทำงานของเมมเบรนและลักษณะเมมเบรนของ Liu และคณะ (2011)
(a) แบบจำลองการทำงานของไส้กรองชนิดแผ่น และ (b) ภาพถ่ายไส้กรองชนิดแผ่น
(ที่มา: Liu และคณะ 2011)

นอกจากซิลเวอร์นาโนจะอยู่ในรูปของธาตุแล้วยังสามารถอยู่ในรูปของสารประกอบซิลเวอร์อีกด้วยซึ่งจากหลายงานวิจัยก็สังเคราะห์ได้ทั้งซิลเวอร์และสารประกอบซิลเวอร์ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ได้เช่นกัน เช่นงานวิจัยของ Cao และคณะ (2011) ได้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อม MO ด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์และซิลเวอร์คลอไรด์เป็นองค์ประกอบ ($AgI/AgCl/TiO_2$) ที่เคลือบบนกระจกภายใต้แสงขาว พบว่า $AgI/AgCl/TiO_2$ สามารถย่อยสลายสีย้อม MO ได้ 85.5 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 120 นาทีภายใต้แสงขาว เนื่องจาก $AgI/AgCl/TiO_2$ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปฏิกิริยาได้โดยจะทำให้เกิดการปลดปล่อย $\cdot O_2^-$ และ H_2O_2 สูงในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อของ $AgI/AgCl$ และ $AgCl/TiO_2$ ที่บริเวณอินเตอร์เฟซ จึงทำให้มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาและส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย ดังกลไกในรูปที่ 1.27 และจากงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2011) ได้นำอนุภาคซิลเวอร์และซิลเวอร์คลอ

ไรด์ขนาด 50 นาโนเมตร มายึดเกาะบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนา 100 นาโนเมตร ที่เคลือบอยู่บนกระจกในการย่อยสลาย 4-Chlorophenol (4-CP) ในน้ำภายใต้แสงขาว จากการทดสอบพบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถย่อยสลายสารละลาย 4-CP ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 120 นาที ทั้งนี้เนื่องจากซิลเวอร์นาโนมีความไวต่อแสงสูงเมื่อได้รับแสงกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอน และถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ในชั้น CB ทำให้เกิดเป็น $\text{OH}\cdot$ radical และ Cl^0 ที่เข้าไปย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ โดยได้อธิบายกลไกการย่อยสลายดังรูปที่ 1.28



รูปที่ 1.27 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ AgI/AgCl/TiO₂ ภายใต้แสงขาวของ Cao และคณะ (2011)
(ที่มา: Cao และคณะ 2011)



รูปที่ 1.28 กลไกการย่อยสลาย 4-CP ภายใต้แสงขาวของ Zhou และคณะ (2011)
(ที่มา: Zhou และคณะ 2011)

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ โดยวิธีโซล-เจล เพื่อเคลือบบนเส้นใยแก้ว
2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ โดยวิธีโซล-เจล เพื่อเคลือบบนเส้นใยแก้ว
3. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินคอลลอยด์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์
4. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินคอลลอยด์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์
5. เพื่อศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก และประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ และเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเป็นองค์ประกอบในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู สารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไดคลอโรฟีนอล และการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli*
6. ออกแบบ และสร้างเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่ใช้ในครัวเรือน และทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไดคลอโรฟีนอล และการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ด้วยเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่สร้างขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ด้วยวิธีโซล-เจล การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ และการประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ และการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli*
2. ทำให้ทราบถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ และการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์
3. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และเส้นใยแก้วที่มีอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเป็นองค์ประกอบในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ และการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli*

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ ด้วยวิธีโซล-เจลและเคลือบบนเส้นใยแก้ว ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเตรียมสารเคลือบ ทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลู การย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไคคลอโรฟีนอล และฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำ

2. สังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ด้วยวิธีทางเคมี ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน ทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลู การย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไคคลอโรฟีนอล และฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำ

3. ทดสอบคุณสมบัติด้วยเครื่อง XRD, XPS, SEM, EDX, FT-IR และ UV-Vis DRS

4. ออกแบบ และสร้างเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่ใช้ในครัวเรือน

5. ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไคคลอโรฟีนอล และฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำ ด้วยเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่สร้างขึ้น

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การศึกษาการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ด้วยวิธีการโซล-เจล เพื่อศึกษาหาปริมาณสารเจือ และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่เหมาะสม นำสารเคลือบดังกล่าวมาเคลือบบนเส้นใยแก้วที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วด้วยวิธีจุ่มเคลือบ จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยสารเคลือบไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำเส้นใยแก้วที่ผ่านการอบไปเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ และจากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค XRD, XPS, SEM, EDX, FT-IR และ UV-Vis DRS

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาของเส้นใยแก้วที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยนำเส้นใยแก้วไปทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกเบื้องต้นในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ และทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไคคลอโรฟีนอล ตรวจสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู บิสฟีนอลเอ และไคคลอโรฟีนอล โดยการวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrometer และทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์

ขั้นตอนที่ 3 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์จากขั้นตอนที่ 1 ด้วยวิธีทางเคมี โดยศึกษาความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรต เวลาในการจุ่มแช่เส้นใยแก้ว และอุณหภูมิสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโน จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเส้นใยแก้วที่ผ่านการอบไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ และจากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค XRD, SEM, EDX และ UV-Vis DRS

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาของเส้นใยแก้วที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยนำเส้นใยแก้วไปทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกเบื้องต้นในการย่อยสลายสีของ

เมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ และทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไคคลอโรฟีนอล ตรวจสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู สารบิสฟีนอลเอ และสารไคคลอโรฟีนอล โดยการวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrometer และทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์

ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบ และสร้างเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่ใช้ในครัวเรือน

ขั้นตอนที่ 6 ประยุกต์ใช้เส้นใยแก้วที่สังเคราะห์ด้วยการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น บิสฟีนอลเอ ไคคลอโรฟีนอล และฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำผ่านเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่สร้างขึ้นภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์

2.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

2.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (PT)

เตรียมโดยใช้ Titanium (IV) isopropoxide (Fluka, United Kingdom) ปริมาตร 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอล (C_2H_5OH , 99.9% Merck Germany) ปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที จนครบ 30 นาที จากนั้นหยดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl, 37% Baker Analyed) ลงไปเพื่อปรับ pH เท่ากับ 3.5 และกวนสารละลายอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องต่อไปอีก 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารเคลือบที่สังเคราะห์ได้มาเคลือบบนเส้นใยแก้วชนิด E-glass ที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, 98% Ajax finechem) เข้มข้น 1 โมลาร์ นาน 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่ผ่านการเคลือบไปเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังจากนั้นนำเส้นใยแก้วที่ผ่านการเผาไปล้างในน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดส่วนเกินที่ติดอยู่บริเวณผิวให้หลุดออกไป และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.1

2.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์

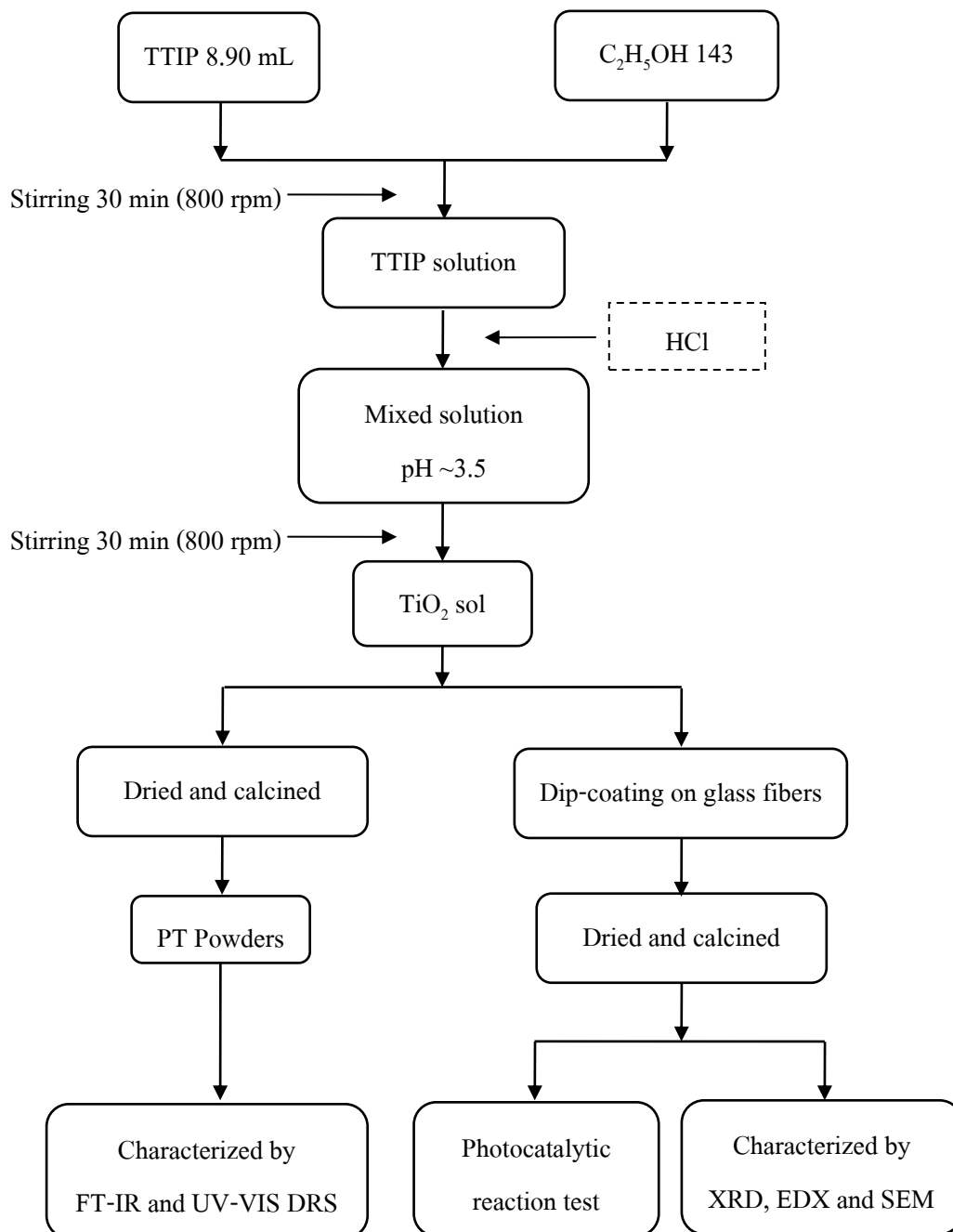
(NST)

เตรียมโดยใช้ไทโอยูเรีย (98% Sigma-Aldrich) เป็นสารตั้งต้นให้ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ แทนด้วยสัญลักษณ์ 0.5NST, 1NST, 1.5NST, 2NST, 5NST และ 10NST โดยการแปรผันปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์จากสารตั้งต้นไทโอยูเรียที่ 0.5, 1, 1.5, 2, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ โมล ตามลำดับ เตรียมโดยนำ Titanium (IV) isopropoxide (99.95% Fluka, United Kingdom) ปริมาตร 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอล (C_2H_5OH , 99.9% Merck Germany) ปริมาตร 143 มิลลิลิตร และเติมสารเจือไทโอยูเรีย ($CS(NH_2)_2$, 98% Ajax Finechem) ที่ปริมาณต่างๆ กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที จนครบ 30 นาที จากนั้นหยดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl, 37% Baker Analyed) ลงไปเพื่อปรับ pH เท่ากับ 3.5 และกวนสารละลายอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารเคลือบที่สังเคราะห์ได้มาเคลือบบนเส้นใยแก้วชนิด E-glass ผ่านการทำความสะดวกผิวหน้าด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, 98% Ajax Finechem) เข้มข้น 1 โมลาร์ นาน 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่ผ่านการเคลือบไปเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ หลังจากนั้นนำเส้นใยแก้วไปล้างในน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดส่วนเกินที่ติดอยู่บริเวณผิวให้หลุดออกไป และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.2

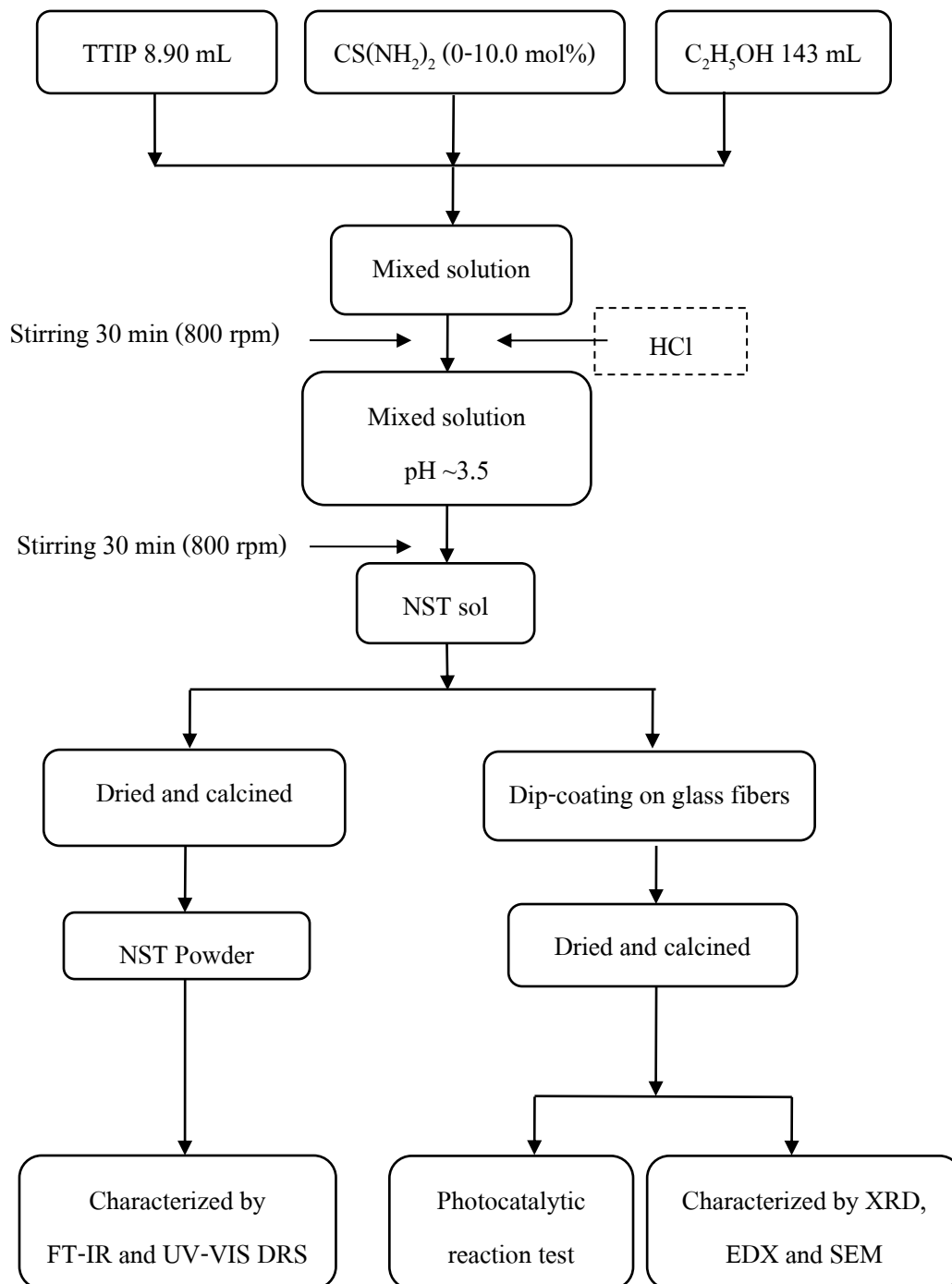
2.3 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (A5NST)

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ แทนด้วยสัญลักษณ์ 0.01A5NST, 0.03A5NST, 0.05A5NST, 0.1A5NST และ 0.3A5NST เตรียมด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$, 99.99% POCH) ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 และ 0.3 โมลาร์ จากนั้นเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH , 27% J.T.Baker) ลงไปจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและจากสีน้ำตาลเป็นสารละลายใสไม่มีสี จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมได

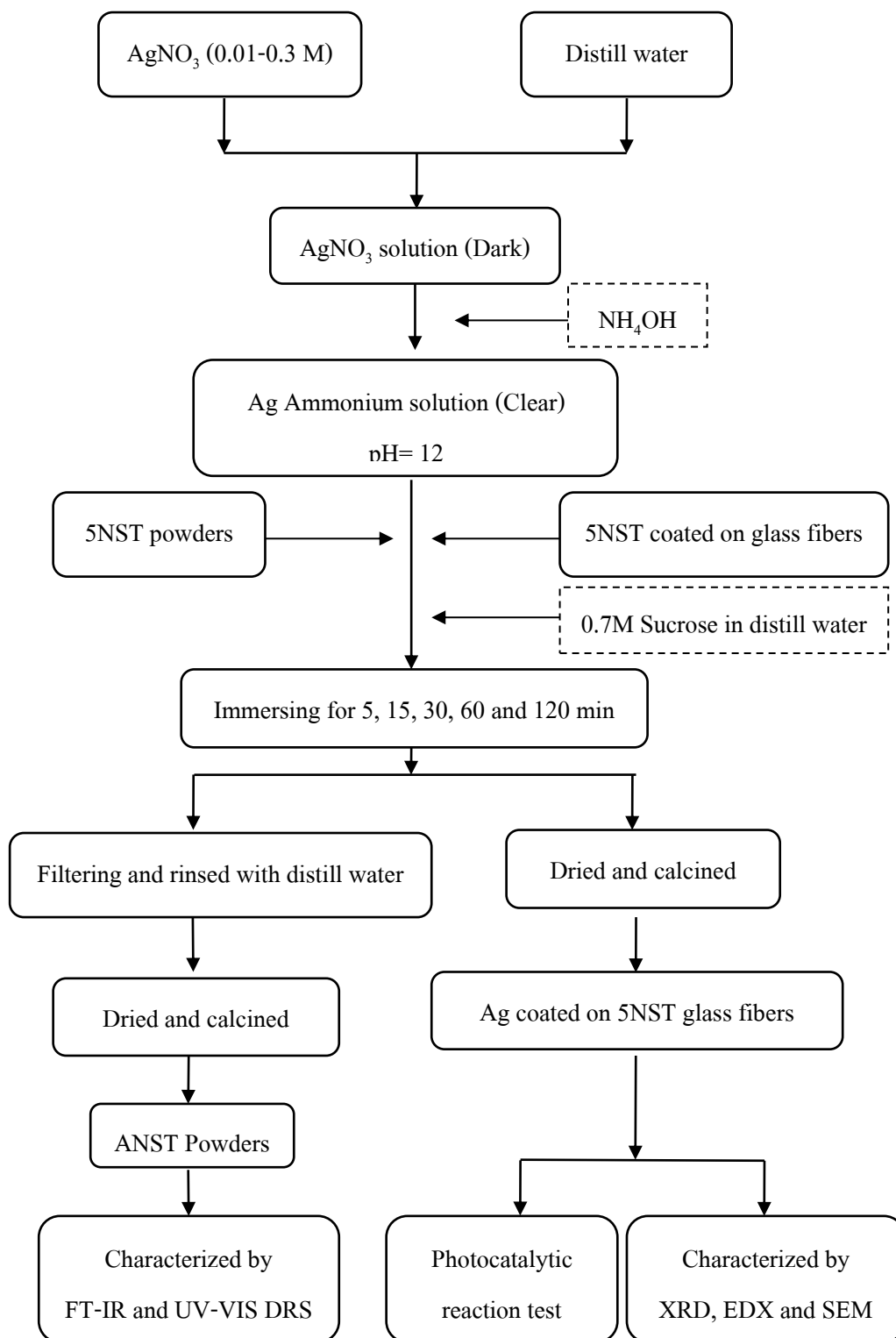
ออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง แชล่งในสารละลายซิลเวอร์แอมโมเนียมดังกล่าว และนำสารละลายน้ำตาลซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$, 98% Ajax Finechem) ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ มาเติมลงไปเพื่อเป็นสารรีดิวเซอร์ โดยศึกษาระยะเวลาในการจุ่มแช่เส้นใยแก้วที่เวลาต่างๆกัน คือ 5, 15, 30, 60 และ 120 นาที จากนั้นรอให้แห้งที่อุณหภูมิห้องและนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ และนำไปล้างน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อกำจัดส่วนเกินบริเวณผิวให้หลุดออกไป แล้วนำไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเป็นองค์ประกอบ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 การเตรียมผงและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี โชล-เจล



รูปที่ 2.2 การเตรียมผงและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ด้วยวิธีโซล-เจล



รูปที่ 2.3 การเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ด้วยวิธีทางเคมี

2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และการตรึงอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

2.4.1 การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ทำโดยใช้วิธีการจุ่มเคลือบ โดยนำเส้นใยแก้วชนิด E-glass ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20-30 ไมโครเมตรเป็นวัสดุฐาน ก่อนทำการเคลือบเส้นใยแก้วจะต้องทำความสะอาดผิวเพื่อกำจัดคราบไขมันที่ผิวของเส้นใยแก้วออกเสียก่อน โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ก็จะได้เส้นใยแก้วที่พร้อมนำมาเป็นวัสดุฐานที่ใช้ในการเคลือบ นำเส้นใยแก้วที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาเคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ คือ PT, 0.5NST, 1NST, 1.5NST, 2NST, 5NST และ 10NST ตามลำดับ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ หลังจากนั้นนำเส้นใยแก้วที่ผ่านการเผาไปล้างในน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดส่วนเกินที่ติดอยู่บริเวณผิวให้หลุดออกไป แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆที่พร้อมจะนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

2.4.2 การตรึงอนุภาคซิลเวอร์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์

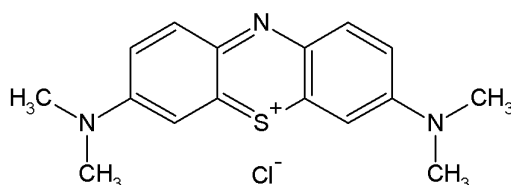
ใช้วิธีการจุ่มแช่โดยศึกษาเวลาในการจุ่มแช่ที่เวลาต่างๆคือ 5, 15, 30, 60 และ 120 นาทีตามลำดับเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาตรึงอนุภาคซิลเวอร์นี้ จะใช้เส้นใยแก้วจากสูตรที่ให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู บิสฟีนอลเอ และไดคลอโรฟีนอล ภายใต้แสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนต์ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ สูตร 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง มาแช่ในสารละลายซิลเวอร์ในเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆคือ 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 และ 0.3 โมลาร์ตามลำดับ จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องและนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิ

สูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่ได้ไปล้างในน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดส่วนเกินที่ติดอยู่บริเวณผิวให้หลุดออกไป แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็จะได้เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ

2.5 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

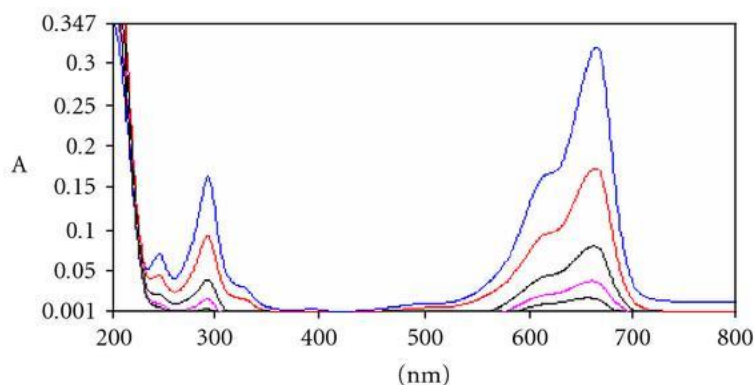
2.5.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

การเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู เตรียมเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการนำไปวิเคราะห์ผลโดยเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีโครงสร้างตาม รูปที่ 2.4 ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.2×10^{-5} - 1×10^{-5} โมลาร์ จากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วย UV-Vis Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าเมทิลีนบลูแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นจึงเลือกความยาวคลื่นดังกล่าวใช้ในการศึกษาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเมทิลีนบลู

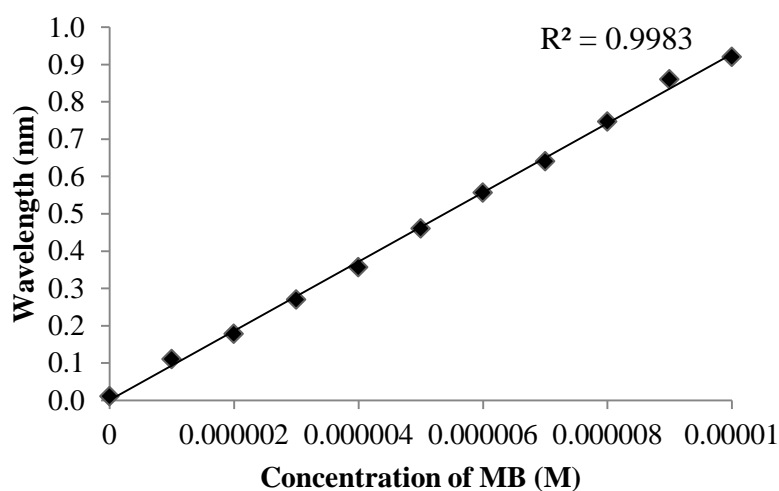
(ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Methylene_Blue.gif)



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลู

(ที่มา: <http://www.hindawi.com/journals/ijp/2008/426872/fig6/>)

จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.1×10^{-5} - 1×10^{-5} โมลาร์ สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer มาสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งกราฟที่ได้มีค่าความถูกต้องของกราฟที่เชื่อถือได้จากการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (R-Square, R^2) เท่ากับ 0.9983 จึงนำไปหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

2.5.2 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

ทดสอบโดยนำเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ ตัวอย่างละ 2 กรัมมาทดสอบกับสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ 50 มิลลิลิตร ทดสอบในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในตู้ทึบแสงเพื่อศึกษาการค่าดูดกลืน และจุดอิ่มตัว (Equilibrium) ของเส้นใยแก้วก่อนได้รับการฉายแสง โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลานาน 60 นาที จากนั้นนำไปฉายแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ขนาด 50 วัตต์ เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง และเก็บข้อมูลที่เวลาต่างๆคือ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ โดยวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาต่างๆด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของเมทิลีนบลู (%Degradation of MB) ที่เวลาต่างๆ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของเมทิลีนบลูสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรที่แสดงดังสมการที่ (2.1)

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

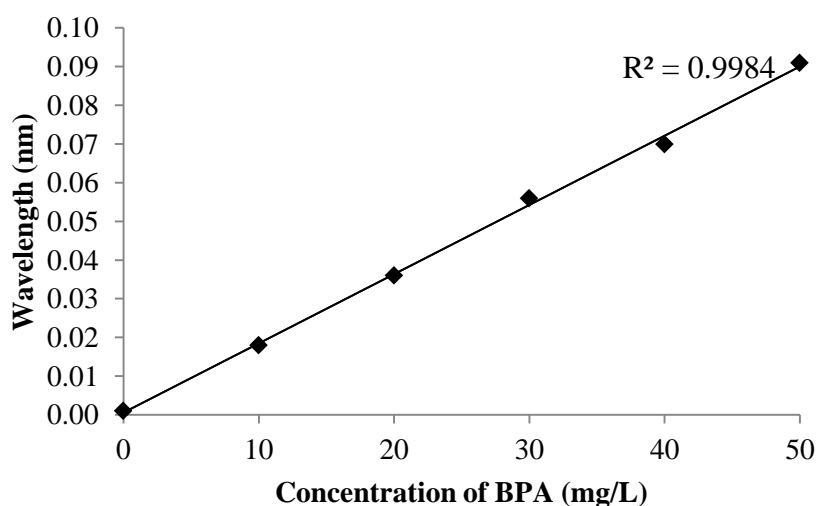
เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู
เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์

C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆ ที่ทดสอบ (โมลาร์)

2.6 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายบิสฟีนอลเอ และ ไคคลอโรฟีนอล

2.6.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานบิสฟีนอลเอ

เตรียมสารละลายบิสฟีนอลเอ ความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากผงบิสฟีนอลเอ (99% Sigma-Aldrich) นำมาละลายในน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นดังกล่าว จากนั้นนำสารละลายบิสฟีนอลเอในแต่ละความเข้มข้นมาวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 288 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงของสารละลายบิสฟีนอลเอ โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ หรือ Blank จากนั้นข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายบิสฟีนอลเอ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งกราฟมาตรฐานที่ได้มีค่าความถูกต้องของกราฟแสดงโดยค่า $R^2 = 0.9990$ จึงนำไปหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายBPA กับค่าการดูดกลืนแสง
ที่ได้จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

2.6.2 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายบิสฟีนอลเอ

ฟีนอลเอ

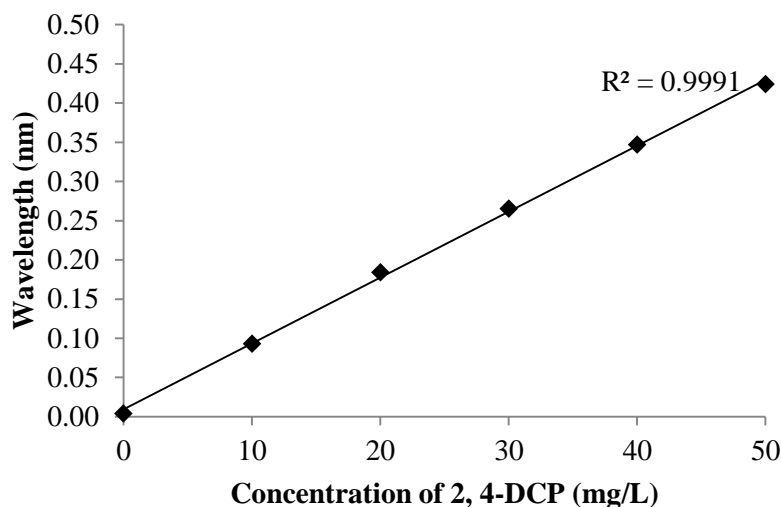
ทดสอบโดยนำเส้นใยแก้วสุตรต่างๆตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตรที่มีสารละลายบิสฟีนอลเอความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในตู้ทึบแสงเพื่อศึกษาการกำจัดคลอรีน และจุดอิ่มตัว (Equilibrium) ของเส้นใยแก้ว ก่อนได้รับการฉายแสง โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปฉายแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ขนาด 50 และ 110 วัตต์ เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาต่างๆด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสารละลายบิสฟีนอลเอ (%Degradation of BPA) ที่เวลาต่างๆ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสารละลายบิสฟีนอลเอ สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรที่แสดงดังสมการที่ (2.2)

$$\% \text{ Degradation of BPA} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ C_{0BPA} คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายบิสฟีนอลเอ เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
 C_{BPA} คือ ความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆที่ทดสอบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.6.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน ไคคลอโรฟีนอล

เตรียมสารละลายไคคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากผงไคคลอโรฟีนอล (99% Sigma-Aldrich) นำมาละลายในน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นดังกล่าว จากนั้นนำสารละลายไคคลอโรฟีนอล ในแต่ละความเข้มข้นมาวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงของสารละลายไคคลอโรฟีนอล โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ หรือ Blank จากนั้นข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไคคลอโรฟีนอล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังในรูปที่ 2.8 ซึ่งกราฟมาตรฐานที่ได้มีค่าความถูกต้องของกราฟแสดงโดยค่า $R^2 = 0.9991$ จึงนำไปหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายBPA กับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

2.6.4 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย

ไดคลอโรฟินอล

ทดสอบโดยนำเส้นใยแก้วสุตรต่างๆตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายไดคลอโรฟินอลความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในตู้ทึบแสงเพื่อศึกษาการค่าดูดซับของเส้นใยเพื่อศึกษาจุดอิ่มตัว (Equilibrium) ของเส้นใยแก้วก่อนได้รับการฉายแสง โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลานาน 60 นาที จากนั้นนำไปฉายแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ขนาด 50 และ 110 วัตต์ เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาต่างๆด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสารละลายไดคลอโรฟินอล (%Degradation of 2,4-DCP) ที่เวลาต่างๆ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสารละลายไดคลอโรฟินอล สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรที่แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\% \text{ Degradation of 2,4-DCP} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ $C_{0,2,4-DCP}$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไดคลอโรฟินอล เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
 $C_{2,4-DCP}$ คือ ความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆที่ทดสอบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.7 การทดสอบปฏิกิริยาฟิโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli*

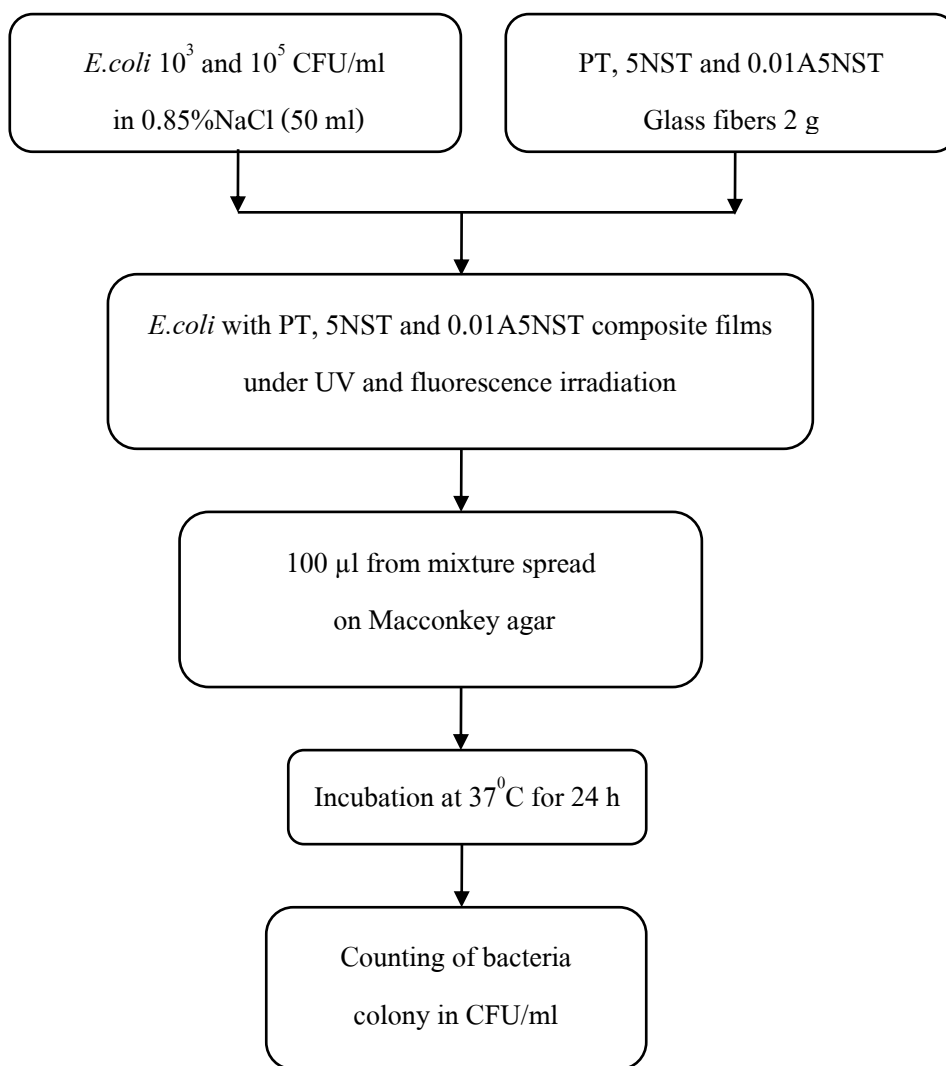
ทดสอบโดยการเตรียมเชื้อ *E.coli* เข้มข้นโดยนำเชื้อ *E.coli* 1 โคโลนีใส่ลงในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลว (Trypticase soy broth) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เชื้อเข้มข้นสำหรับนำมาเจือจางต่อไป จากนั้นเตรียมอาหารแข็ง (Macconkey) โดยใช้อาหาร 50 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ นำอาหารแข็งและน้ำเกลือดังกล่าวไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้อาหารเย็นแล้วเทอาหารใส่จานเลี้ยงเชื้อ จากนั้นทำการเจือจางเชื้อโดยนำเชื้อ *E.coli* เข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงไปใต้น้ำเกลือเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมเชื้อที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/mL) เตรียมโดยใช้วิธี Serial dilution method จากนั้นนำเชื้อที่เจือจางแล้วในความเข้มข้นดังกล่าวปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรหยดลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้โดยใช้เทคนิค Spread plate เจือจางจำนวนเชื้อให้อยู่ในช่วง 30 –300 โคโลนีสำหรับเชื้อที่มีความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และมากกว่า 300 โคโลนีต่อมิลลิลิตร สำหรับเชื้อที่มีความเข้มข้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร และนำน้ำที่มีเชื้อ *E.coli* ที่มีความเข้มข้นเชื้อดังกล่าวไปทดสอบการฆ่าเชื้อกับเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางสูตรต่างๆ ทำการทดสอบโดยนำเส้นใยแก้วสูตรต่างๆมาตัวอย่างละ 2 กรัม ต่อน้ำที่มีความเข้มข้นเชื้อ 10^3 และ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำทดสอบในที่มืด และนำไปทดสอบภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ขนาด 50 วัตต์ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 10 นาที เปรียบเทียบกับสถานะแสงอย่างเดียว และเส้นใยที่ไม่การเคลือบ เก็บตัวอย่างโดยใช้ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตรคูดน้ำ จากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบที่เวลาต่างๆมาปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้โดยใช้เทคนิค Spread plate กระจายเชื้อลงบนอาหารแข็งดังกล่าว แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.9 ทำการบันทึกผลโดยการถ่ายรูป และนับจำนวนเชื้อที่เหลือ จากนั้นนำสูตรที่มีประสิทธิภาพดีที่สุ่มมาทดสอบประสิทธิภาพผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ

การคำนวณหา % Disinfection ของ *E.coli* โดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.4)

$$\% \text{Disinfection of } E.coli = \frac{N}{N_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อเริ่มต้นที่มีความเข้มข้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร

N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาต่างๆที่ทดสอบ (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

2.8 การตรวจสอบคุณลักษณะ

2.8.1 X-ray Diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟสและคำนวณหาขนาดของสารเคลือบ โดยใช้สมการ Scherer คำนวณการที่ (2.5)

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

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

2.8.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

ตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของฟิล์ม และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายอยู่บนฟิล์มด้วยวิธี X-ray mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับในงานวิจัยใช้ SEM FEI Quanta 400 และ SEM; JEOL JSM-5800LV

2.8.3 Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-VIS DRS)

เทคนิค UV-VIS DRS (UV-2401, Shimadzu, Japan.) ถูกใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของผงที่สังเคราะห์และคำนวณแถบช่องว่างแถบพลังงาน โดยใช้ BaSO₄ เป็นตัวอ้างอิงแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ ช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,239.8}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อ	E_g	คือ แถบช่องว่างแถบพลังงาน (อิเล็กตรอน โวลต์)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.67×10^{-34} จูลวินาที)
	c	คือ ความเร็วของแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)
	λ	คือ ความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (นาโนเมตร)

2.8.4 Fourier-Transformed Infrared Spectrophotometry (FT-IR)

เทคนิค FT-IR (FT-IR, Bruker Equinox 55) ใช้เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างโดยการพิจารณาเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่างที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับพีคที่เกิดขึ้นถ้าหากตรงกันแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $4,000-400\text{ cm}^{-1}$ เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

2.8.5 Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis Spectrometer)

เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด ด้วยการสแกนที่ความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตร และวัดปริมาณความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลู สารละลายBPA และ 2,4-DCP ที่เปลี่ยนไปที่เวลาต่างๆเมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์

2.8.6 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

เทคนิค XPS ใช้วิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่สามารถให้ข้อมูลสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุ เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น ในงานวิจัยใช้เครื่อง XPS รุ่น AXIS Ultra DLD โดยศึกษาจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของฟิล์มตัวอย่าง

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (NST) เพื่อศึกษาปริมาณสารเจือ และอุณหภูมิสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ และเพื่อนำไปพัฒนาเป็นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ (ANST) ต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย MB BPA 2, 4-DCP และเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่ดีภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และในที่มืด และนำไปพัฒนาใช้กับเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ โดยบทที่ 3 นี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆด้วยกัน คือ 1) อิทธิพลของการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 2) อิทธิพลของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ 3) อิทธิพลร่วมระหว่างการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

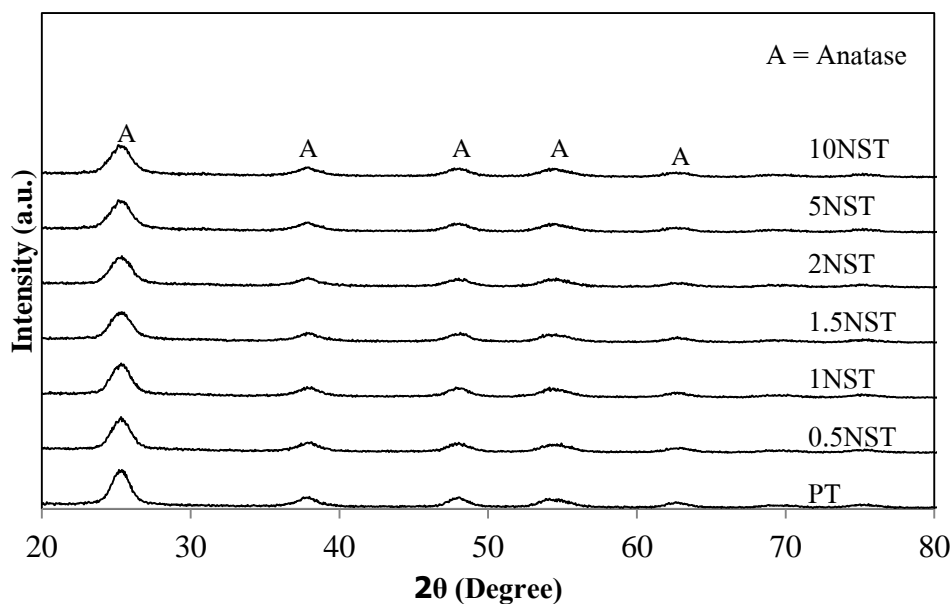
3.1 อิทธิพลของการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสังเคราะห์ และปริมาณของสารเจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์ที่มีอิทธิพลต่อเฟส ขนาดผลึก ขนาดอนุภาค และลักษณะผิวเคลือบของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย MB BPA และ 2, 4-DCP การฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์

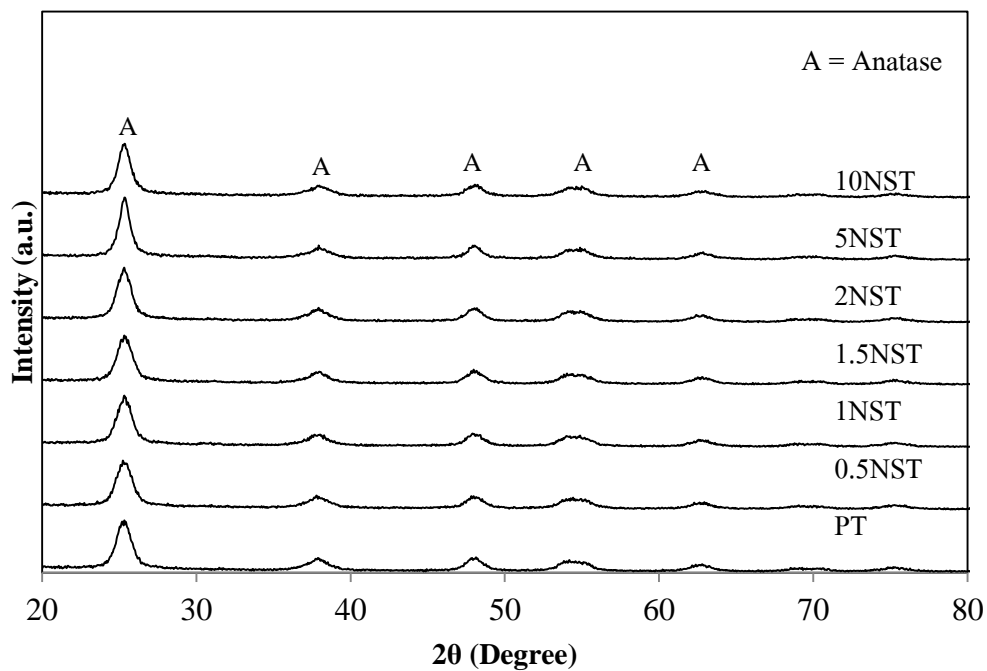
3.1.1 การวิเคราะห์ชนิดของเฟส และขนาดผลึกด้วยเทคนิค XRD

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาอิทธิพลของเฟส ขนาดผลึก และเปอร์เซ็นต์เฟส ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เตรียมโดยมีโซโอยูเรียเป็นสารตั้งต้นให้ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ แปรค่าปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ เท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์โมล (PT, 0.5NST, 1NST, 1.5NST, 2NST, 5NST และ 10NST) สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล และเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ให้ผลดังนี้

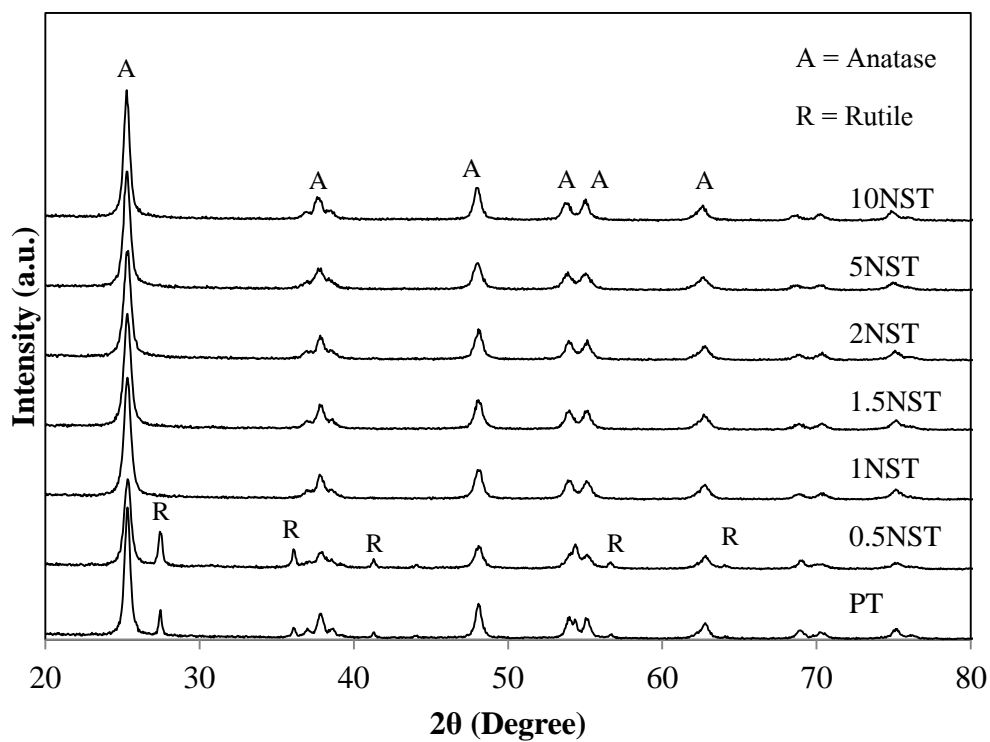
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส ทุกสูตรแสดงเฟสอะนาเทส โดยมีขนาดความกว้างของพีคที่เท่าๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือ (PT) และที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โมล (0.5NST) จะแสดงเฟสผสมระหว่างเฟสของอะนาเทส และเฟสรูไทล์ เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปกระตุ้นการเกิดเฟสรูไทล์ทำให้เกิดเป็นเฟสผสมขึ้น แต่เมื่อมีการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์มากกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์โมล จะแสดงเฉพาะเฟสอะนาเทสเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์มีอิทธิพลต่อการเกิดเฟส คือเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้นจะยับยั้งหรือกีดกันการเกิดเฟสรูไทล์ ทำให้เหลือแต่เฟสอะนาเทสเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4



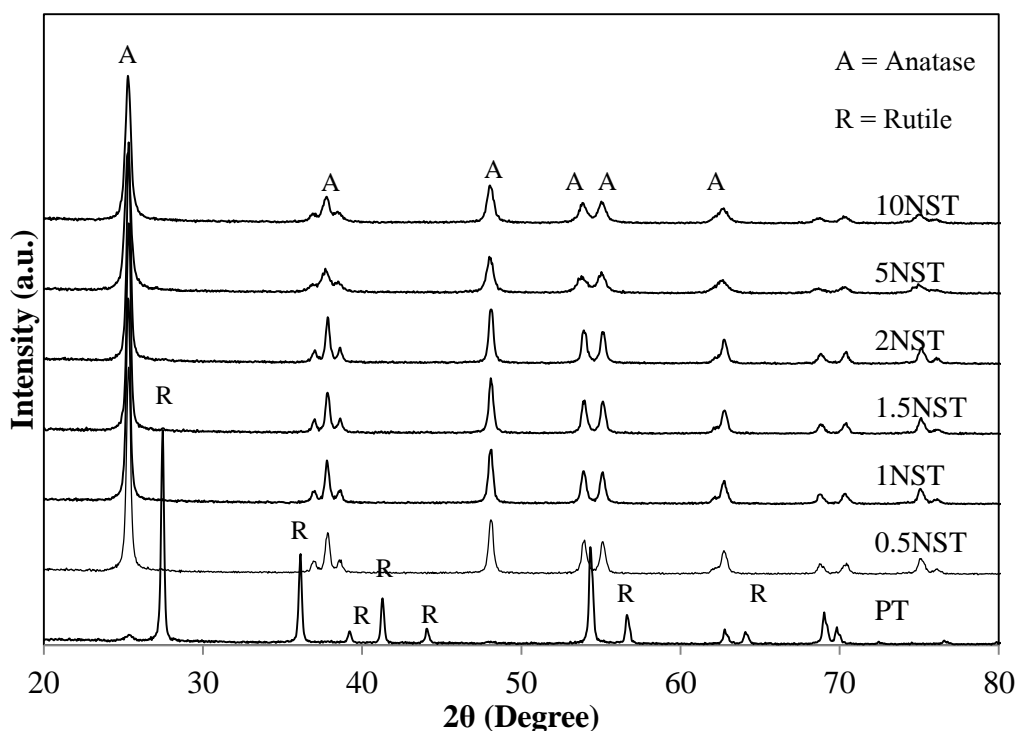
รูปที่ 3.1 XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.2 XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิจึง 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิจึง 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 XRD patterns ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาขนาดผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ จากสมการของ Scherer พบว่าเมื่อเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (NST) มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสอยู่ในช่วง 7.0 – 11.7 นาโนเมตร โดยขนาดผลึกอะนาเทสจะลดลงเมื่อมีการเจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ โดยมีขนาดผลึกเล็กที่สุดเท่ากับ 7 นาโนเมตร คือตัวอย่างที่เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โมล (5NST) และขนาดผลึกจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อสารเจือเพิ่มขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์โมล ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ NST มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสในช่วง 6.6 – 8.3 นาโนเมตร โดยมีขนาดผลึกที่เล็กที่สุดเท่ากับ 6.6 นาโนเมตร คือตัวอย่างที่เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์โมล (5NST และ 10NST) จะเห็นว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้นขนาดผลึกก็ลดลง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ NST มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสในช่วง 18.4 – 20.7 นาโนเมตร ขนาดผลึกจะลดลงเมื่อปริมาณสารเจือในโตรเจนและการเจือในโตรเจนและซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดผลึกที่เล็กที่สุดเท่ากับ 18.4 นาโนเมตร คือตัวอย่างที่เจือในโตรเจนและซัลเฟอร์ที่ 5 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์โมล (5NST) และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์โมล และมีขนาดผลึกที่ใหญ่ในช่วง 27.7 – 41.6 นาโนเมตรและที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีขนาดผลึกในช่วง 23.6 - 31.3 นาโนเมตร โดยมีขนาดผลึกที่เล็กที่สุด

เท่ากับ 23.6 นาโนเมตร คือตัวอย่างที่เจอในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 5 และ 10 เปอร์เซนต์ โมล (5N2ST และ 10NST) และมีขนาดผลึกรูไทล์ในช่วง 20.8 – 27.7 นาโนเมตรจากการคำนวณผลึกจะเห็นว่าการเจอในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์สามารถลดช่วยขนาดผลึกได้ในทุกอุณหภูมิเผา ดังแสดงในตารางที่ 3.1 นอกจากการเจอในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์จะมีอิทธิพลต่อขนาดผลึกแล้วยังมีอิทธิพลต่อการเกิดเฟสอะนาเทสและรูไทล์ด้วย ซึ่งจากการคำนวณสัดส่วนปริมาณเฟสดังตารางที่ 3.2 เห็นได้ว่าการเจอในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์สามารถยับยั้งการเกิดเฟสรูไทล์ได้ โดยที่อุณหภูมิเผา 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณสารเจือมากกว่า 1 เปอร์เซนต์ โมล สามารถยับยั้งการเกิดเฟสรูไทล์ได้ 100 เปอร์เซนต์ ดังแสดงตารางที่ 3.2

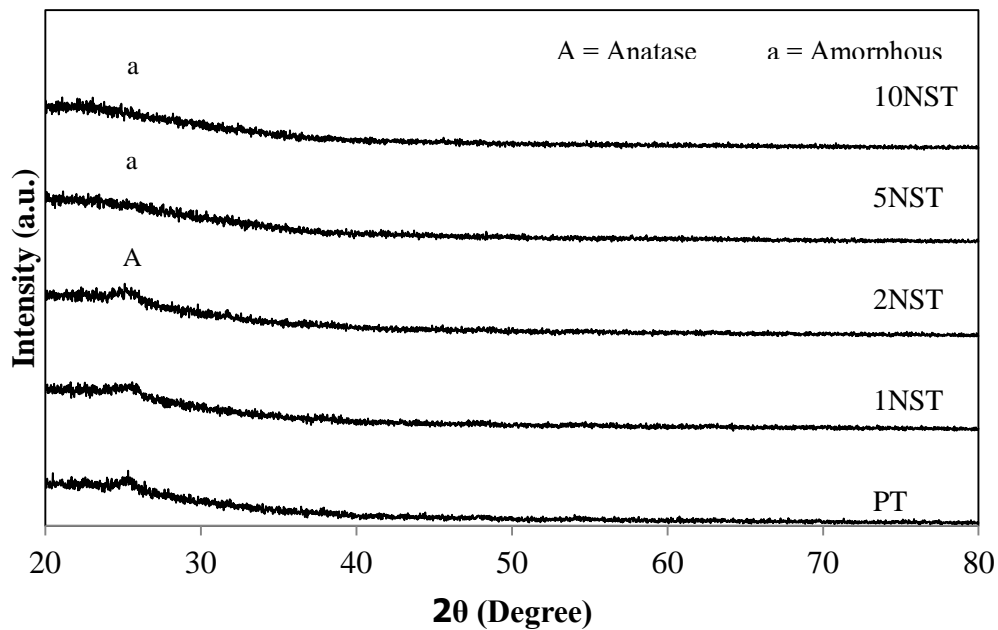
ตารางที่ 3.1 ขนาดผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)							
	อุณหภูมิเผา 300 °C		อุณหภูมิเผา 400 °C		อุณหภูมิเผา 500 °C		อุณหภูมิเผา 600 °C	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
PT	11.0	-	8.3	-	20.7	41.6	26.2	20.8
0.5NT	11.7	-	8.3	-	20.7	27.7	31.1	27.7
1NST	10.3	-	8.3	-	20.7	-	31.1	-
1.5NST	9.5	-	8.3	-	19.0	-	26.6	-
2NST	9.5	-	8.3	-	18.4	-	27.6	-
5NST	7.0	-	6.6	-	18.4	-	23.6	-
10NST	8.7	-	6.6	-	20.7	-	23.6	-

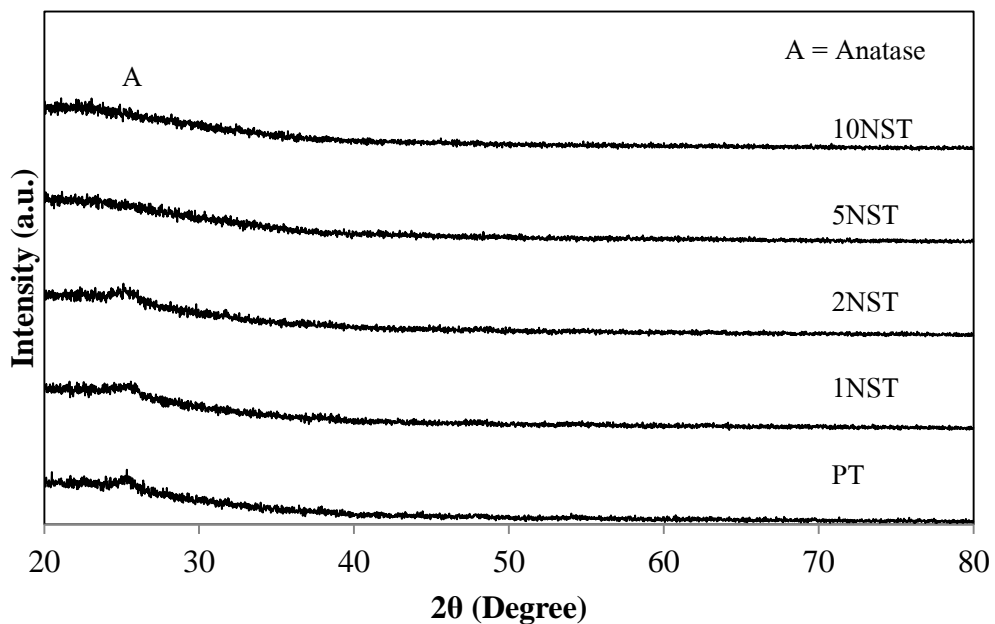
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนปริมาณเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเฟส (เปอร์เซ็นต์)							
	อุณหภูมิเผา 400 °C		อุณหภูมิเผา 500 °C		อุณหภูมิเผา 600 °C		อุณหภูมิเผา 600 °C	
	อะนาทาส	รูไทล์	อะนาทาส	รูไทล์	อะนาทาส	รูไทล์	อะนาทาส	รูไทล์
PT	100	-	100	-	97.2	2.8	53.5	46.5
0.5SNT	100	-	100	-	92.4	7.6	92.4	7.6
1NST	100	-	100	-	100	-	100	-
1.5NST	100	-	100	-	100	-	100	-
2NST	100	-	100	-	100	-	100	-
5NST	100	-	100	-	100	-	100	-
10NST	100	-	100	-	100	-	100	-

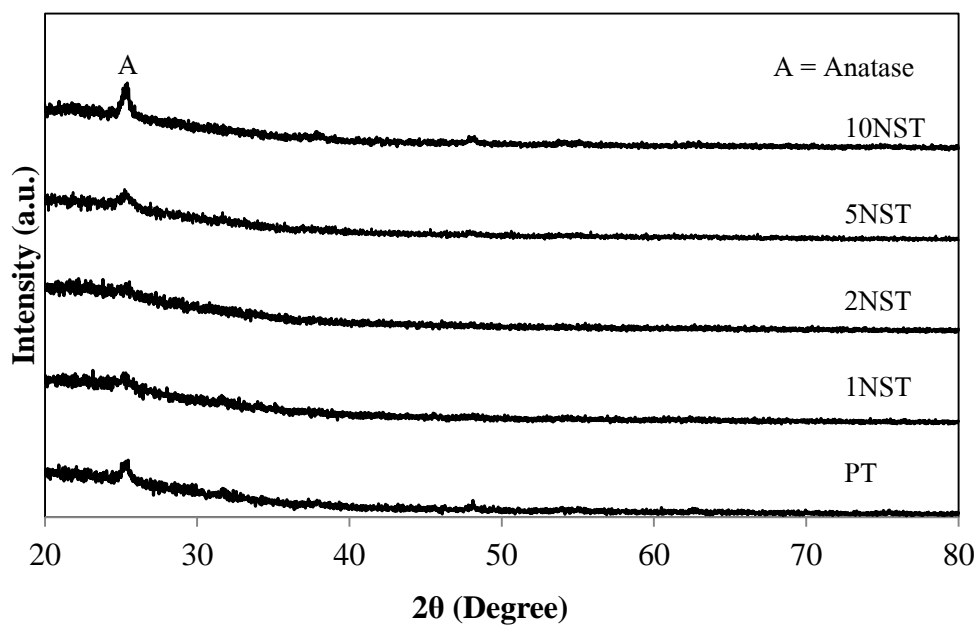
ในส่วนของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงเฟสอะนาทาสที่พีคหลัก 2θ เท่ากับ 25.3 องศา และแสดงเฟสที่เป็นออสันฐานเมื่อปริมาณสารเจือมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โมล ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยจะแสดงเฉพาะเฟสอะนาทาสที่พีคหลักที่ 2θ เท่ากับ 25.3 องศาเท่านั้น โดยความกว้างของพีคที่แสดงเฟสอะนาทาสจะมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากความกว้างของพีคที่มากขึ้นนี้จะแสดงถึงการลดลงของขนาดผลึก ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยผง ที่ว่าการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์สามารถไปยับยั้งหรือกีดขวางการโตของขนาดผลึกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 – 3.8



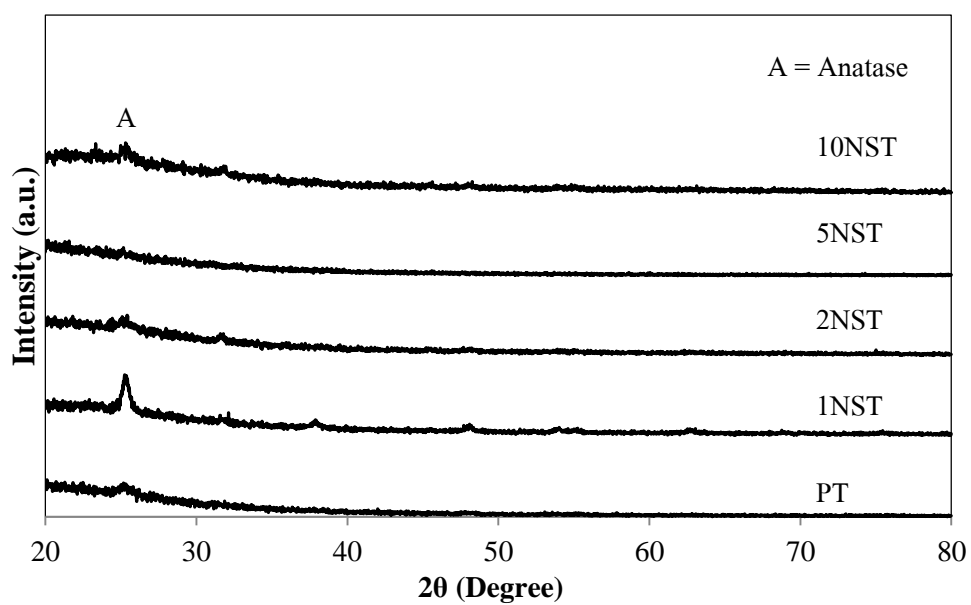
รูปที่ 3.5 XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.6 XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.7 XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 XRD patterns ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาขนาดผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จากสมการของ Scherer พบว่าฟิล์มที่เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสในช่วง 7.2 - 10.6 นาโนเมตร โดยขนาดผลึกจะลดลงเมื่อมีการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ ฟิล์มที่มีขนาดผลึกเล็กที่สุดคือฟิล์มที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โมล (2NST) มีขนาดผลึกเท่ากับ 7.2 นาโนเมตร และฟิล์มที่มีการเจือมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โมล จะแสดงเฟสอัญฐานซึ่งไม่สามารถคำนวณขนาดผลึกของฟิล์มนั้นได้ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสในช่วง 8.9 - 18.6 นาโนเมตร ฟิล์มที่มีขนาดผลึกเล็กที่สุดคือฟิล์มที่ไม่มีการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ (PT) มีขนาดผลึกเท่ากับ 8.9 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสในช่วง 10.3 - 20.7 นาโนเมตร ฟิล์มที่มีขนาดผลึกเล็กที่สุดคือฟิล์มที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (1NST) มีขนาดผลึกเท่ากับ 10.3 นาโนเมตร และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสในช่วง 8.6 - 19.6 นาโนเมตร ฟิล์มที่มีขนาดผลึกเล็กที่สุดคือฟิล์มที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โมล (2NST) มีขนาดผลึกเท่ากับ 8.6 นาโนเมตร จากการคำนวณขนาดผลึกพบว่าขนาดผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมสารเจือ ดังตารางที่ 3.3 และฟิล์มทุกสูตรจะแสดงเฉพาะเฟสอะนาเทสเท่านั้น ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ขนาดผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)							
	อุณหภูมิเผา 300 °C		อุณหภูมิเผา 400 °C		อุณหภูมิเผา 500 °C		อุณหภูมิเผา 600 °C	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
PT	10.6	-	8.9	-	17.2	-	14.8	-
1NST	10.6	-	16.2	-	10.3	-	19.6	-
2NST	7.2	-	18.6	-	10.7	-	8.6	-
5NST	Amorphous	-	14.2	-	10.6	-	9.8	-
10NST	Amorphous	-	14.1	-	20.7	-	12.9	-

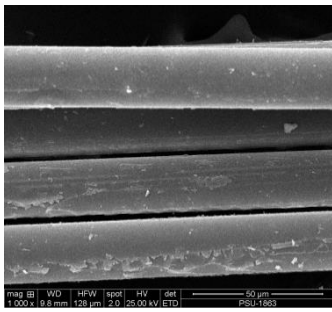
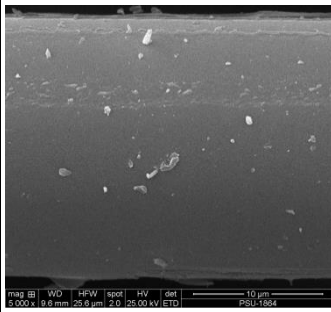
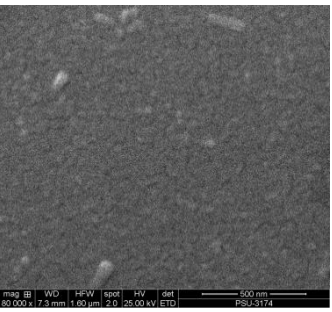
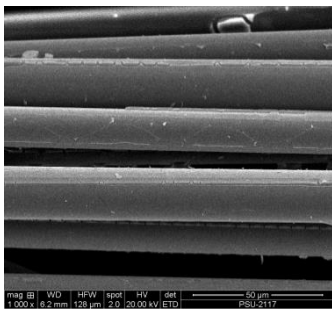
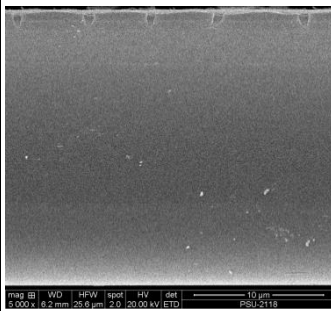
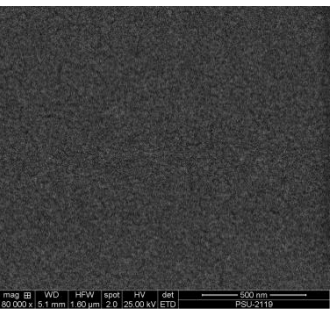
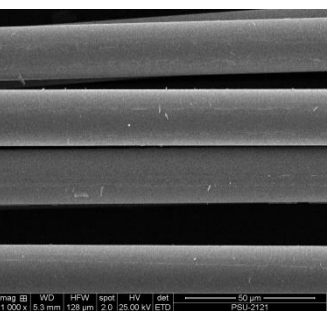
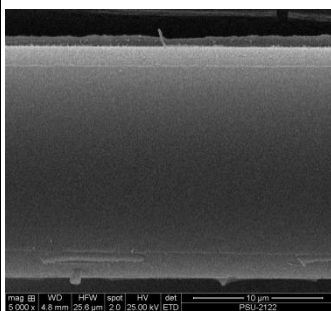
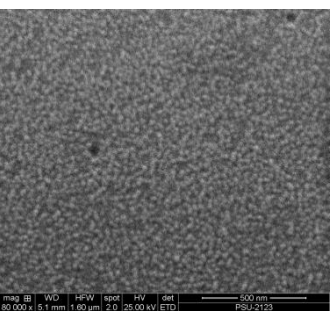
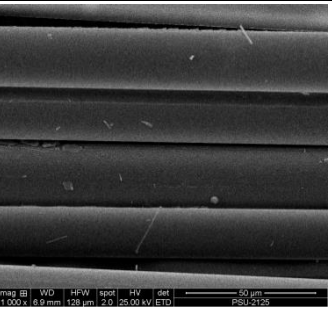
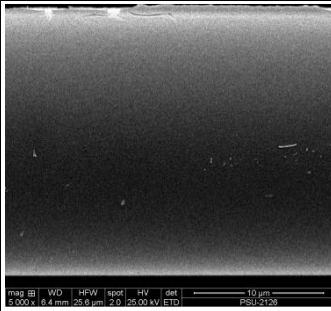
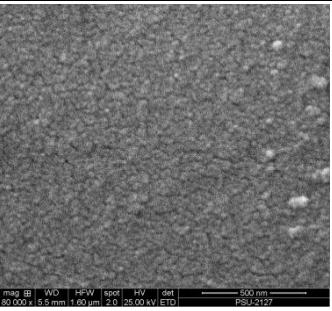
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนปริมาณเฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ

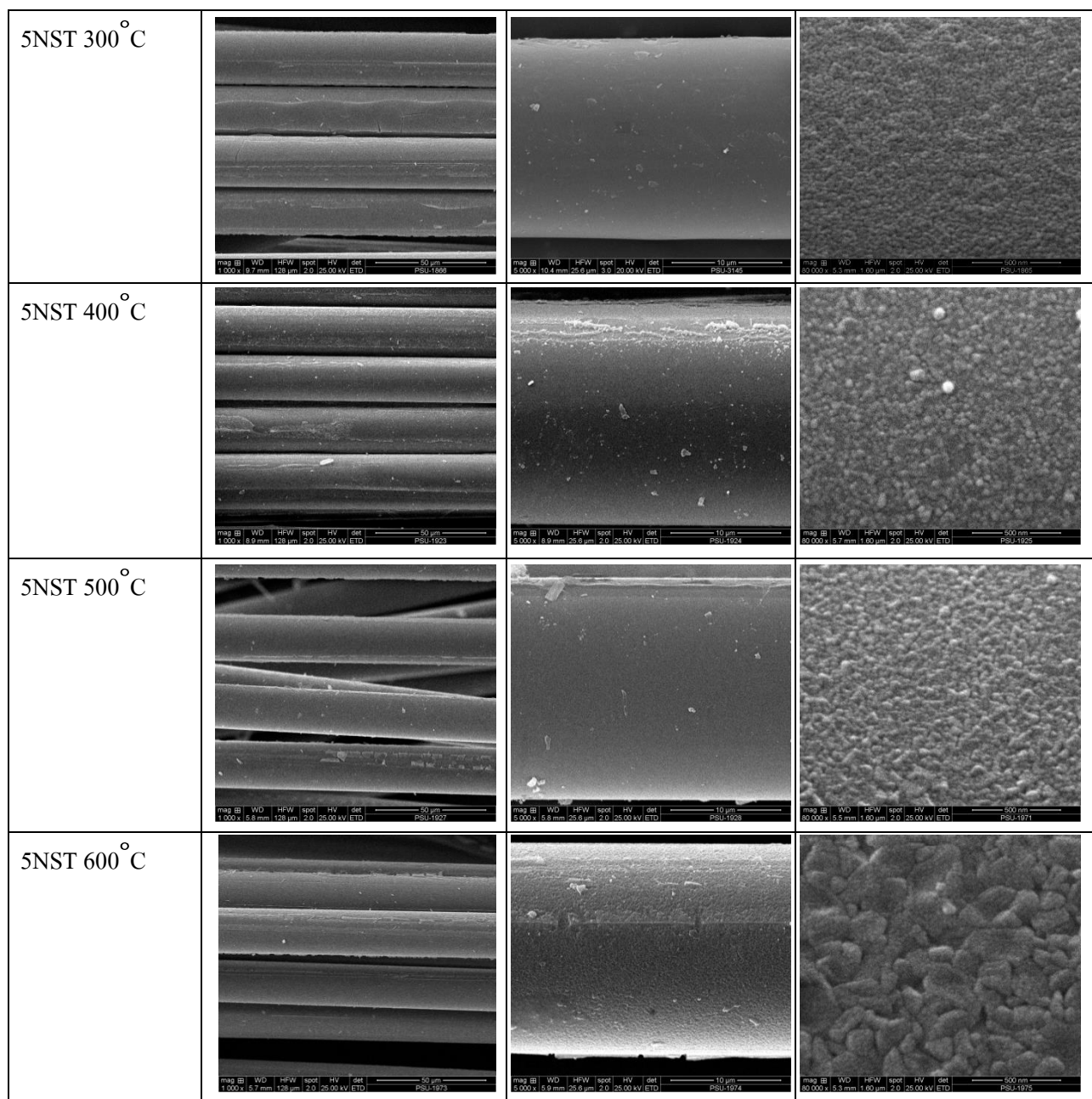
ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเฟส (เปอร์เซ็นต์)							
	อุณหภูมิเผา 400 °C		อุณหภูมิเผา 500 °C		อุณหภูมิเผา 600 °C		อุณหภูมิเผา 600 °C	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
PT	100	-	100	-	100	-	100	-
1NST	100	-	100	-	100	-	100	-
2NST	100	-	100	-	100	-	100	-
5NST	100	-	100	-	100	-	100	-
10NST	100	-	100	-	100	-	100	-

3.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยเทคนิค SEM

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนเส้นใยแก้ว ที่เจือในโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โมล สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล และวิธีจุ่มเคลือบ เผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ ด้วยเทคนิค SEM โดยใช้กำลังขยายที่ต่างกัน คือ 1,000, 5,000 และ 80,000 เท่าตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือ (PT) การเคลือบมีความสม่ำเสมอและพื้นผิวมีลักษณะเรียบ ส่วนฟิล์ม 5NST การเคลือบมีความสม่ำเสมอและพื้นผิวมีความขรุขระ ซึ่งผิวขรุขระนี้สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิเผา พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นฟิล์ม PT และ 5NST มีความขรุขระเพิ่มสูงขึ้น และอนุภาคของฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปกระตุ้นให้เกิดการรวมตัวของเกรนทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ หรือที่เรียกว่าการเกิด Grain growth นั่นเอง แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิมิมีส่วนสำคัญในการควบคุมขนาดอนุภาคของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ชื่อตัวอย่าง	กำลังขยาย		
	1,000 เท่า	5,000 เท่า	80,000 เท่า
PT 300°C			
PT 400°C			
PT 500°C			
PT 600°C			

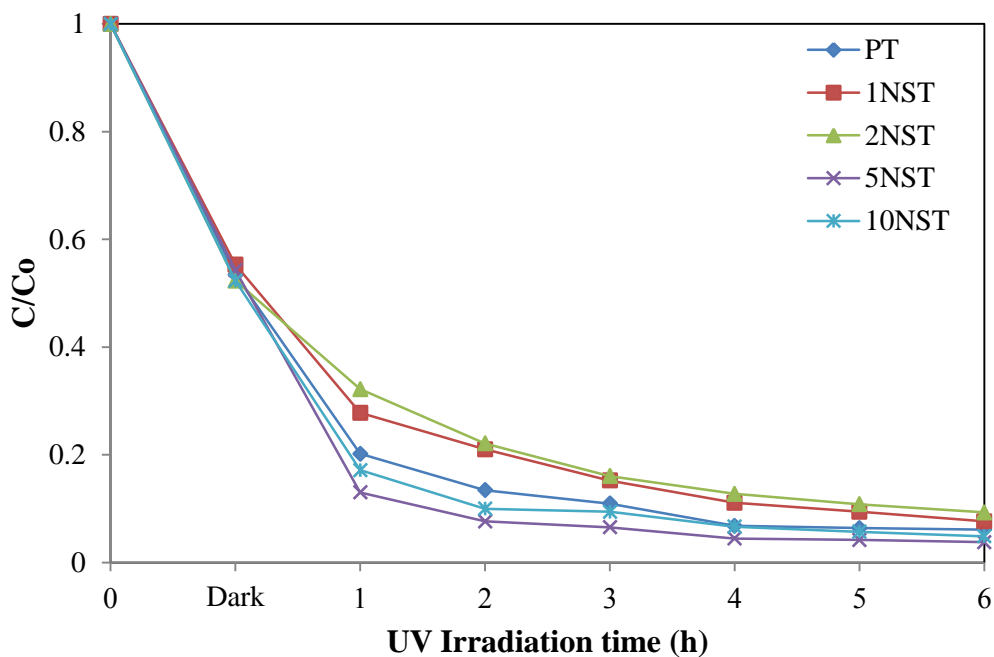


รูปที่ 3.9 ลักษณะของฟิล์มบาง PT และ 5NST ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว
 เมาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

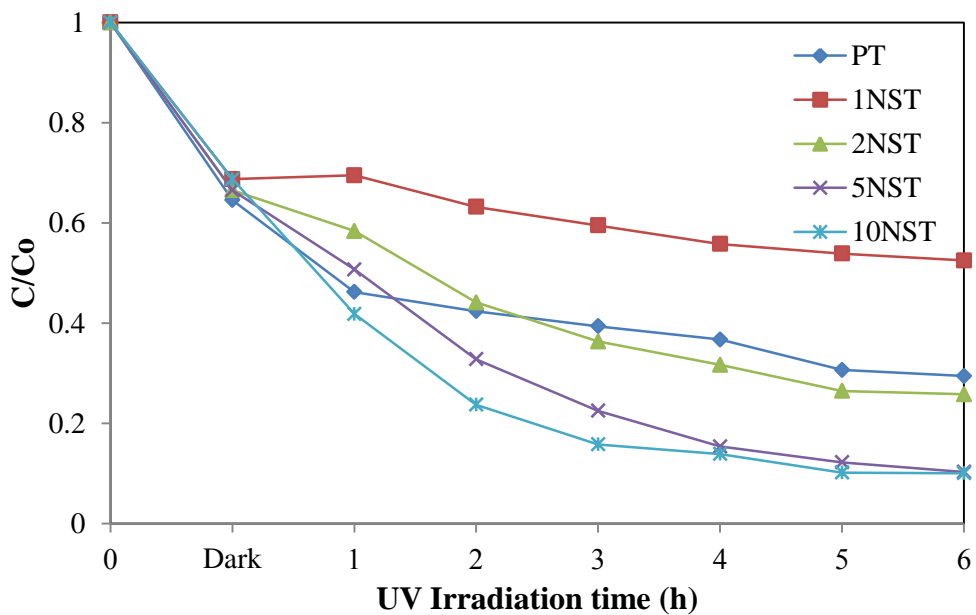
3.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

ในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

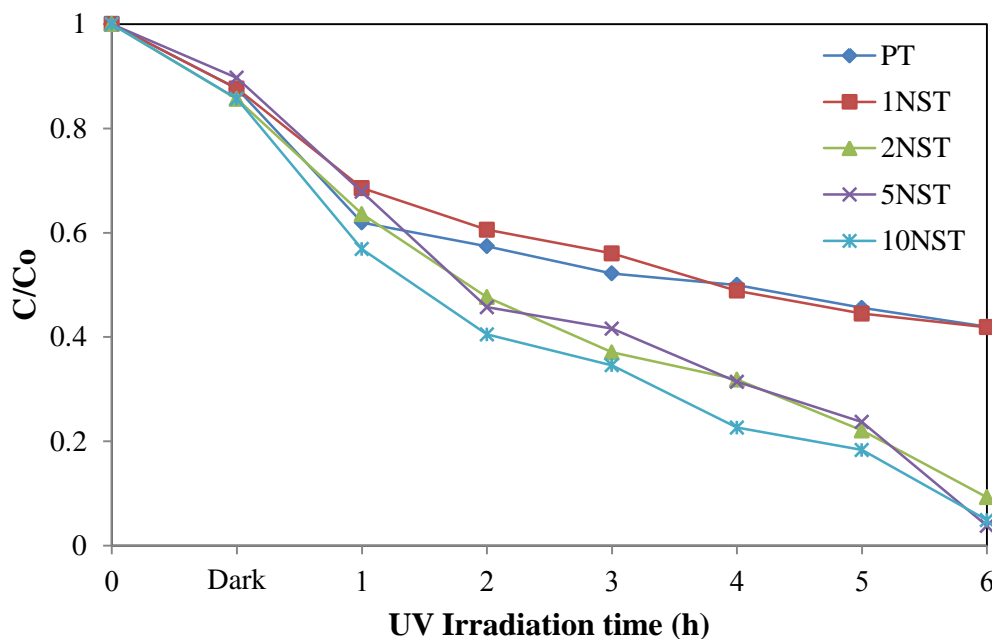
ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มบาง PT และ NST ที่มีปริมาณไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ เท่ากับ 0, 1, 2, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โมล เฝ้าที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยศึกษาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ภายในเวลา 6 ชั่วโมงของการแสงยูวี 50 วัตต์ จากการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง PT และ NST เฝ้าที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิเฝ้า 300 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้สูงสุด 96.20 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 5NST ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ที่อุณหภูมิเฝ้า 400 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ 90 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 5NST ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ที่อุณหภูมิเฝ้า 500 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ 95.22 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 5NST ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และที่อุณหภูมิเฝ้า 600 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ 67.48 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 2NST ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จากการทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูในทุกอุณหภูมิเฝ้าสูตรที่เจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โมลสามารถย่อยสลายได้ดีว่า PT และ NST ที่เจือในปริมาณอื่นๆ ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์มบาง 5NST ในทุกๆอุณหภูมิเฝ้ามีลักษณะของฟิล์มที่มีความขรุขระส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีกว่าสูตร PT และสูตรอื่นๆนั่นเอง จากการทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกข้างต้น สามารถสรุปเป็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งจากข้อมูลในตารางจะเห็นได้ว่าสูตรที่มีการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ในการเฝ้าที่ทุกอุณหภูมิจะให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด จึงมีการศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ต่อไป



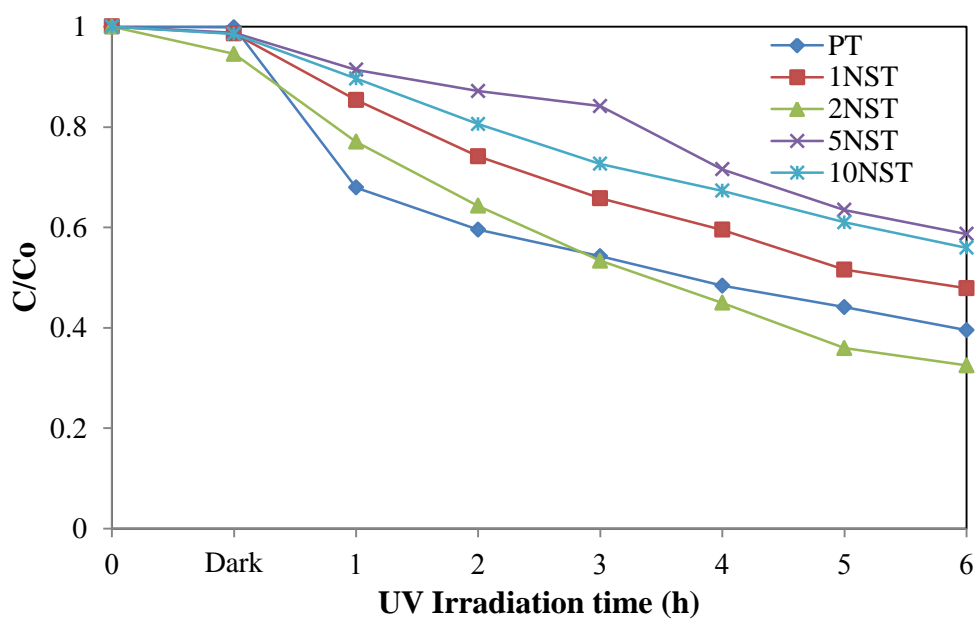
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

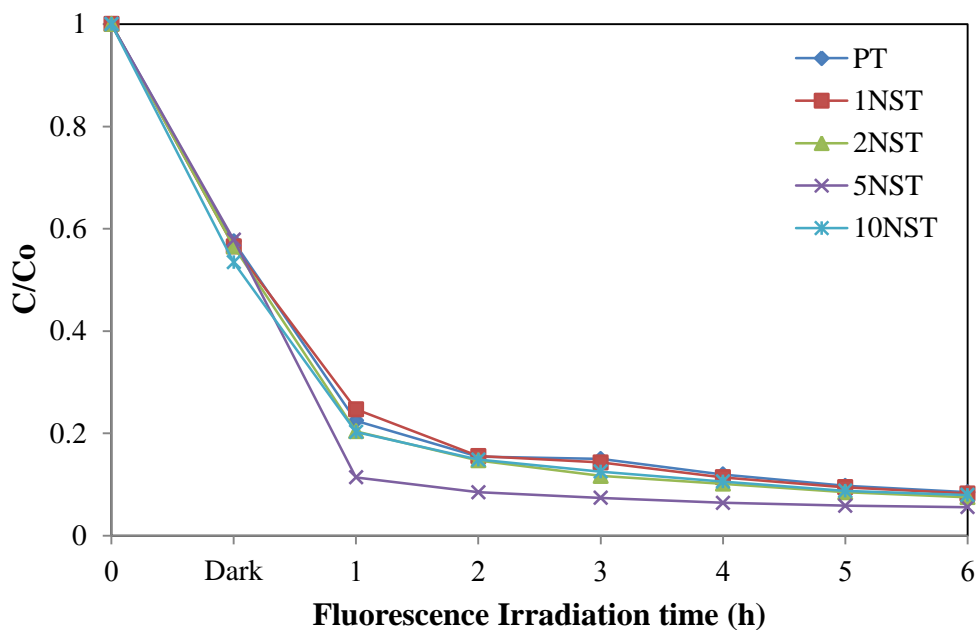


รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

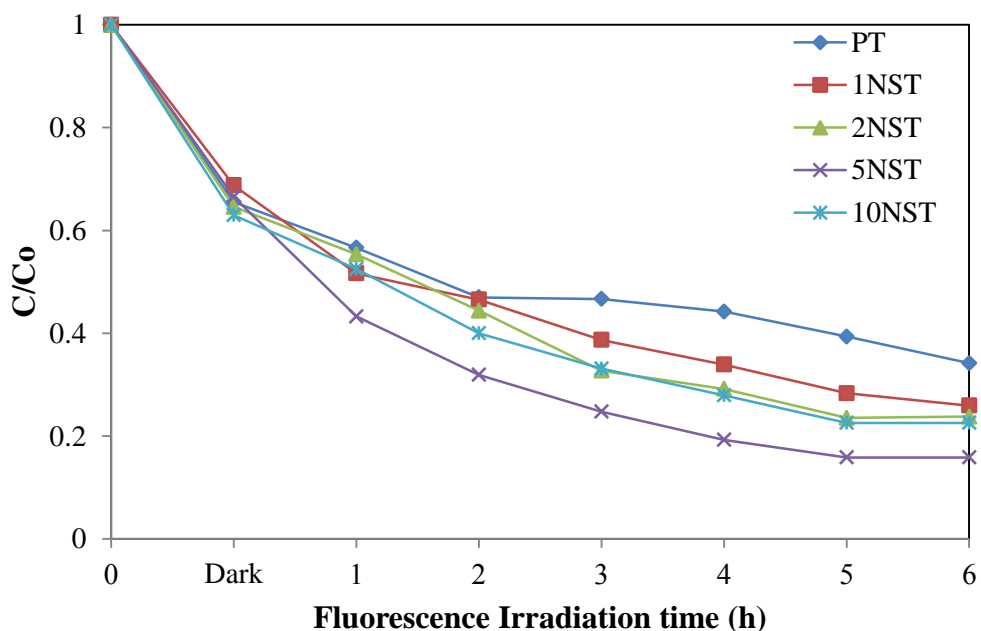
ตารางที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลินบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวีนาน 6 ชั่วโมง

ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลินบลู ภายในเวลา 6 ชั่วโมงของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (%)			
	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
PT	93.87	70.54	57.99	60.48
1NST	92.35	47.48	58.13	52.13
2NST	90.69	74.18	90.72	67.48
5NST	96.20	90.00	96.22	41.31
10NST	95.11	89.94	95.12	44.05

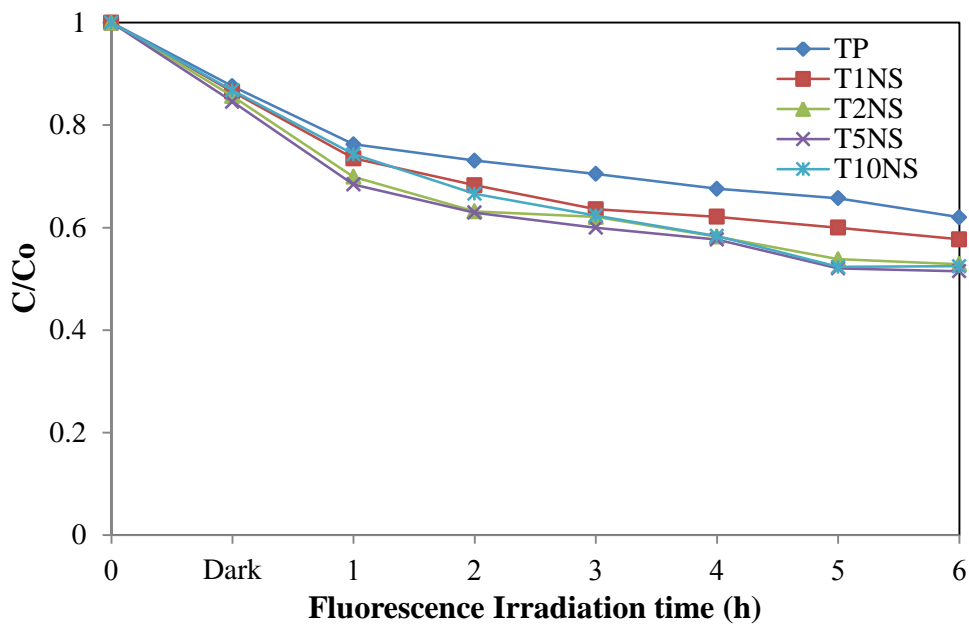
การทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลูของเส้นใยแก้วสูตรต่างๆภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ พบว่าที่อุณหภูมิเผา 300 องศาเซลเซียส สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายสีของเมทิลินบลูได้สูงสุด 94.40 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 5NST ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ที่อุณหภูมิเผา 400 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายเมทิลินบลูได้ 84.15 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 5NST ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ที่อุณหภูมิเผา 500 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถสลายสีของเมทิลินบลูได้ 48.51 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 5NST ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และที่อุณหภูมิเผา 600 องศาเซลเซียสสูตรที่ดีที่สุดสามารถสลายสีของเมทิลินบลูได้ 51.30 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 2NST ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จากการทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปเป็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้ดังแสดงในตารางที่ 3.6 ซึ่งให้ผลของประสิทธิภาพที่สอดคล้องกับการทดสอบภายใต้การรับแสงยูวี และเมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันพบว่าฟิล์มสูตร 5NST ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลูได้ดีเท่าๆกันภายใต้การรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์



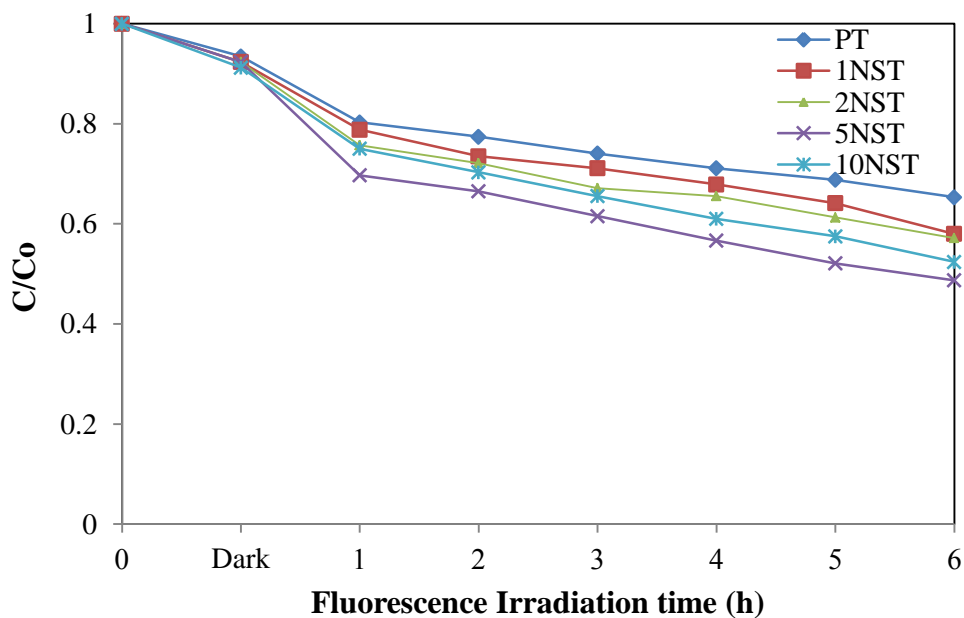
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตารางที่ 3.6 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลินบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 6 ชั่วโมง

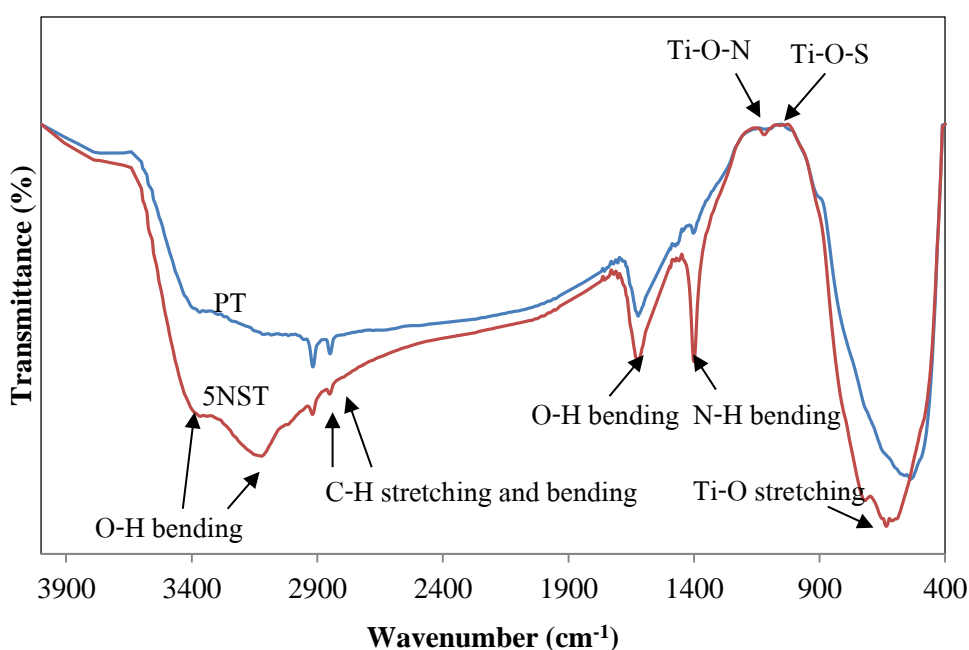
ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลินบลู ภายในเวลา 6 ชั่วโมงของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ (%)			
	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
PT	91.50	65.80	37.98	34.70
1NST	91.77	74.06	42.28	42.00
2NST	92.46	76.20	47.13	42.85
5NST	94.40	84.15	48.51	51.30
10NST	92.05	77.43	47.54	47.60

จากตารางที่ 3.5 และ 3.6 จะเห็นได้ว่าฟิล์มสูตร 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพที่ดีในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลูได้ดีที่สุดในเวลา 6 ชั่วโมงของการรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ โดยสูตรที่ดีที่สุดคือสูตรที่เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถย่อยสลายได้สูงสุดและมีประสิทธิภาพที่ดีและใกล้เคียงกันทั้งสองสภาวะแสง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวลดลง เมื่อพื้นที่ผิวลดลงทำให้พื้นที่ในการรับแสง และเกิดปฏิกิริยาลดลงด้วยเช่นกัน จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลงโดยจะเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิเผาที่ 600 องศาเซลเซียสจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีขนาดอนุภาคใหญ่และเมื่อมาทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกก็ให้ผลที่สอดคล้องกันในเรื่องของขนาดอนุภาคและการเกิดปฏิกิริยา

นอกจากการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์ และอุณหภูมิเผาจะมีอิทธิพลต่อขนาดผลึก การเกิดเฟส และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแล้วนั้น ยังส่งผลต่อสมบัติอื่นๆที่เป็นปัจจัยสนับสนุนให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมีประสิทธิภาพที่ดีภายใต้การรับแสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนซ์ ดังหัวข้อศึกษาต่อไป

3.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

เทคนิค FT-IR เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในโมเลกุล ซึ่งจะมี ความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมี โดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดที่ทำให้เกิด การสั่นของพันธะเคมีภายในโมเลกุลซึ่งมีค่าความถี่ต่างๆของการสั่นในสเปกตรัมนั้นสามารถให้ ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดการสั่นของโมเลกุลของสารที่แน่นอนได้ เพื่อระบุชนิดและองค์ประกอบหลัก ของสาร จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกันระหว่าง สสูตร PT และ 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลของการเจือในโตรเจน ร่วมกับซิลเฟออร์ โดยข้อมูลจากการวิเคราะห์จะแสดงตำแหน่งความถี่ และชนิดการสั่นของพันธะ ดังตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นว่าที่เลขคลื่น $3600-2900\text{ cm}^{-1}$ มีกลุ่มของ O-H stretching โดยเป็นพันธะ ไฮโดรเจนมีลักษณะแถบกว้าง ที่เลขคลื่น $2900-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของ C-H stretching and bending ที่เลขคลื่น $1640-1630\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของ O-H bending ซึ่งแสดงพีคของน้ำในโครงสร้างผลึก ตำแหน่งเลขคลื่น $1440-1400\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของ N-H bending ตำแหน่งเลขคลื่น $649-485\text{ cm}^{-1}$ เป็น พีคของ Ti-O stretching และเมื่อมีการเจือในโตรเจนร่วมกับซิลเฟออร์ จะพบหมู่ฟังก์ชันของ Ti-O-S ที่เลขคลื่น 1030 cm^{-1} และ Ti-O-N ที่เลขคลื่น 1060 cm^{-1} ในระบบทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสารเจือ ที่เติมลงไปในระบบสามารถเข้าไปแทรกใน โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยไปแทนที่ ออกซิเจน และฟอร์มตัวเป็น Ti-O-N และ Ti-O-S ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 FT-IR spectra ของผง PT และ 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.7 ความถี่และชนิดการสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FT-IR ของผง PT และ 5NST
เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

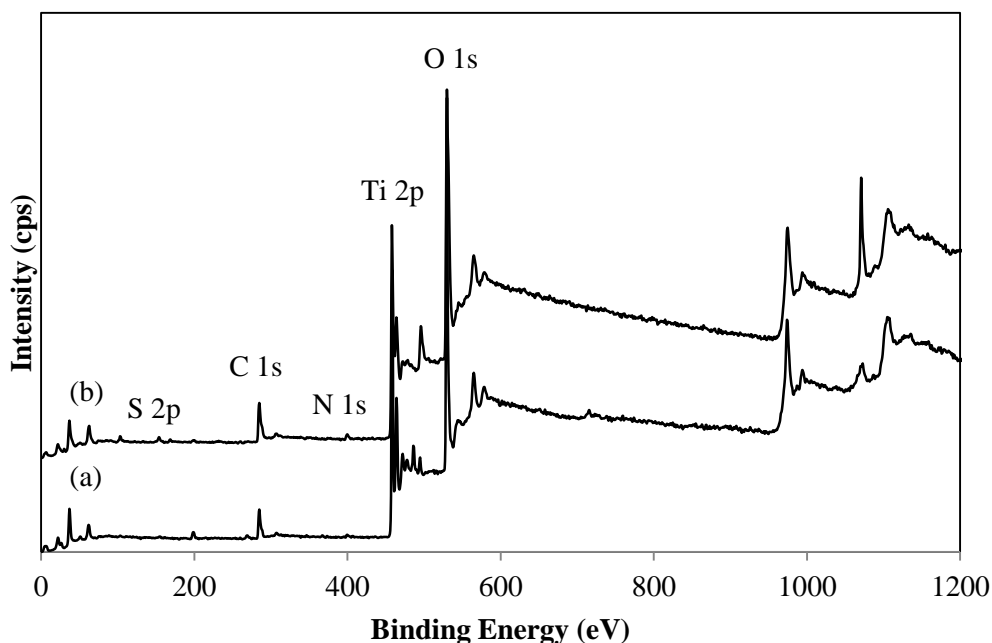
ตัวอย่าง	เลขคลื่นจากข้อมูลอ้างอิง (cm ⁻¹)	ชนิดของการสั่น
PT	649-485 (Yaithongkum และคณะ 2011)	Ti-O
	1600-1400 (Senthilnathan และ Philip 2010)	O-H bending
	3400-3300 (Senthilnathan และ Philip 2010)	O-H stretching
5NST	649-485 (Yaithongkum และคณะ 2011)	Ti-O
	1030 (Liu และคณะ 2009)	Ti-O-S
	1060 (Wei และคณะ 2008)	Ti-O-N
	1440 (Jiaqing และคณะ 2009)	N-H bending
	1600-1400 (Senthilnathan และ Philip 2010)	O-H bending
	3400-3300 (Senthilnathan และ Philip 2010)	O-H stretching

3.1.5 การวิเคราะห์สเปกตรัมของฟิล์มด้วยเทคนิค XPS

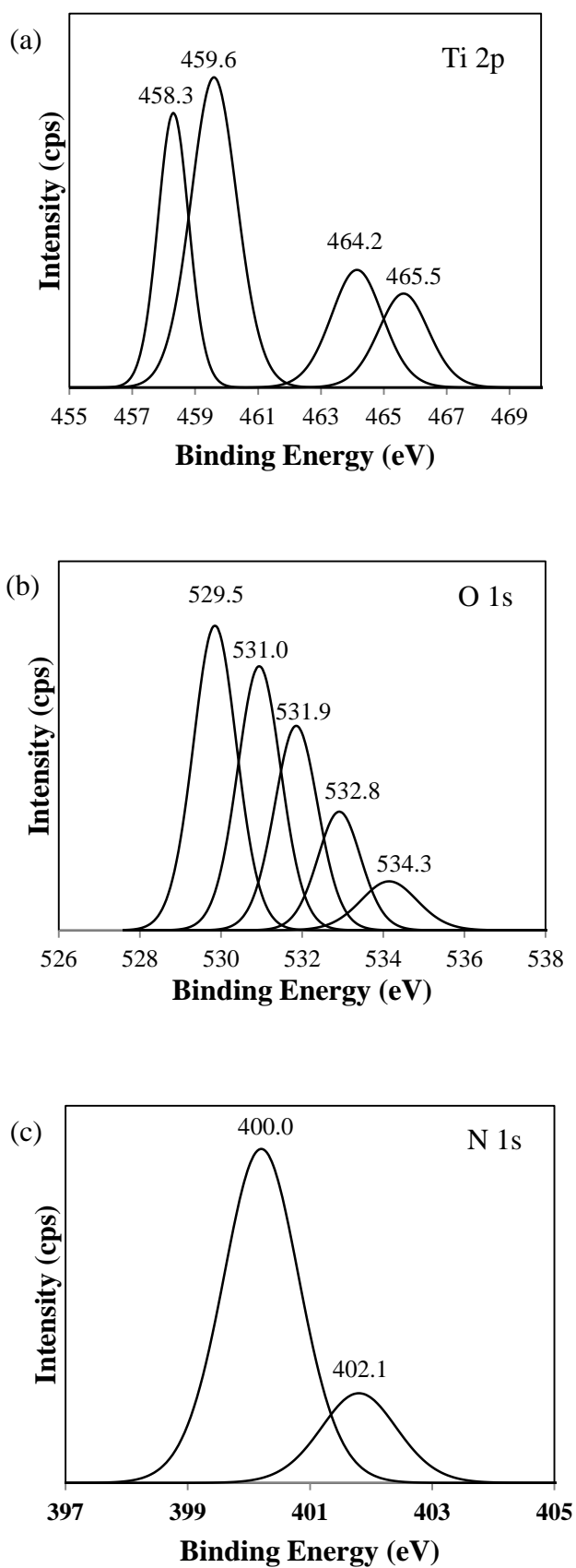
เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณ ที่สามารถให้ข้อมูลสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุ โดยจะให้ข้อมูลชนิดและธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี พันธะเคมี ชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม ของฟิล์มบาง 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

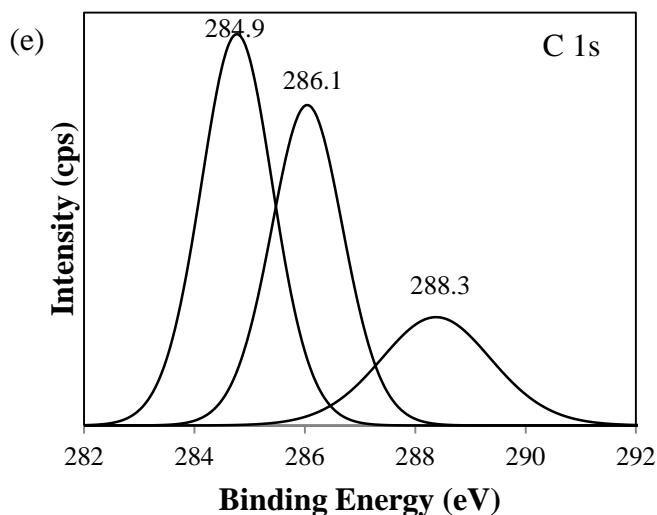
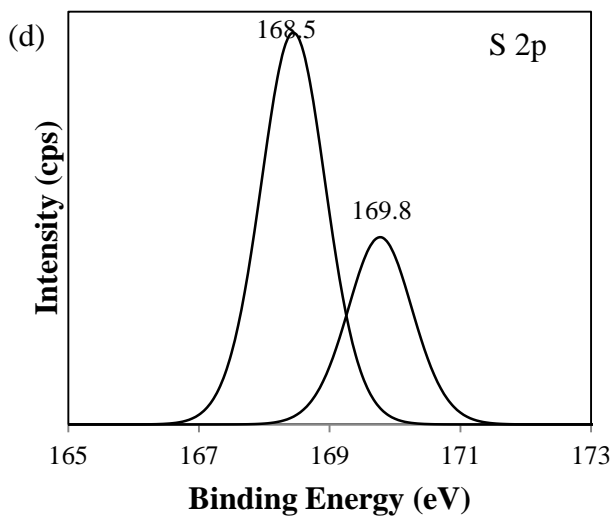
จากการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค XPS ปรากฏสเปกตรัมของธาตุ Ti, O, N, S และ C ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยปรากฏฟีก Ti 2p ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 458.3, 459.6, 464.2 และ 465.5 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 458.3 อิเล็กตรอนโวลต์ จะเป็น Ti ที่อยู่ในรูปของ O-Ti-O ดังแสดงในรูปที่ 3.20(a) ฟีก O 1s ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 529.5, 531.0, 531.9, 532.8 และ 534.3 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 529.5 อิเล็กตรอนโวลต์ จะเป็นออกซิเจนที่อยู่ในรูปของ O-Ti-O และที่ 531.9 อิเล็กตรอนโวลต์ ออกซิเจนจะอยู่ในรูปของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ดังแสดงในรูปที่ 3.20(b) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivas และคณะ (2010) ส่วนฟีก N 1s ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 400.0 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึงการเข้าไปแทรกของไนโตรเจนในแลตทิซของไทเทเนียมไดออกไซด์ และเกิดการออกซิเดชันในโครงสร้าง ไนโตรเจนในโครงสร้างกลายเป็นออกไซด์ทำให้เกิดเป็นโครงสร้าง Ti-N-O ขึ้น และที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 402.1 อิเล็กตรอนโวลต์แสดงถึงการเข้าไปแทรกของไนโตรเจนในอะตอมของไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟอร์มตัวเป็น Ti-O-N ดังแสดงในรูปที่ 3.20(c) ซึ่งให้ผล

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cong และคณะ (2007) ในตำแหน่งของพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 400.0 และ 402.1 อิเล็กตรอน โวลต์ที่แสดงถึงการเข้าไปแทรกของไนโตรเจนภายในแลตทิซ และอะตอมของไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟอร์มตัวเป็น Ti-N-O และ Ti-O-N ตามลำดับ ส่วนพีคซัลเฟอร์แสดงอยู่ในรูปของ S 2p แสดงพีคที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 168.5 และ 169.8 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งแสดงถึงซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไอออน S^{6+} 2p_{3/2} และ S^{6+} 2p_{1/2} ดังแสดงในรูปที่ 3.20(d) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rengifo-Herrera และคณะ (2008) ในตำแหน่งของพีคและค่าพลังงานยึดเหนี่ยวดังกล่าว โดยเขาได้กล่าวว่าการที่มีซัลเฟอร์ไอออนอยู่นั้นทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดี และพีคของคาร์บอนจะแสดงอยู่ในรูปของ C 1s ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 284.9, 286.1 และ 288.3 อิเล็กตรอน โวลต์ โดยพีคที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 284.9 จะแสดงถึงธาตุคาร์บอนที่เคลือบอยู่บนพื้นผิว ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 286.1 อิเล็กตรอน โวลต์ แสดงการเกิดพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน C-O และที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 288.3 อิเล็กตรอน โวลต์จะแสดงพีคของการเกิดพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน C=O ดังแสดงในรูปที่ 3.20(e) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lui และคณะ (2009) ที่ได้อธิบายถึงการเกิดพีคของคาร์บอนที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวดังกล่าว



รูปที่ 3.19 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม (a) PT และ (b) 5NST เหนือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส





รูปที่ 3.20 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม 5NST เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

(a) Ti 2p (b) O 1s (c) N 1s (d) S 2p และ (e) C 1s

สำหรับปริมาณธาตุต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค XPS แสดงดังตารางที่ 3.8 พบว่าปริมาณธาตุของฟิล์ม 5NST ซึ่งเตรียมวิธีโซล-เจล และเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยธาตุไทเทเนียม ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และคาร์บอนในปริมาณ 16.85, 584.21, 1.90, 0.88 และ 26.16 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ ซึ่งธาตุคาร์บอนที่หลงเหลืออยู่ในระบบเป็นคาร์บอนที่มาจากการสลายตัวไม่หมดของโมเลกุลสารอินทรีย์จากสารตั้งต้นไทโอยูเรียที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 3.8 เปอร์เซนต์อะตอมที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค XPS ของฟิล์ม 5NST
เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

Peak	Atomic Concentration (%)
Ti 2p	16.85
O 1s	54.21
N 1s	1.90
S 2p	0.88
C 1s	26.16

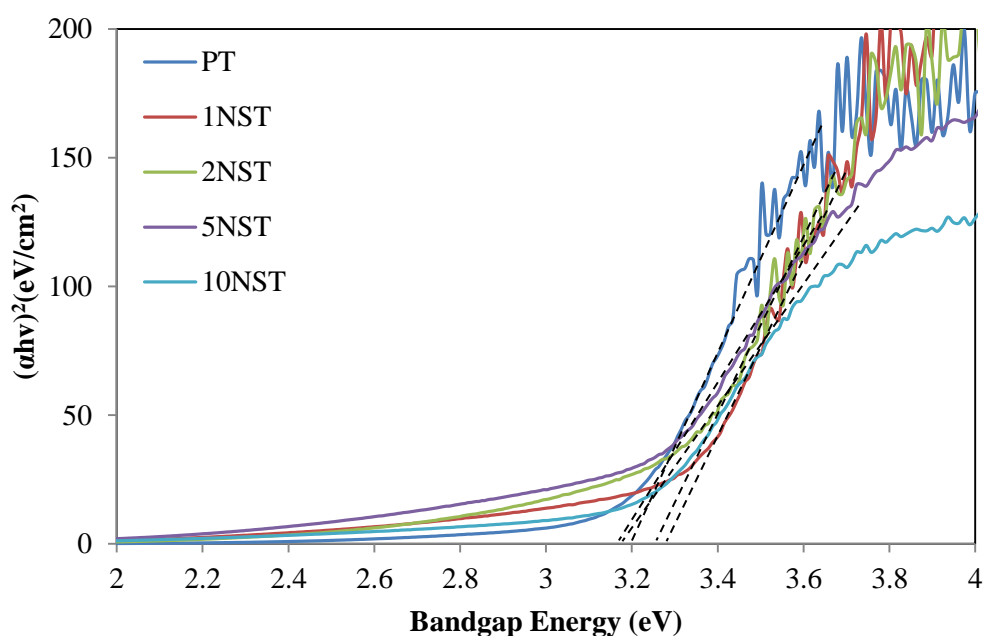
3.1.6 การวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานด้วยเทคนิค UV-Vis DRS

การวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร PT, 1NST, 2NST, 5NST และ 10NST เผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานของผงตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบการอธิบายประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก โดยในการทดสอบใช้แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) เป็นวัสดุอ้างอิงค่าแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆที่สังเคราะห์ได้ โดยลากเส้นความชันสัมผัสกับเส้นโค้งของสเปกตรัมที่ได้แล้วนำไปคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน โดยใช้สมการของ Plank ซึ่งความยาวคลื่นและค่าแถบช่องว่างพลังงานของแต่ละตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.9

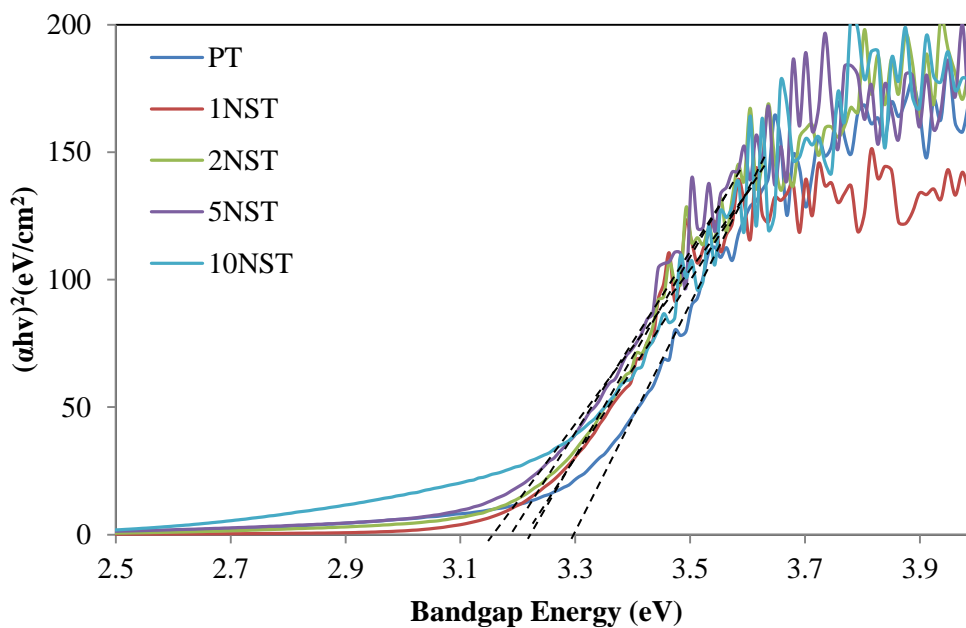
ผลการทดสอบหาช่วงการดูดกลืนแสงของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.21 พบว่าตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 380-420 นาโนเมตร โดย PT มีแถบช่องว่างพลังงานแคบที่สุดเท่ากับ 3.19 อิเล็กตรอนโวลต์และเมื่อมีการเติมสารเจือในระบบทำให้แถบช่องว่างพลังงานกว้างออก และมีแถบช่องว่างพลังงานที่แคบที่สุด คือ 3.15 อิเล็กตรอนโวลต์ คือที่ปริมาณสารเจือเท่ากับ 5 โมลาร์ (5NST) และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้นที่ 10 เปอร์เซนต์โมล แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของสารเจือมีผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงาน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.22 พบว่าผงตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-380 นาโนเมตร โดยผง PT มีแถบช่องว่างพลังงานแคบที่สุดเท่ากับ 3.33 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อมีการเติมสารเจือในระบบจะมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.12-3.33 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ปริมาณสารเจือเท่ากับ 10 เปอร์เซนต์โมล จะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานน้อยที่สุดคือ 3.12 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.23 พบว่าผงตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-470 นาโนเมตร โดย PT มีแถบช่องว่างพลังงานแคบที่สุดเท่ากับ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อมีการเติมสารเจือใน

ระบบจะมีแถบช่องว่างพลังงาน 2.53-3.21 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้น สามารถลดแถบช่องว่างพลังงานให้แคบลง ที่ปริมาณสารเจือเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานน้อยที่สุดคือ 2.53 อิเล็กตรอนโวลต์

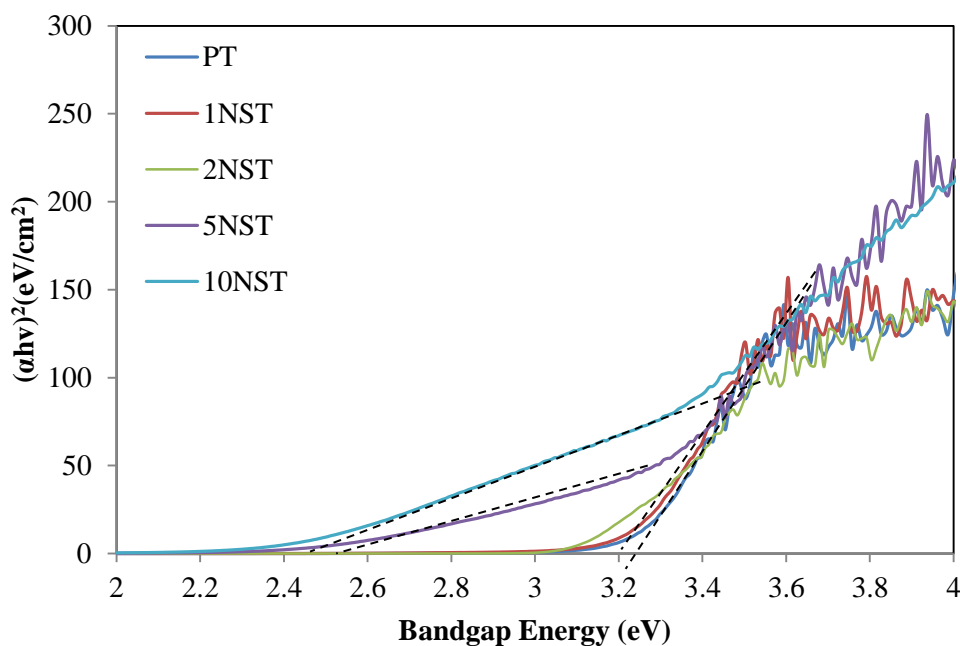
จากการศึกษาช่วงการดูดกลืนแสงและค่าแถบช่องว่างพลังงาน แสดงให้เห็นว่าการเจือไนโตรเจนร่วมกับซัลเฟอร์สามารถช่วยให้มีการดูดกลืนความยาวคลื่นเลื่อนไปทางแสงขาว (Visible light) มากขึ้น และสามารถช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานให้แคบลงได้ ทำให้ฟิล์ม NST มีประสิทธิภาพที่ดีภายใต้แสงยูวี และแสงขาว โดยค่าแถบช่องว่างพลังงานดังแสดงในตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.9 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ
เผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

ชื่อตัวอย่าง	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)		
	300 °C	400 °C	500 °C
PT	3.19	3.33	3.22
1NST	3.20	3.22	3.21
2NST	3.24	3.20	3.20
5NST	3.15	3.12	2.56
10NST	3.16	3.16	2.53

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นฟิล์มที่มีประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ จากการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD ปรากฏเฉพาะเฟสอะนาเทส และจากการคำนวณขนาดผลึกพบว่าไม่มีขนาดผลึกที่เล็กจากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์มที่ผิวขรุขระที่ประกอบด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วง 30 – 40 นาโนเมตรยึดเกาะกันเป็นฟิล์ม ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงมีพื้นที่ในการรับแสงและเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าสารเจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์ที่เจือรวมไปในระบบจะเข้าไปแทรกในอะตอมของไทเทเนียม และฟอร์มตัวเป็น Ti-O-N ที่เลขคลื่น 1060 cm^{-1} และ Ti-O-S ที่เลขคลื่น 1030 cm^{-1} ซึ่งจะมีฟีดการฟอร์มตัวของ N-H bending ที่เลขคลื่น $1440\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งยืนยันถึงการเข้าไปแทรกของอะตอมไนโตรเจนในอะตอมของไทเทเนียม และออกซิเจน และจากการวิเคราะห์ระดับโมเลกุลของฟิล์ม 5NST ด้วยเทคนิค XPS พบว่าไนโตรเจนจะปรากฏสองพีคเด่นที่ 400.0 และ 402.1 อิเล็กตรอนโวลต์ พีคนี้จะแสดงถึงการเข้าไปแทรกของไนโตรเจนในแลตทิซของไทเทเนียม ทำให้เกิดเป็นโครงสร้าง Ti-N, Ti-O-N และ O-Ti-N ตามลำดับ ส่วนซัลเฟอร์จะแสดงสองพีคเด่นที่ 168.3 และ 168.9 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึง S^{6+} ของ $2p^{3/2}$ และ S^{6+} ของ $2p^{1/2}$ โดยซัลเฟอร์จะเข้าไปแทรกในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ และเกิดเป็นโครงสร้าง Ti-S หรือเข้าไปแทนที่อะตอมออกซิเจน และเกิดเป็น Ti-O-S จากการเข้าไปแทรกของไนโตรเจน และซัลเฟอร์ทำให้แถบช่องว่างพลังงานลดลง และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis DRS พบว่าแถบช่องว่างพลังงานลดลง จึง

สามารถเลื่อนช่วงการดูดกลืนแสงไปยังแสงขาวได้มากขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีในก่าย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ดังนั้นจึงเลือกฟิล์มสูตร 5NST ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นฟิล์มที่จะนำมาพัฒนาต่อโดยมีอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเป็นองค์ประกอบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสาร BPA, 2,4-DCP และฆ่าเชื้อ *E.coli* และพัฒนาใช้กับเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบต่อไป

3.2 อิทธิพลของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรทที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยทำการแปรค่าที่ความเข้มข้น 0, 0.01, 0.03, 0.05 0.1 และ 0.3 โมลาร์ (5NST, 0.01A5NST, 0.03A5NST, 0.05ANST, 0.1A5NST และ 0.3A5NST) สังเคราะห์ด้วยวิธีเคมี ศึกษาเวลาในการจุ่มแช่ที่ 0, 5, 15, 30 และ 60 นาที และอุณหภูมิเผาที่ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาดังนี้

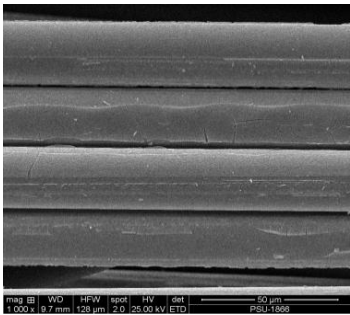
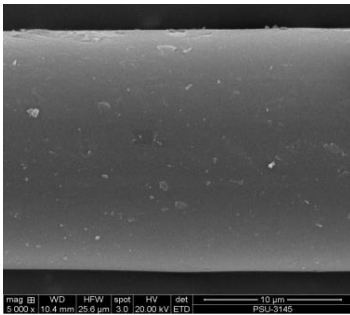
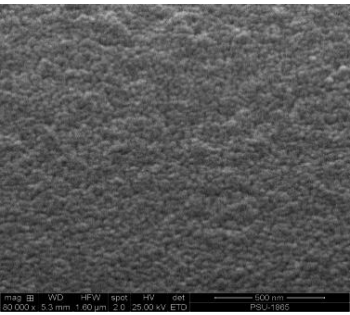
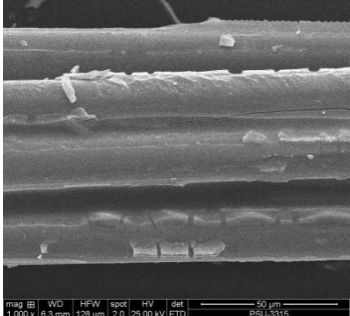
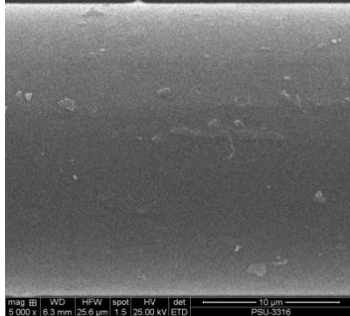
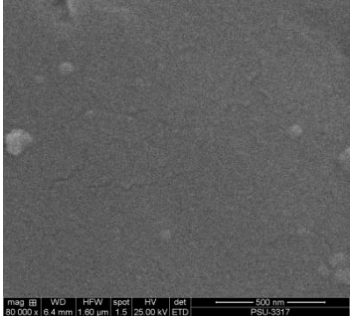
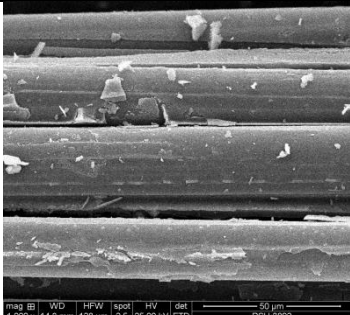
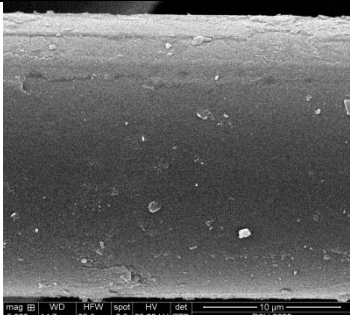
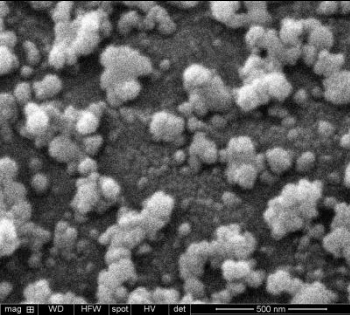
3.2.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค SEM

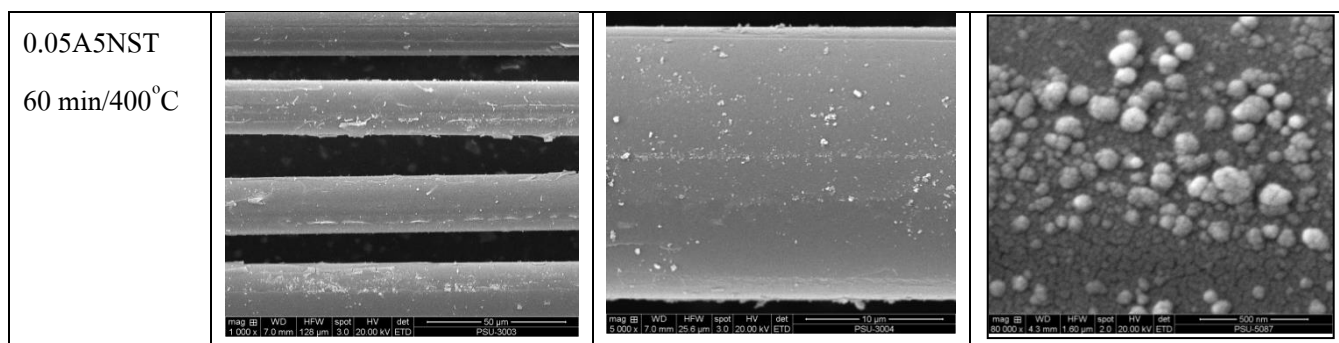
การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ในงานวิจัยนี้ต้องการให้ได้อนุภาคซิลเวอร์ในระดับนาโนเมตรและมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์อย่างสม่ำเสมอบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร 5NST เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสที่เลือกมาจากการทดลองข้างต้น โดยผู้วิจัยเริ่มต้นจากการเลือกความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรทที่เหมาะสมค่าหนึ่งมาทำการศึกษา คือที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่เวลาในการจุ่มแช่นาน 1 ชั่วโมง และทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผาที่ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนบนฟิล์ม 5NST

3.2.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเผา

จากการวิเคราะห์ลักษณะและขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรทที่ 0.05 โมลาร์ใช้เวลาจุ่มแช่นาน 1 ชั่วโมง เป็นระบบเริ่มต้นในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผาที่ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไม่เกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีลักษณะเป็นอนุภาคหรือเม็ดๆเกาะบนฟิล์ม 5NST แต่จะมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มเรียบมาเคลือบทับบนฟิล์ม 5NST แทน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาเกาะบนฟิล์ม 5NST โดยมีขนาดอนุภาคขนาดเล็กในช่วง 30-50 นาโนเมตร และอนุภาคขนาดใหญ่

ในช่วง 100-250 นาโนเมตร โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไม่กระจายตัวเท่าที่ควร และที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้มีการกระจายตัวที่ดี มีลักษณะเป็นตุ่มๆเม็ดๆกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนฟิล์ม 5NST มีขนาดอนุภาคที่เล็กอยู่ในช่วง 30-50 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคใหญ่อยู่ในช่วง 100-200 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นเป็น 500 พบว่าเส้นใยแก้วที่ได้มีความเปื่อยยุ่ยไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้อุณหภูมิเผาที่ 400 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มบาง 5NST ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว

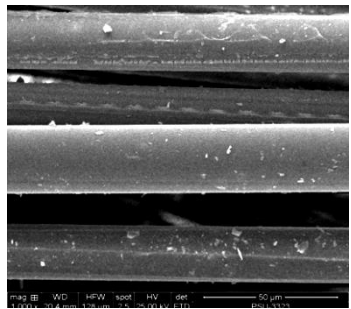
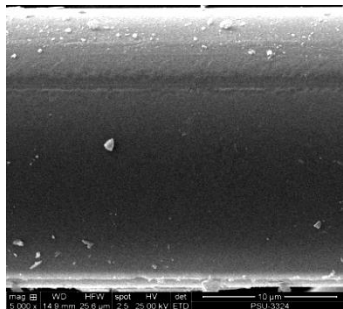
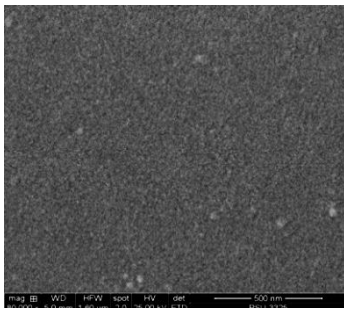
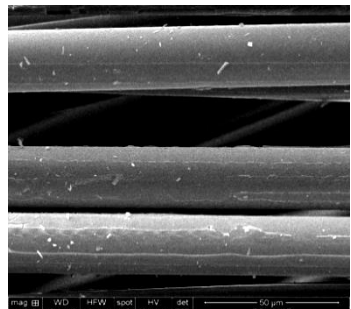
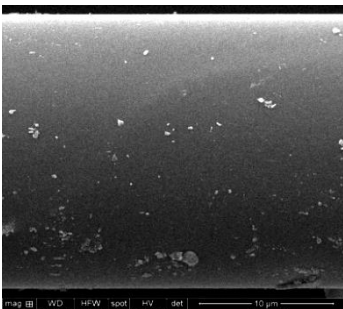
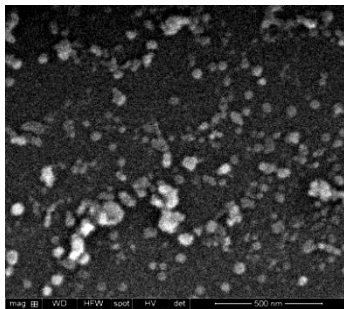
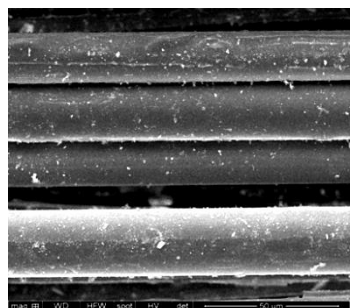
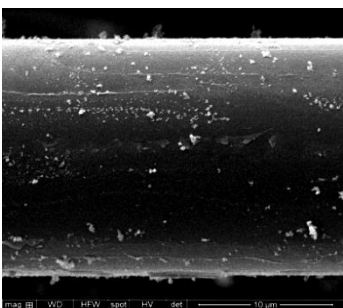
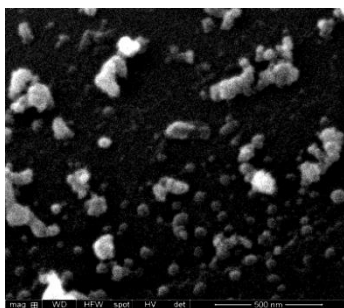
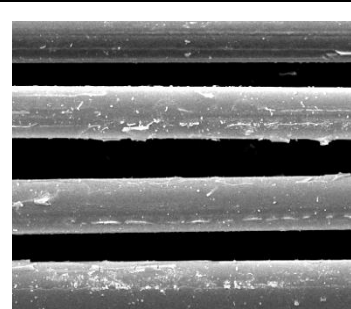
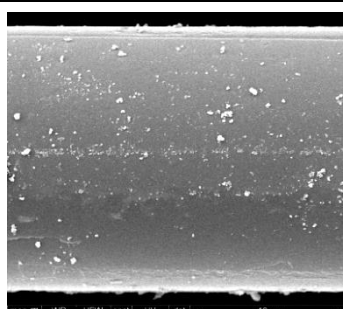
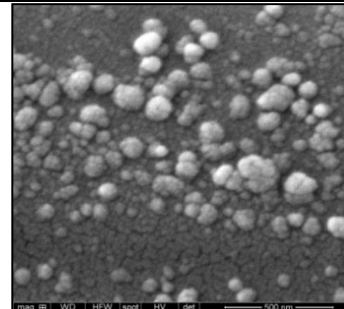
ชื่อตัวอย่าง	กำลังขยาย		
	1,000 เท่า	5,000 เท่า	80,000 เท่า
5NST			
0.05A5NST 60 min/200°C			
0.05A5NST 60 min/300°C			



รูปที่ 3.24 ลักษณะผิวเคลือบ 0.05A5NST บนเส้นใยแก้ว เติร์ยมโดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ที่เวลาในการจุ่มแช่นาน 60 นาที เหนืออุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

3.2.1.2 อิทธิพลของเวลาในการจุ่มแช่

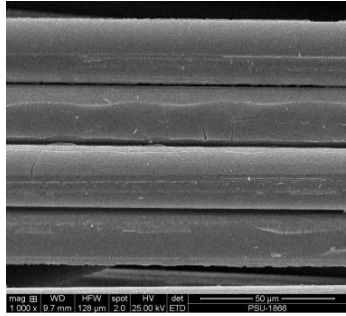
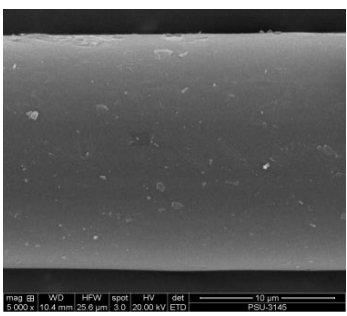
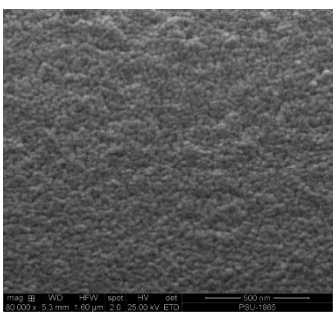
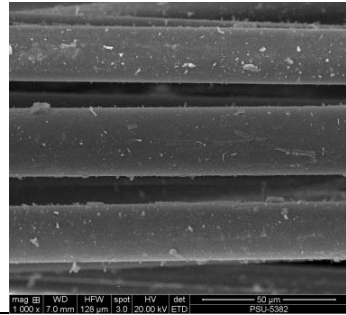
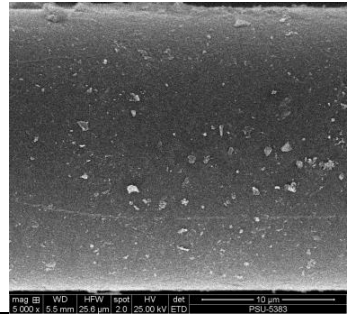
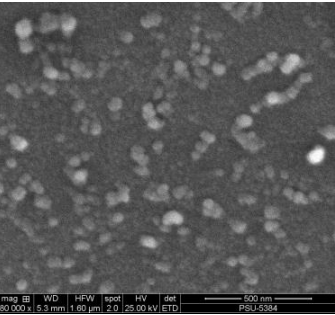
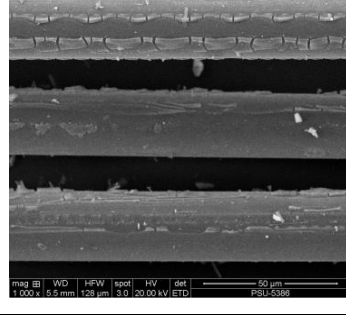
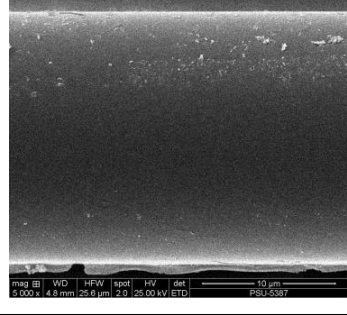
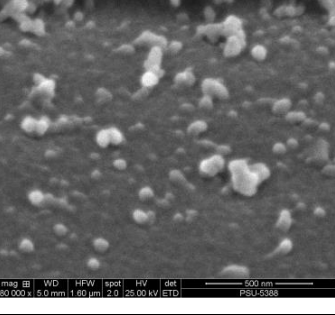
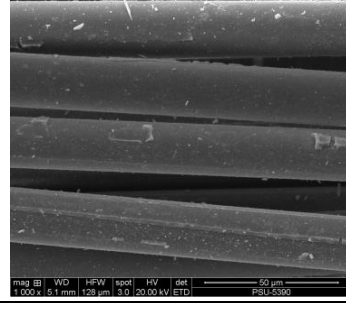
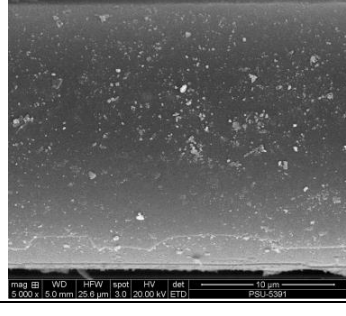
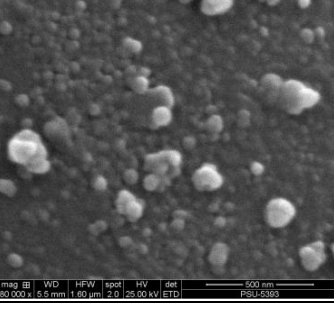
จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผาตั้งหัวข้อข้างต้น อุณหภูมิเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน จากนั้นจึงศึกษาอิทธิพลของเวลาในการจุ่มแช่ที่เหมาะสม โดยทำการแปรค่าเวลาในการจุ่มแช่ที่ 0, 5, 15, 30 และ 60 นาที ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยายต่างกัน คือ 1,000, 5,000 และ 80,000 เท่า ตามลำดับ พบว่าเวลาในการแช่มีผลต่อขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์ม 5NST ผลที่ได้คือเวลาในการจุ่มแช่นาน 5 นาที ไม่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาเกาะบนฟิล์ม แสดงว่าที่เวลาในการจุ่มแช่นาน 5 นาทีนั้นยังไม่เพียงพอต่อการฟอร์มตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์ม 5NST ที่เวลาในการจุ่มแช่นาน 15 นาทีพบว่ามีอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาเกาะบนผิวฟิล์ม และมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ดังกล่าวอย่างสม่ำเสมอดีบนฟิล์ม โดยมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 20 - 50 นาโนเมตร และอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 80-120 นาโนเมตร ที่เวลาในการแช่นาน 30 นาทีพบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกาะบนฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 30-50 นาโนเมตร และมีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 80-200 นาโนเมตร และที่เวลาในการแช่นาน 60 นาที พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกาะบนฟิล์มนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 30-50 นาโนเมตร และมีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 100-200 นาโนเมตร จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการจุ่มแช่ที่เวลาต่างๆ ทำให้ทราบว่าเวลามีผลต่อขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ คือเมื่อเวลาในการจุ่มแช่เพิ่มมากขึ้นทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นทำให้มีเวลาในการรวมตัวกันมากขึ้น โดยเวลาในการจุ่มแช่ที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือที่เวลาจุ่มแช่นาน 15 นาที จะให้ขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เล็ก และมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ดังแสดงในรูปที่

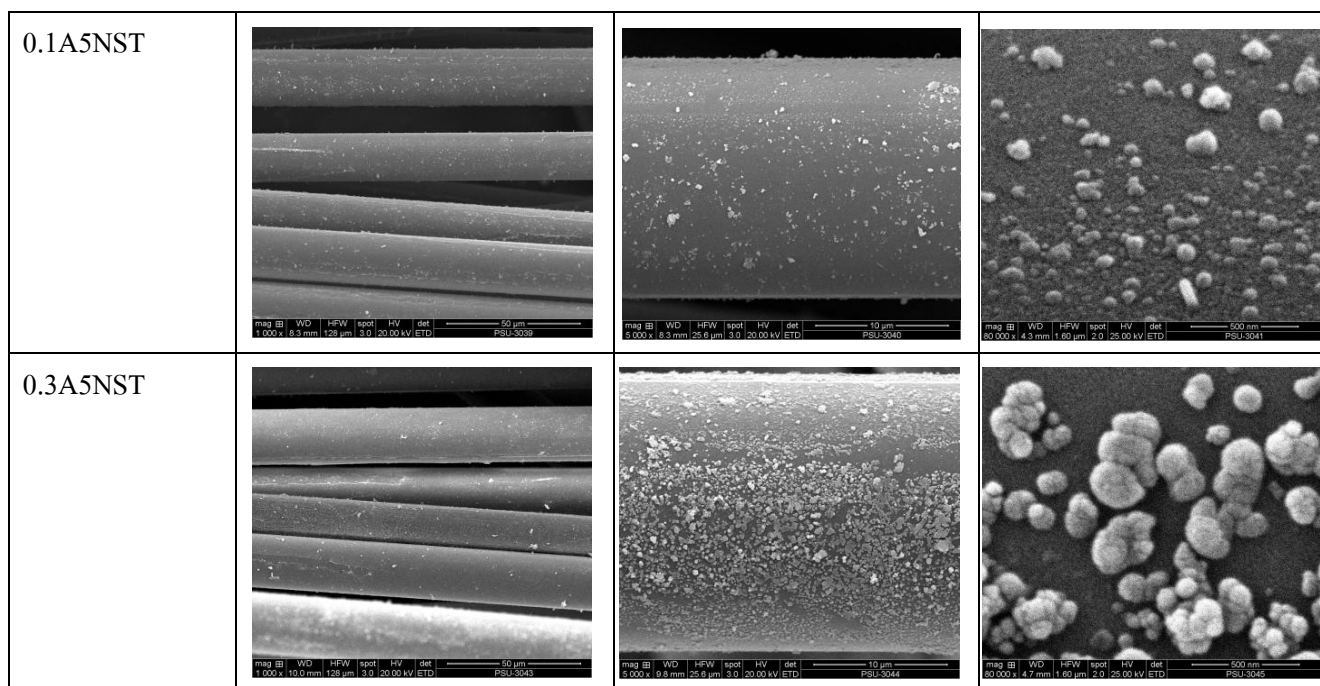
ชื่อตัวอย่าง	กำลังขยาย		
	1,000 เท่า	5,000 เท่า	80,000 เท่า
0.05A5NST 5 min			
0.05A5NST 15 min			
0.05A5NST 30 min			
0.05A5NST 60 min			

รูปที่ 3.35 ลักษณะผิวเคลือบ 0.05A5NST บนเส้นใยแก้ว เตรียมโดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ศึกษาเวลาในการจุ่มแช่ที่ 5, 15, 30 และ 60 นาที เพาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

3.2.1.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผา และเวลาในการจุ่มแช่ ทำให้ได้อุณหภูมิเผา และเวลาในการจุ่มแช่ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์ม 5NST คือ ที่อุณหภูมิเผา 400 องศาเซลเซียส และเวลาในการจุ่มแช่นาน 15 นาที จากนั้นทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่เหมาะสมในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยทำการแปรค่าความเข้มข้นที่ 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 และ 0.3 โมลาร์ (5NST, 0.01A5NST, 0.03A5NST, 0.05A5NST, 0.1A5NST และ 0.3A5NST) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM โดยใช้กำลังขยายที่ต่างกัน คือ 1,000, 5,000 และ 80,000 เท่า ตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้นซิลเวอร์ไนเตรทเท่ากับ 0.01 โมลาร์ หรือ 0.01A5NST ได้อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร และมีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 80-100 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ที่ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ (0.03A5NST) มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร และมีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 80-200 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (0.05A5NST) มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 50-80 นาโนเมตร และอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 100-250 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (0.1A5NST) มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 50-80 นาโนเมตร และอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 100-200 นาโนเมตร และที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ (0.3A5NST) พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในช่วง 100-150 นาโนเมตร และอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 250-400 นาโนเมตร ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่ความเข้มข้นต่างๆในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่าความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่มีอิทธิพลต่อขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ คือเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเพิ่มมากขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ก็มีขนาดใหญ่อขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่เหมาะสมในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST คือที่ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเท่ากับ 0.01 โมลาร์ (0.01A5NST) จะให้ขนาดอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 20-50 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.36

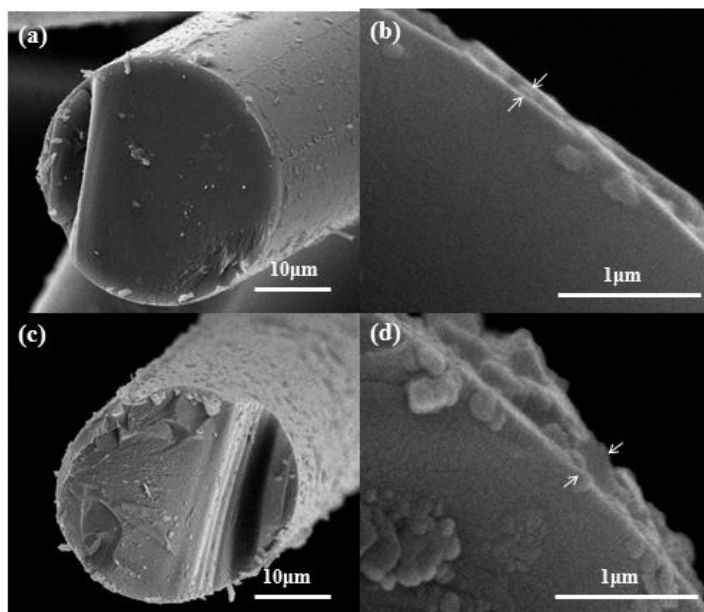
ชื่อตัวอย่าง	กำลังขยาย		
	1,000 เท่า	5,000 เท่า	80,000 เท่า
5NST			
0.01A5NST			
0.03A5NST			
0.05A5NST			



รูปที่ 3.36 ลักษณะของฟิล์มบาง 5NST และฟิล์มบาง 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโน เป็นองค์ประกอบ 0.01A5NST, 0.03A5NST, 0.05A5NST, 0.1A5NST และ 0.3A5NST ใช้เวลาในการจุ่มแช่นาน 15 นาที เสาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

3.2.1.4 การวิเคราะห์ความหนา

การวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มบาง 5NST และฟิล์มบาง 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตร 0.01A5NST ด้วยภาพตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์มสูตร 0.01A5NST มีความหนาประมาณ 300-500 นาโนเมตร โดยชั้นฟิล์ม 5NST ก่อนที่จะมีอนุภาคซิลเวอร์มาเกาะบนผิวฟิล์มมีความหนาประมาณ 200-250 นาโนเมตร และเมื่อมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาเกาะบนผิวฟิล์มดังกล่าวทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.37



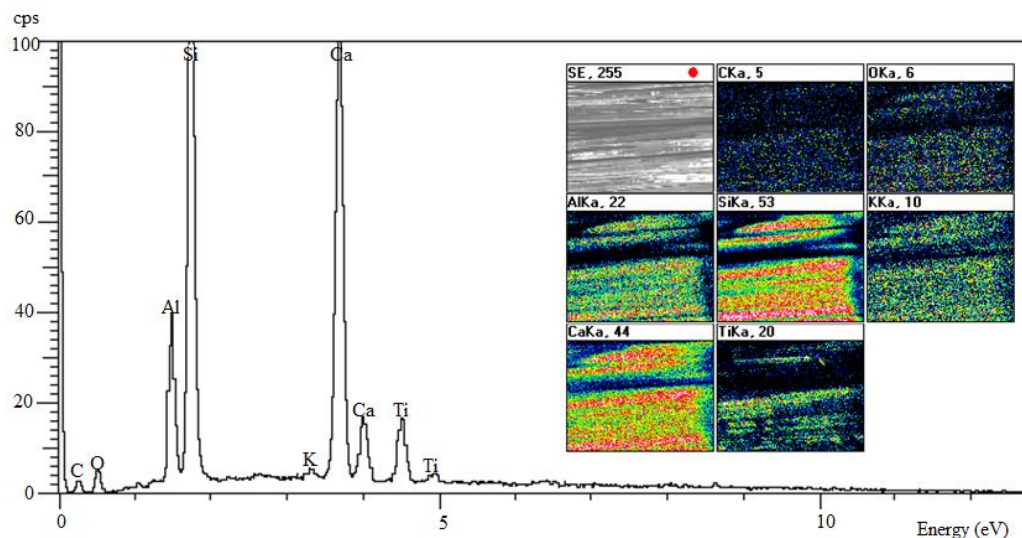
รูปที่ 3.37 ภาพตัดขวางของเส้นใยแก้ว 5NST เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (a) ภาพตัดขวางของเส้นใยแก้ว 5NST, (b) ความหนาของชั้นเคลือบ 5NST, (c) ภาพตัดขวางของเส้นใยแก้ว 0.01A5NST และ (d) ความหนาของชั้นเคลือบ 0.01A5NST

3.2.1.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ

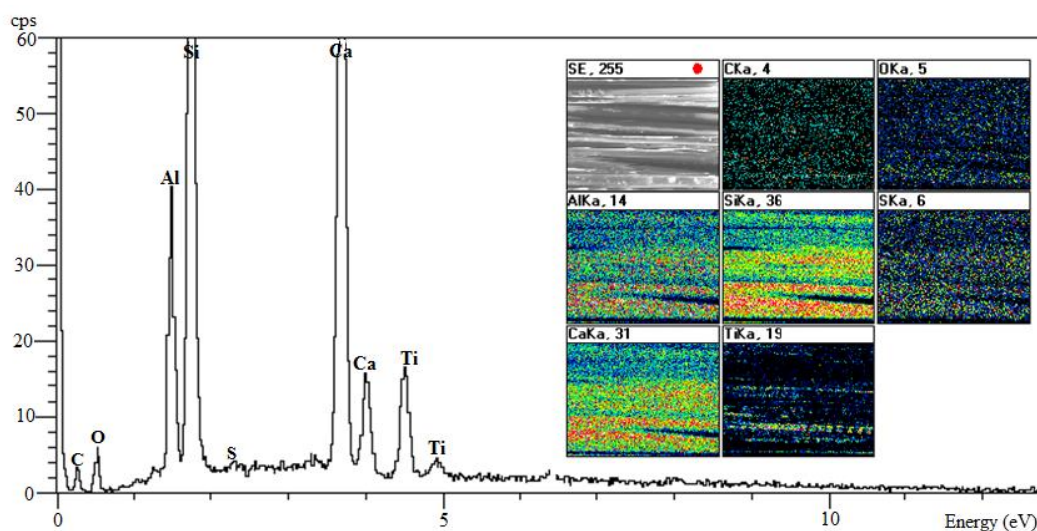
การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบนฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ด้วยเทคนิค EDX และ X-ray mapping เพื่อศึกษาองค์ประกอบธาตุ และการกระจายตัวของธาตุต่างๆบนฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST เคลือบบนเส้นใยแก้วจากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์ม PT มีการกระจายตัวของธาตุ Ti และ O อย่างสม่ำเสมอบนเส้นใยแก้ว และมีพิคของวัสดุฐานที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว Si, C, O, Al, K, และ Ca เป็นองค์ประกอบ ดังรูปที่ 3.38 ฟิล์ม 5NST มีการกระจายตัวของธาตุ Ti, O และ S กระจายทั่วชิ้นงาน แต่ไม่พบพิคของ N ที่เป็นสารเจือรวมบนเส้นใยแก้ว เนื่องจากสารเจือที่เดิมมีปริมาณต่ำและถูกบดบังจากพิคของวัสดุฐานที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว Si, C, O, Al, K, และ Ca ดังรูปที่ 3.39 และฟิล์ม 0.01Ag5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบพบที่มีการกระจายตัวของธาตุ Ag, Ti, O และ S อย่างสม่ำเสมอเช่นกัน และพบพิคของวัสดุฐานที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว Si, C, O, Al, K, และ Ca ดังแสดงในรูปที่ 3.40

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบจุด (Point Scan) บนฟิล์ม 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยายสูงเพื่อยืนยันว่าอนุภาคบนฟิล์มนั้นเป็น

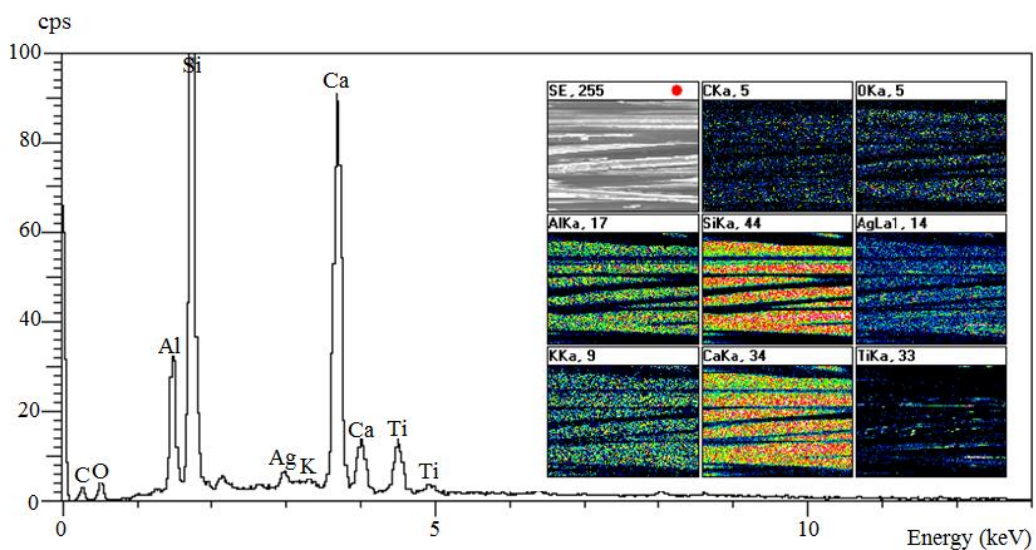
อนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยทำการวิเคราะห์ 3 จุดบนฟิล์ม ดังแสดงรูปที่ 3.41 จะเห็นว่าบริเวณพื้นที่สีขาวจะปรากฏพีคของซิลเวอร์สูงมากโดยเฉพาะในบริเวณที่พื้นที่สีขาวที่มีขนาดใหญ่ และบริเวณพื้นที่สีขาวขนาดเล็กก็ยังคงปรากฏพีคของซิลเวอร์อย่างชัดเจนเช่นกัน จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบจุดนี้ สามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคสีขาวบนฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปรากฏบนฟิล์มนั้นคืออนุภาคซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้



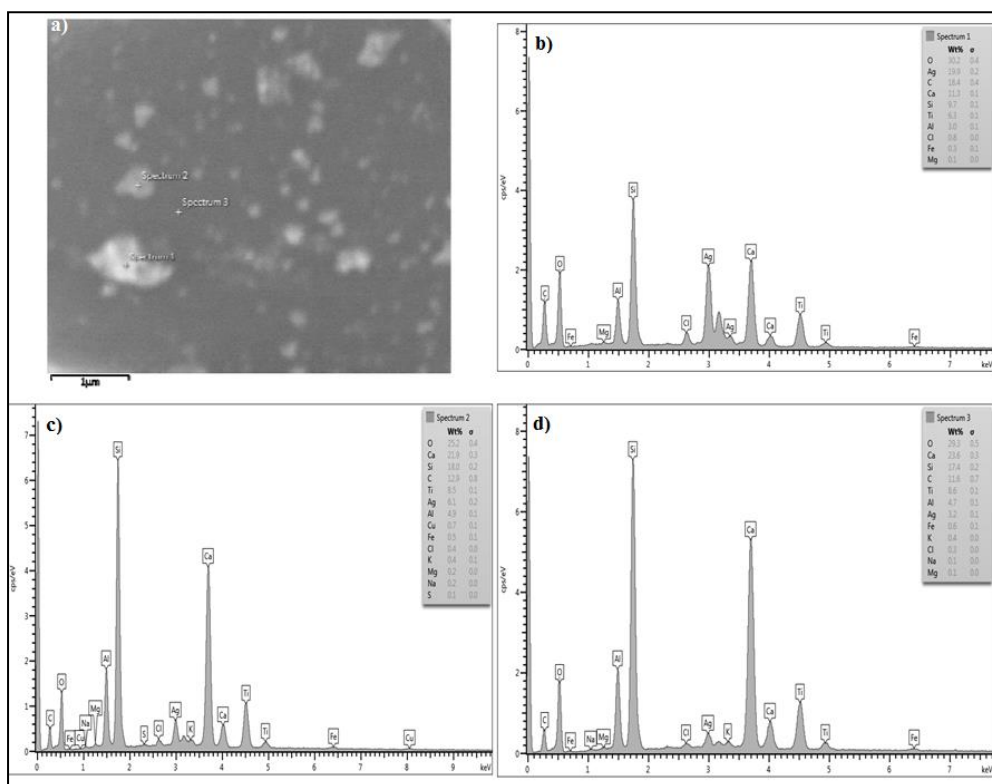
รูปที่ 3.38 EXD Spectra และ X-ray Mapping ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง PT
เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.39 EXD Spectra และ X-ray Mapping ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง 5NST
เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



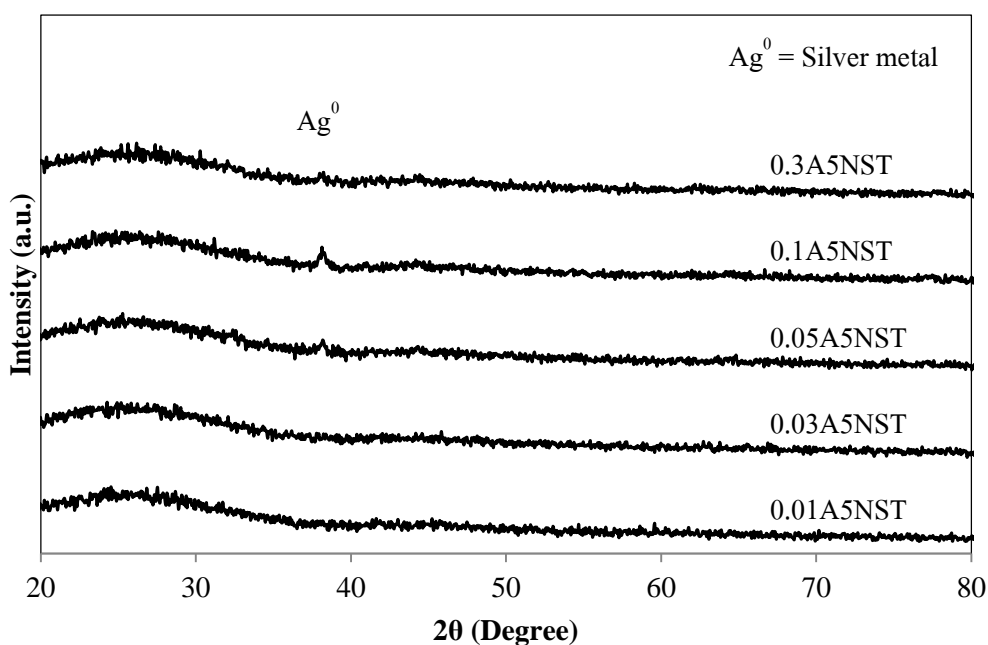
รูปที่ 3.40 EDX Spectra และ X-ray Mapping ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.41 EDX spectra ของ 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส a) EDX point scanning b) EDX spectrum point 1, c) EDX spectrum point 2 และ d) EDX spectrum point 3

3.2.2 ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD

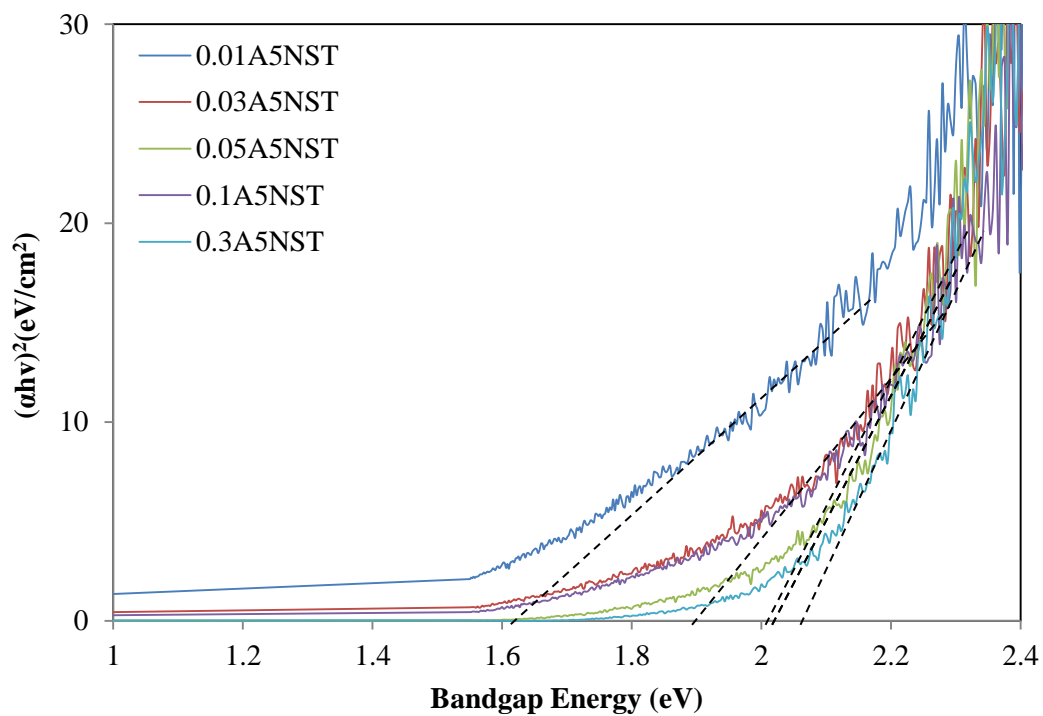
การวิเคราะห์เฟสเพื่อศึกษาขนาดผลึก ชนิดของเฟส และปริมาณเฟส ของตัวอย่างที่มีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบ ที่เตรียมโดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร 5NST เเผที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มาจุ่มแช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 และ 0.3 โมลาร์ ตามลำดับ แทนด้วยสัญลักษณ์ (0.01A5NST, 0.03A5NST, 0.05A5NST, 0.1A5NST และ 0.3A5NST) โมลาร์ นาน 15 นาที เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบพีคของซิลเวอร์ที่อยู่ในรูปของโลหะ (Ag^0) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.1° (JCPDS file 893722) โดยจะปรากฏพีคของซิลเวอร์อย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.05 โมลาร์ ส่วนที่ความเข้มข้นต่ำๆจะแสดงลักษณะเป็นเฟสอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.42 ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นี้ทำให้ทราบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้เป็นฟิล์มที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ข้างต้นที่แสดงองค์ประกอบของธาตุซิลเวอร์นั่นเอง



รูปที่ 3.42 XRD patterns ของฟิล์ม 5NST ที่มีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบที่ความเข้มข้นต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

3.2.3 การวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานด้วยเทคนิค UV-Vis DRS

การวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตร 0.01A5NST, 0.03A5NST, 0.05A5NST, 0.1A5NST และ 0.3A5NST เหนืออุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานของผงตัวอย่างในการทดสอบใช้ BaSO_4 เป็นวัสดุอ้างอิงค่าแถบช่องว่างพลังงานของผงสูตรต่างๆที่สังเคราะห์ได้ โดยลากเส้นความชันสัมผัสกับเส้นโค้งของสเปกตรัมที่ได้แล้วนำไปคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน โดยใช้สมการของ Plank จากผลการวิเคราะห์พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบ เหนืออุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 510-760 นาโนเมตร โดย 0.01A5NST มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.62 อิเล็กตรอนโวลต์ 0.03A5NST มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.91 อิเล็กตรอนโวลต์ 0.05A5NST มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.05 อิเล็กตรอนโวลต์ 0.1A5NST มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.10 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 0.3A5NST มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.13 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยแถบช่องว่างพลังงานกว้างขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.43 และค่าแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 3.15 การมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบทำให้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (5NST) มีแถบช่องว่างพลังงานที่แคบลงจากเดิม คือจากเดิมผง 5NST มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.15 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสามารถลดค่าแถบช่องว่างพลังงานได้สูงสุดที่ 1.62 อิเล็กตรอนโวลต์จากตัวอย่าง 0.01A5NST ซึ่งการมีแถบช่องว่างพลังงานที่แคบลงนี้ส่งผลให้สามารถลดระยะระหว่างชั้นวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ลง ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดได้เร็ว และลดการรวมตัวกับของหลุมอิเล็กตรอนจึงทำให้มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดี



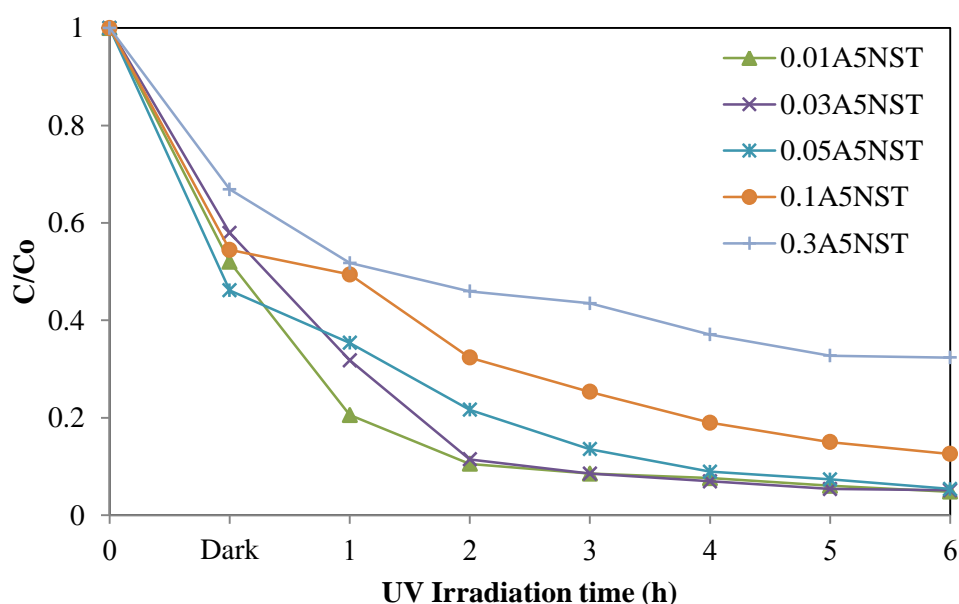
รูปที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และแถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.15 แถบช่องว่างพลังงานของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตรต่างๆ เมื่อเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

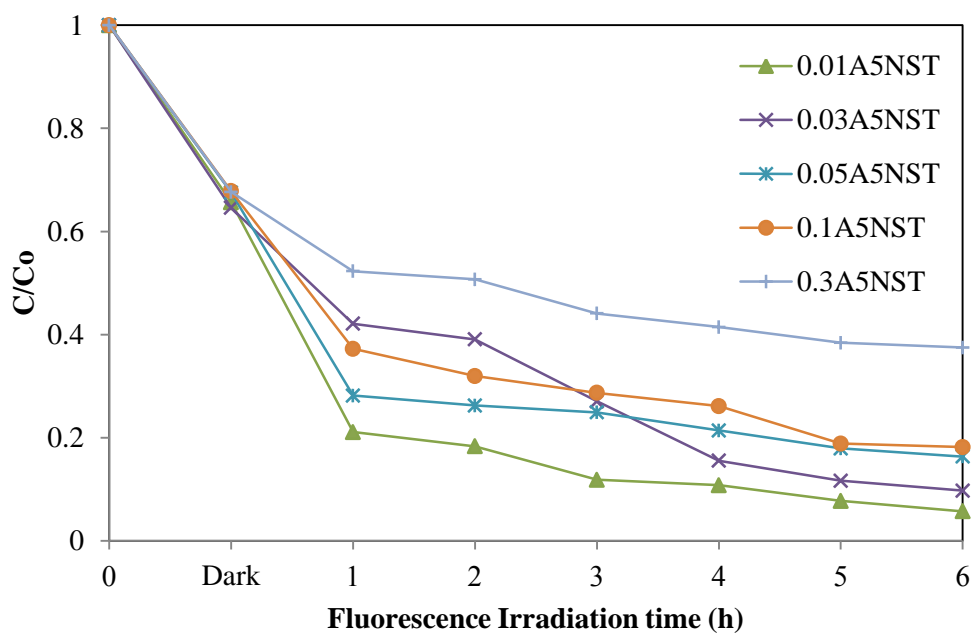
ชื่อตัวอย่าง	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
0.01A5NST	1.62
0.03A5NST	1.91
0.05A5NST	2.05
0.1A5NST	2.10
0.3A5NST	2.13

3.2.4 การทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ

ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตร 0.01AgT5NS, 0.03AgT5NS, 0.05AgT5NS, 0.1AgT5NS และ 0.3AgT5NS เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบเช่นเดียวกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ข้างต้น โดยศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูภายในเวลา 6 ชั่วโมงของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ จากการทดสอบภายใต้การรับแสงยูวีพบว่าฟิล์มสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้สูงสุด 95.18 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST และภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ฟิล์มสูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้สูงสุด 94.28 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทมากขึ้น ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเพิ่มสูงขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคซิลเวอร์ที่เกาะบนฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นดังผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM จึงทำให้พื้นที่ผิวลดลงการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงด้วย และให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานด้วยเทคนิค UV-Vis DRS แสดงให้เห็นว่าการลดลงของแถบช่องว่างพลังงานทำให้มีปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.44 และ 3.45 โดยแสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่เวลา 6 ชั่วโมงของการรับแสงดังตารางที่ 3.16



รูปที่ 3.44 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์



รูปที่ 3.45 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตารางที่ 3.16 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมงของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ 6 ชั่วโมง (%)	
	แสงยูวี	แสงฟลูออเรสเซนซ์
0.01A5NST	95.18	94.28
0.03A5NST	94.91	90.29
0.05A5NST	94.65	83.67
0.1A5NST	87.43	81.83
0.3A5NST	67.67	62.52

จากตารางที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีทั้งสองสภาวะแสง โดยสูตรที่ดีที่สุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและใกล้เคียงกันทั้งสองสภาวะแสงคือสูตร 0.01A5NST ผู้วิจัยจึงเลือกฟิล์มดังกล่าวไปศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมี เช่น BPA, 2,4-DCP และประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ต่อไป

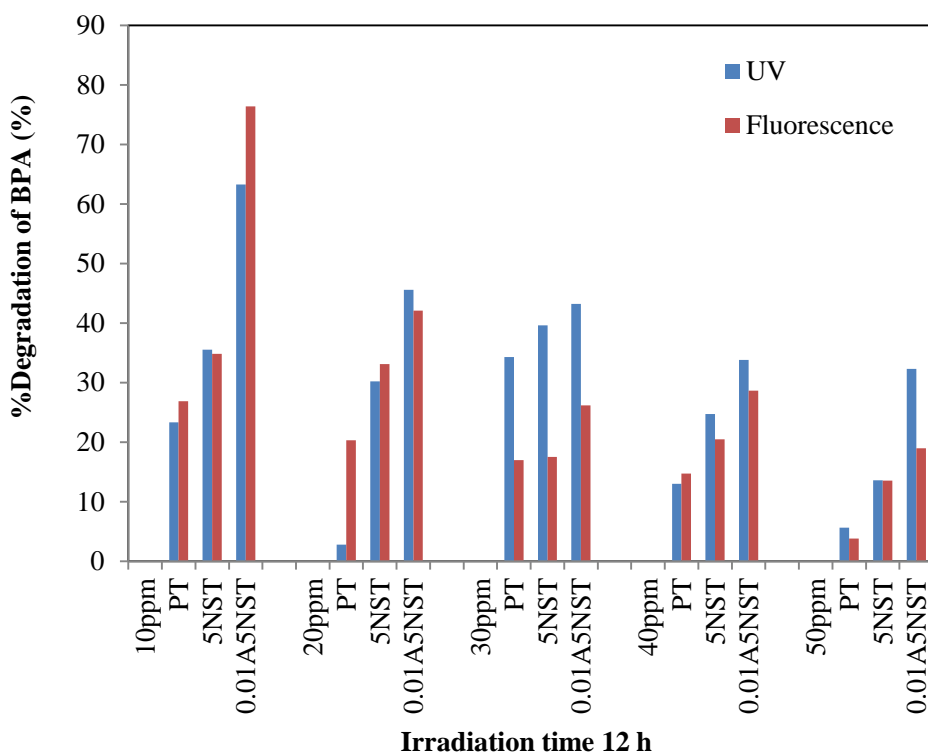
3.3 อิทธิพลร่วมระหว่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนร่วมกับซิลเฟอร์ และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

หัวข้อต่อไปนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลาย BPA และ 2,4-DCP ภายใต้การรับแสงแสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้การรับแสงแสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาดังนี้

3.3.1 ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย BPA

โดยการทดสอบการย่อยสลาย BPA ที่ความเข้มข้นต่างๆคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ภายใต้สภาวะแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ ระยะเวลาในการรับแสงนาน 12 ชั่วโมง

จากการทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย BPA ของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ทดสอบภายใต้การรับแสงแสงยูวี 50 วัตต์ พบว่าที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของสารละลาย BPA สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 60.24 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01Ag5NST ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 45.60 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 63.24 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 33.83 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST และที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 32.31 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST และภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 76.42 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 41.12 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 26.20 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 28.63 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST และที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลาย BPA ได้ 18.96 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ดังรูปที่ 3.46 ซึ่งจากผลการทดสอบการย่อยสลายนี้แสดงให้เห็นว่าการมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสาร BPA ได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่มีอนุภาคซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ (5NST) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือ (PT) ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของแต่ละความเข้มข้นทั้งสองสภาวะแสงแสดงดังตารางที่ 3.17



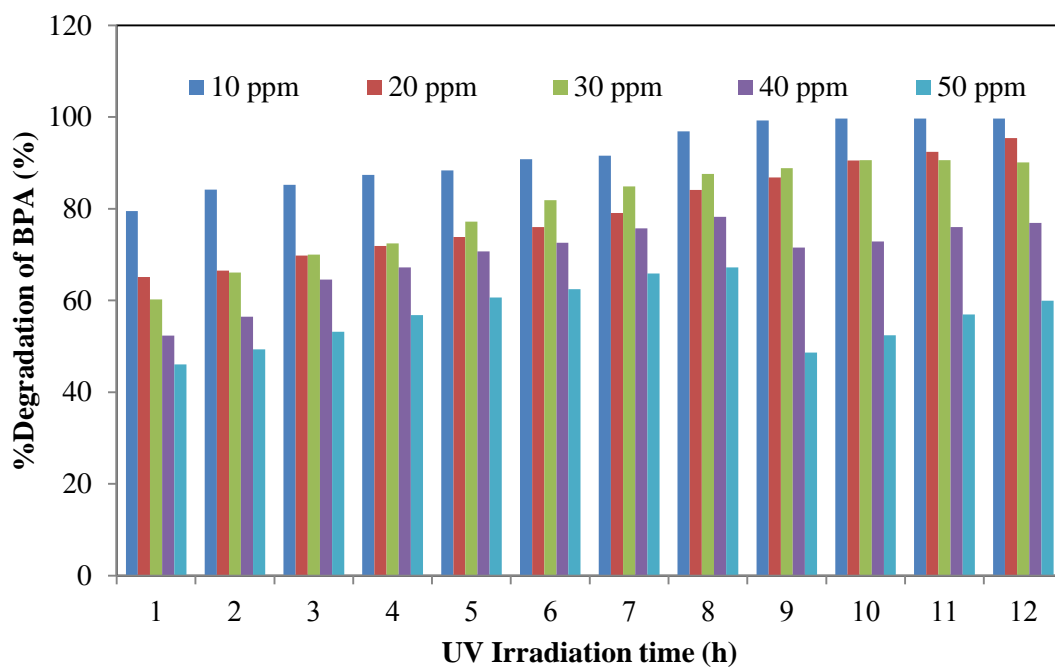
รูปที่ 3.46 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ที่ความเข้มข้นต่างๆของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตารางที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์มPT, 5NST และ 0.01A5NST ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลารับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 12 ชั่วโมง

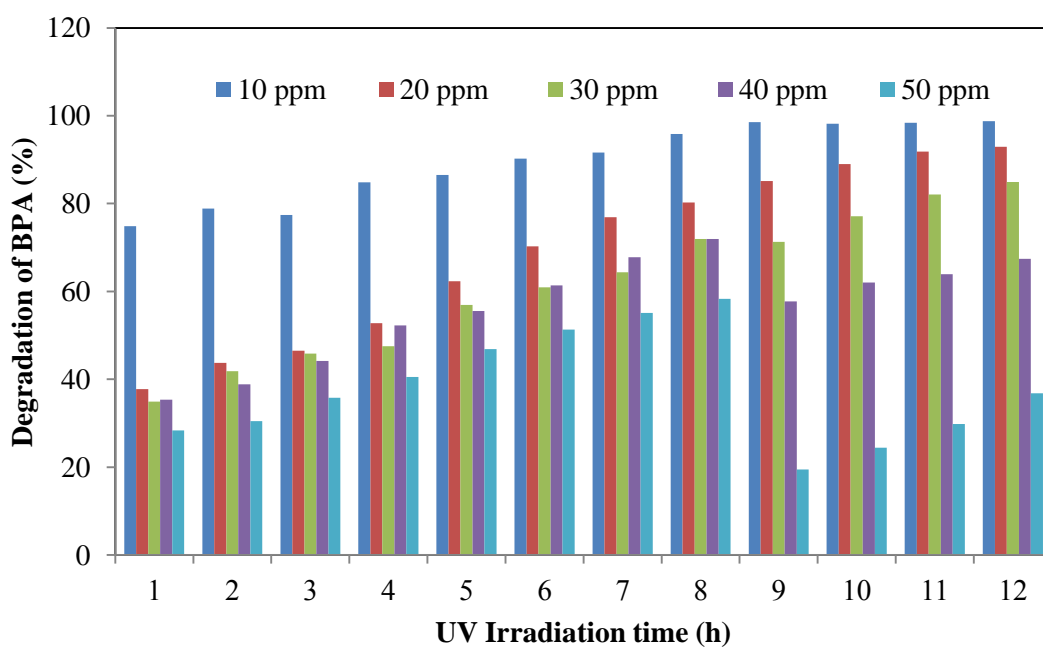
ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้น BPA (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ที่ 12 ชั่วโมง(%)	
		ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
PT	10	23.32	26.91
5NST	10	35.53	34.86
0.01A5NST	10	63.27	76.42
PT	20	2.82	20.35
5NST	20	30.18	33.13
0.01A5NST	20	45.62	41.12
PT	30	34.28	15.98
5NST	30	39.60	17.52
0.01A5NST	30	43.24	26.20

PT	40	13.03	14.71
5NST	40	24.73	20.48
0.01A5NST	40	33.83	28.63
PT	50	5.67	3.84
5NST	50	13.59	13.57
0.01A5NST	50	32.30	18.96

จากตารางที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย BPA ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าความเข้มข้นที่สามารถย่อยสลายได้ดีที่สุดคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถย่อยสลายได้ 63.27 และ 76.24 เปอร์เซ็นต์ภายใต้แสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพในการย่อยสลายยังไม่สูงพอจึงเลือกฟิล์มสูตรที่ดีที่สุดคือ 0.01A5NST นำมาศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มความเข้มแสงจาก 50 วัตต์ เป็น 110 วัตต์ โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์ พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยสามารถย่อยสลายสารละลาย BPA ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ ได้สูงถึง 99.69 และ 98.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.47-3.48 ซึ่งที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นเป็นค่าความเข้มข้นที่มากกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มถึง 1,000 เท่า และที่ความเข้มข้นอื่นๆ ก็สามารถย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นจากเดิมเช่นกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย BPA เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการย่อยสลายก็ลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 3.18



รูปที่ 3.47 เปอร์เซนต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST
ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์



รูปที่ 3.48 เปอร์เซนต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST
ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนต์ 110 วัตต์

ตารางที่ 3.18 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์

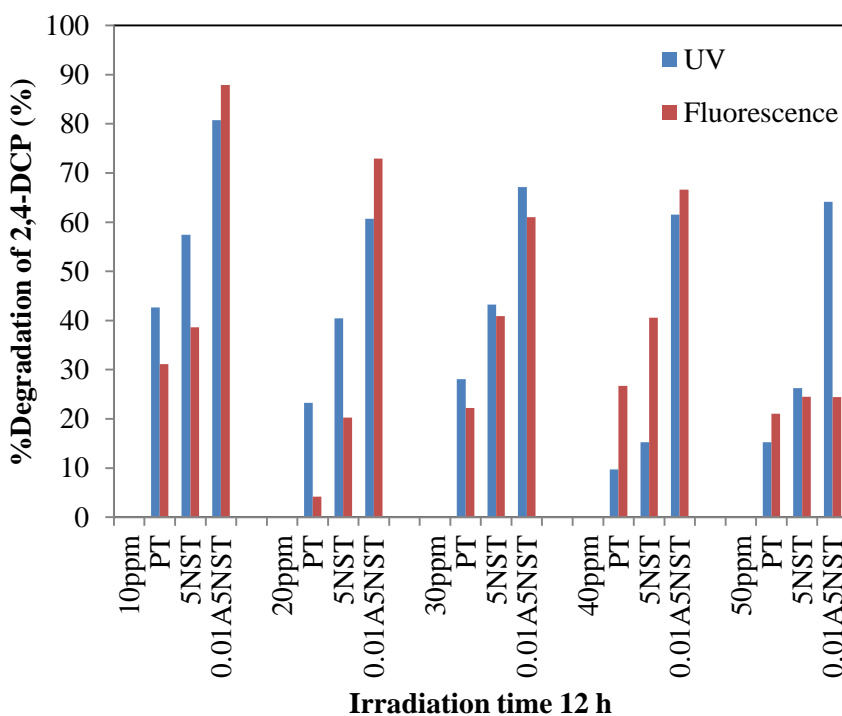
ความเข้มข้นของ BPA (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ที่ 12 ชั่วโมง (%)	
	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
10	99.69	98.79
20	95.39	92.95
30	90.12	84.89
40	76.88	67.41
50	59.92	36.79

3.3.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย

2,4-DCP

การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ ระยะเวลาในการรับแสงนาน 12 ชั่วโมง จากการทดสอบภายใต้การรับแสงยูวีพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 2,4-DCP เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 80.74 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 60.67 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 61.12 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 61.54 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST และที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 64.15 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST และภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 87.91 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 72.93 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 61.03 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 66.60 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ดังรูปที่ 3.49 และที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สูตรที่ดีที่สุดสามารถย่อยสลายได้ 24.40 เปอร์เซ็นต์ คือสูตร 0.01A5NST ซึ่งจากผลการทดสอบการย่อยสลายนี้แสดงให้เห็นว่าการมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสาร 2,4-DCP ได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่มีอนุภาคซิลเวอร์

เป็นองค์ประกอบ (5NST) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือ (PT) ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของแต่ละความเข้มข้นทั้งสองสถานะแสงแสดงดังตารางที่ 3.19



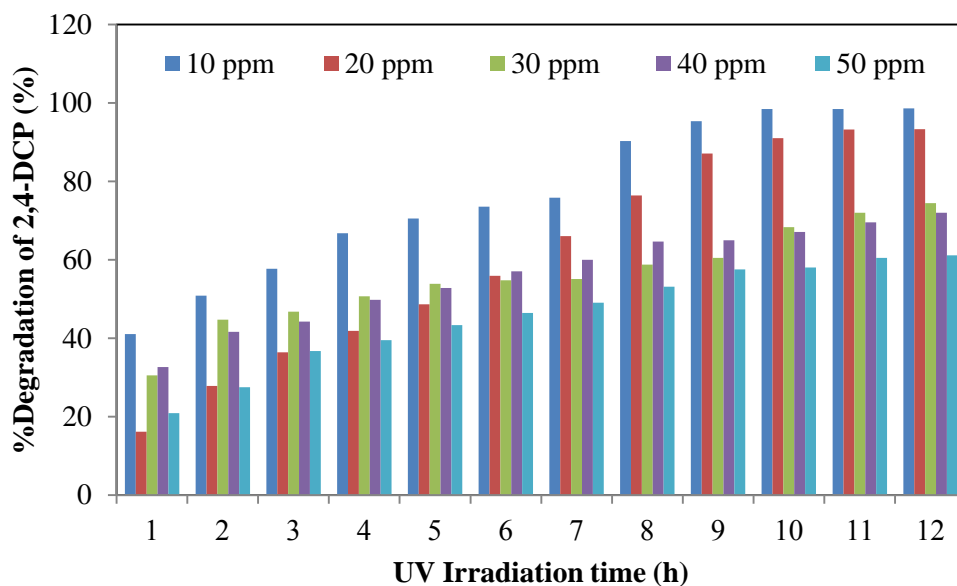
รูปที่ 3.49 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ที่ความเข้มข้นต่างๆของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตารางที่ 3.19 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4- DCP ของฟิล์มสูตรต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

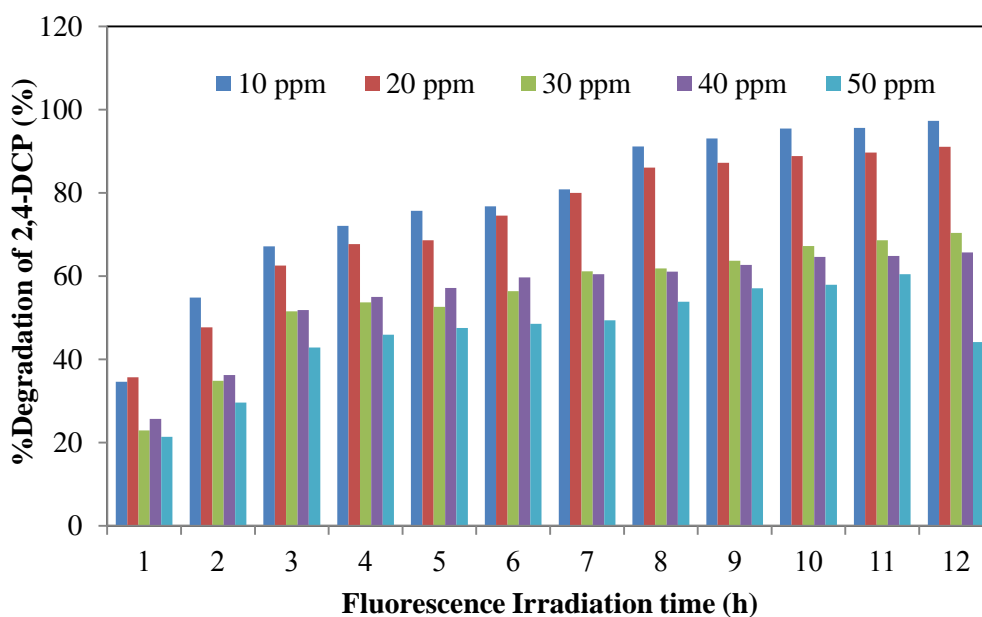
ชนิดของฟิล์ม	ความเข้มข้น 2,4- DCP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4- DCP ที่ 12 ชั่วโมง(%)	
		ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
PT	10	42.67	31.12
5NST	10	48.38	40.77
0.01A5NST	10	80.74	87.91
PT	20	23.25	4.19
5NST	20	40.46	20.28
0.01A5NST	20	60.67	72.93

PT	30	28.06	22.23
5NST	30	43.27	40.88
0.01A5NST	30	61.12	61.03
PT	40	9.69	26.72
5NST	40	15.22	40.60
0.01A5NST	40	61.54	66.60
PT	50	15.25	21.04
5NST	50	26.25	24.40
0.01A5NST	50	64.15	24.40

จากตารางที่ 3.19 พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลาย 2,4- DCP ในทุกๆความเข้มข้นของสารละลาย 2,4-DCP ภายใต้การรับแสงทั้งสองสภาวะแสง เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ที่มีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบสูตร 0.01AT5NS สามารถย่อยสลายสารละลายดังกล่าวได้ดีที่สุด แต่ยังไม่สามารถย่อยสลายได้สูงพอจึงเลือกสูตรที่ดีที่สุดคือ 0.01AT5NS นำมาศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายให้สูงยิ่งขึ้นโดยการเพิ่มความเข้มแสงจาก 50 วัตต์ เป็น 110 วัตต์ และนำเส้นใยแก้วสูตร 0.01A5NST มาทดสอบที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์ พบว่าภายใต้การรับแสงยูวีที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่สามารถย่อยสลายได้สูงที่สุด 99.27 เปอร์เซ็นต์ และภายใต้การรับแสงยูวี และ 98.53 เปอร์เซ็นต์ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นพบว่าความสามารถในการย่อยสลายก็ลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 3.50 และ 3.51 และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายดังแสดงในตารางที่ 3.20



รูปที่ 3.50 เปอร์เซนต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์



รูปที่ 3.51 เปอร์เซนต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์ม 0.01A5NST ในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์

ตารางที่ 3.20 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4- DCP ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ความเข้มข้นต่างๆ ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์

ความเข้มข้นของ 2,4- DCP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-Dichlorophenol ที่ 12 ชั่วโมง(%)	
	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
10	98.66	97.26
20	93.35	91.03
30	74.46	70.37
40	72.03	65.67
50	61.11	44.15

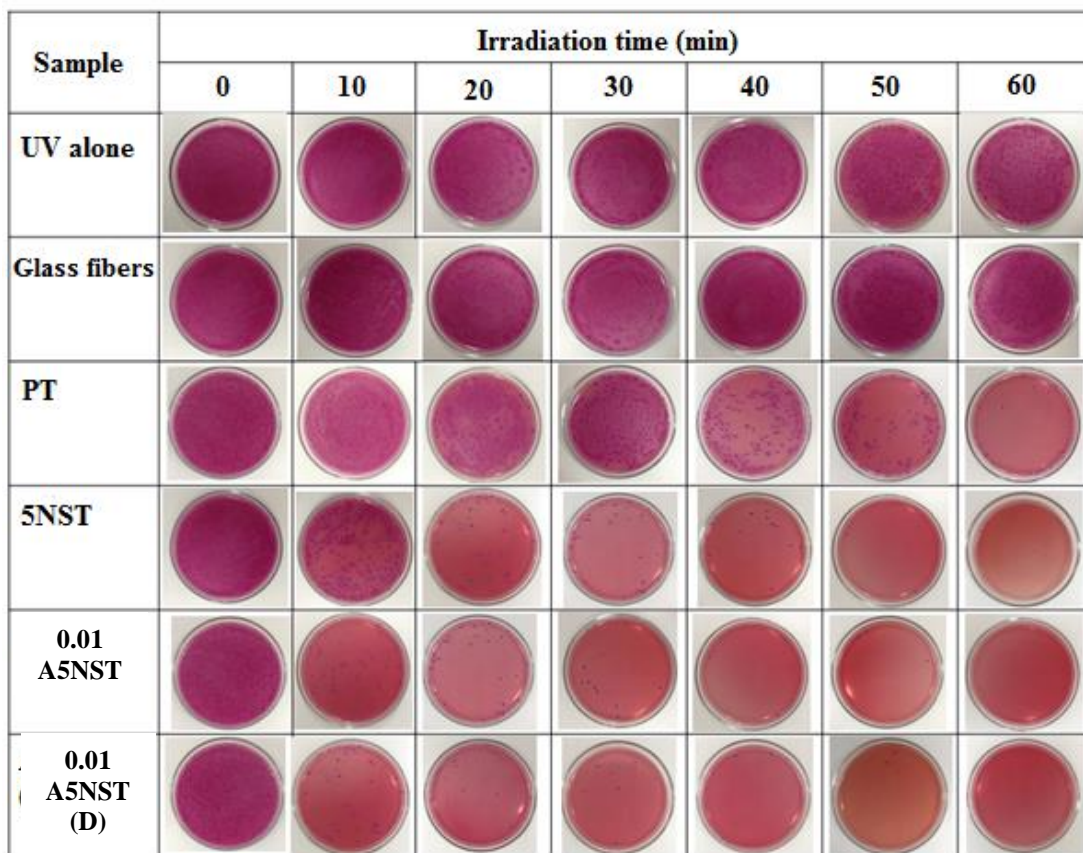
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลาย BPA และ 2,4-DCP ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการย่อยสลายคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากที่ความเข้มข้นดังกล่าวนี้ฟิล์ม 0.01A5NST จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีที่สุด ภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ และการเพิ่มความเข้มแสงจาก 50 วัตต์เป็น 110 วัตต์ สามารถช่วยให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารละลาย BPA และ 2,4-DCP มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและยากต่อการกำจัด การเพิ่มความเข้มแสงจึงช่วยเพิ่มพลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากชั้นเวเลนซ์แบนด์ไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์ได้มากขึ้น และปลดปล่อย $\text{OH}\cdot$ และ O_2^- ได้มากขึ้น ผู้วิจัยจึงนำฟิล์ม 0.01A5NST ไปศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในลำดับต่อไป

3.3.3 ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli*

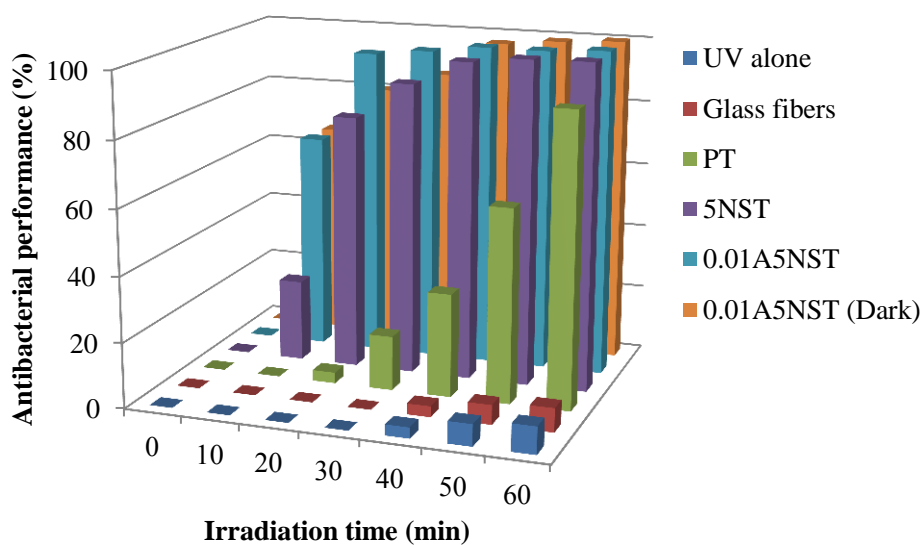
การทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์ม PT, 5NST และ 0.01A5NST เปรียบเทียบกันภายใต้การรับแสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง โดยควบคุมปริมาณเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตรต่างๆเท่ากับ 2 กรัมต่อเนื้อความเข้มข้น 10^7 โคโลนีต่อมิลลิตรในน้ำเกลือ 50 มิลลิตร ทดสอบภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ และในที่มืด โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 10 นาที นาน 1 ชั่วโมง ผลการทดสอบภายใต้การรับแสงยูวี 50 วัตต์ พบว่าฟิล์ม PT สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 89.33 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 60 นาทีของการรับแสงยูวี ฟิล์ม 5NST สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 99.83 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 60 นาทีของการรับแสงยูวี และฟิล์ม 0.01A5NST สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 60 นาทีของการรับแสงยูวี และฟิล์ม 0.01AT5NS(D) ทดสอบในที่มืดสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา

60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.52 และ 3.53 และการทดสอบภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ จากการทดสอบพบว่าฟิล์ม PT สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 58 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 60 นาทีของการรับแสงยูวี ฟิล์ม 5NST สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 97.67 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 60 นาทีของการรับแสงยูวี และฟิล์ม 0.01A5NS สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 60 นาทีของการรับแสงยูวี และฟิล์ม 0.01A5NS(D) ในที่มีคสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 60 นาที ผลดังแสดงในรูปที่ 3.54 และ 3.55 และค่าเปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ดังแสดงในตารางที่ 3.21 จากการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* ภายใต้การรับแสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และในที่มีค พบว่าฟิล์ม 0.01A5NS ให้ผลในการฆ่าเชื้อได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู และสารเคมีดังแสดงข้างต้น

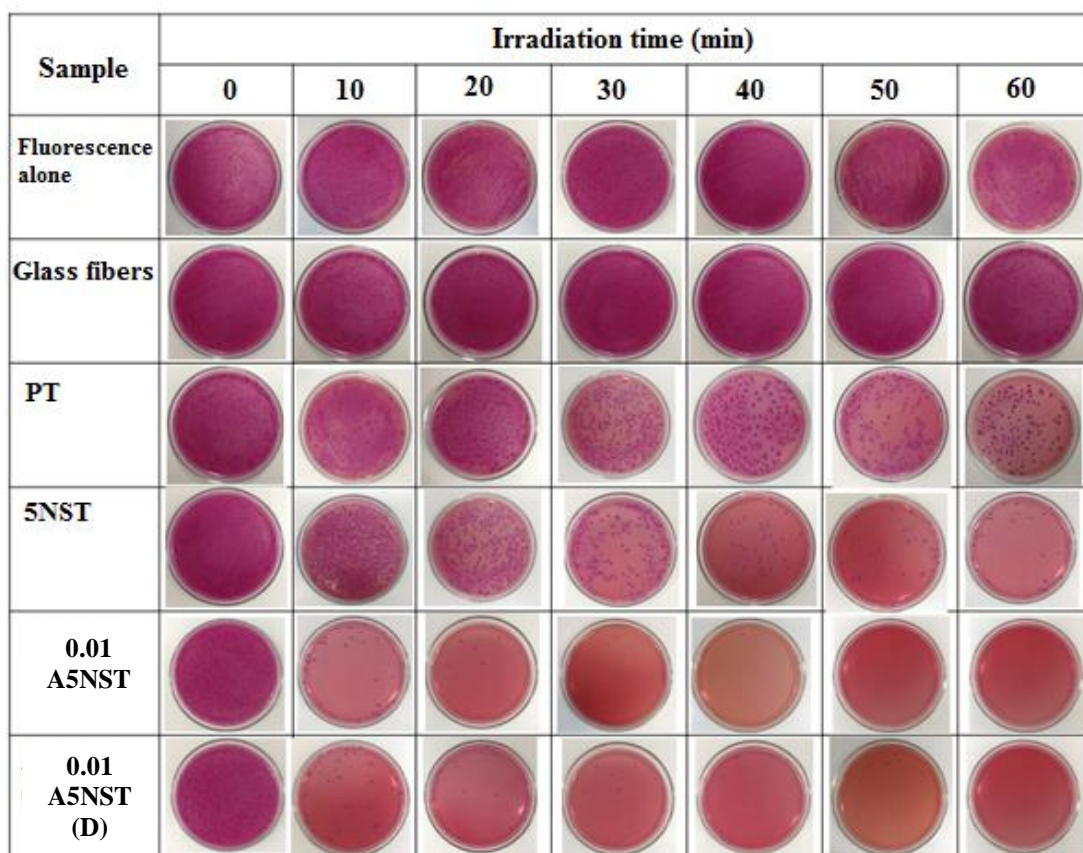
นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบโซนปลอดเชื้อ (Inhibition zone) ในที่มีคเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยแก้วที่ไม่มีเคลือบผิว (Glass fiber) เส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มต่างๆ PT, 5NST และ 0.01A5NST โดยนำเส้นใยแก้วสูตรต่างๆขนาด 5 x 20 มิลลิเมตรวางลงไปบนอาหารแข็งที่มีเชื้อเข้มข้น 10^7 โคโลนีต่อมิลลิตรกระจายตัวอยู่ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และถ่ายภาพบันทึกผลโดยการวัดขนาดความกว้างของโซนปลอดเชื้อหรือบริเวณที่ไม่มีเชื้อขึ้น 10 จุดและหาค่าเฉลี่ย จากการทดสอบพบว่าเส้นใยแก้วที่ไม่มีเคลือบผิว เส้นใยแก้วสูตร PT และ 5NST ไม่แสดงเขตปลอดเชื้อ ส่วนเส้นใยแก้วสูตร 0.01A5NST แสดงเขตปลอดเชื้อที่มีความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร ซึ่งการเกิดเขตปลอดเชื้อนี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่อยู่บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียได้ โดยอาศัยการแพร่ของโลหะซิลเวอร์ออกมารอบๆบริเวณทำให้เชื้อไม่สามารถเข้าใกล้บริเวณดังกล่าวได้จึงเกิดเป็นโซนปลอดเชื้อ ดังแสดงในรูปที่ 3.56 และเมื่อนำเชื้อ *E.coli* หลังจากถูกยับยั้งบนเส้นใยที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตรต่างๆภายใต้การฉายแสงยูวี 50 วัตต์นาน 60 นาทีไปถ่ายลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 3.57 พบว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรีย *E.coli* ที่ทดสอบด้วยเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบมีลักษณะผิวเรียบและผนังเซลล์ดี เมื่อถูกยับยั้งด้วยฟิล์ม PT เซลล์แบคทีเรียจะเหี่ยวลง เซลล์แบคทีเรียที่ถูกยับยั้งด้วยฟิล์ม 5NST พบว่าเซลล์เกิดการแตกหักและผนังเซลล์บางส่วนถูกทำลายและเซลล์เหี่ยว และเมื่อยับยั้งด้วยฟิล์ม 0.01A5NST พบว่าเซลล์เกิดการแตกหัก ผนังเซลล์ถูกทำลายและเซลล์เหี่ยวอย่างเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของเซลล์แบคทีเรียเกิดความเสียหายเกิดจากฟิล์ม 0.01A5NST เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะปลดปล่อยสารออกซิไดซ์ออกมา ได้แก่ $\text{OH}\cdot$ และ O_2^- และอิทธิพลจากซิลเวอร์นาโนบนผิวฟิล์มแทรกเข้าไปทำลายผนังเซลล์ส่งผลให้เชื้อแบคทีเรียตายในที่สุด



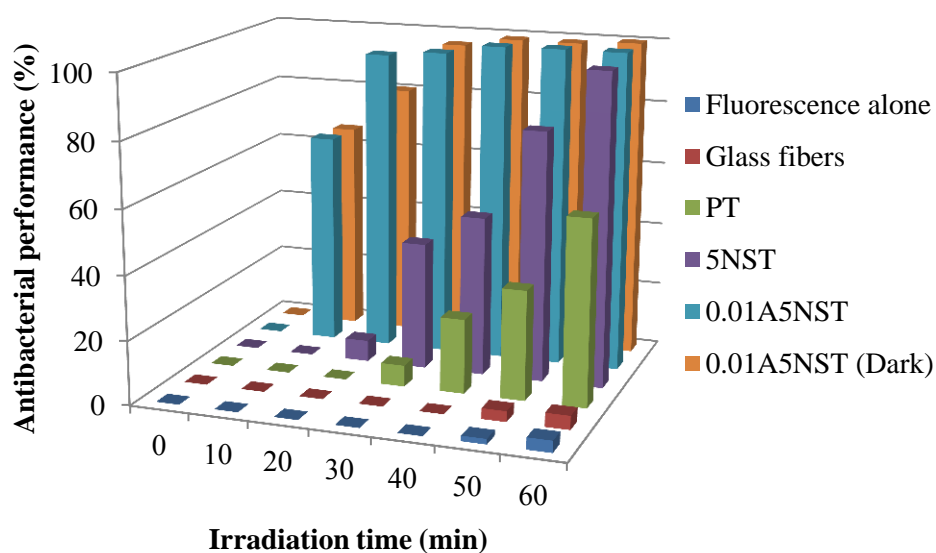
รูปที่ 3.52 ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงยูวี 50 วัตต์ นาน 60 นาที



รูปที่ 3.53 เปรี่เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆภายใต้การรับแสงยูวี 50 วัตต์ นาน 60 นาที



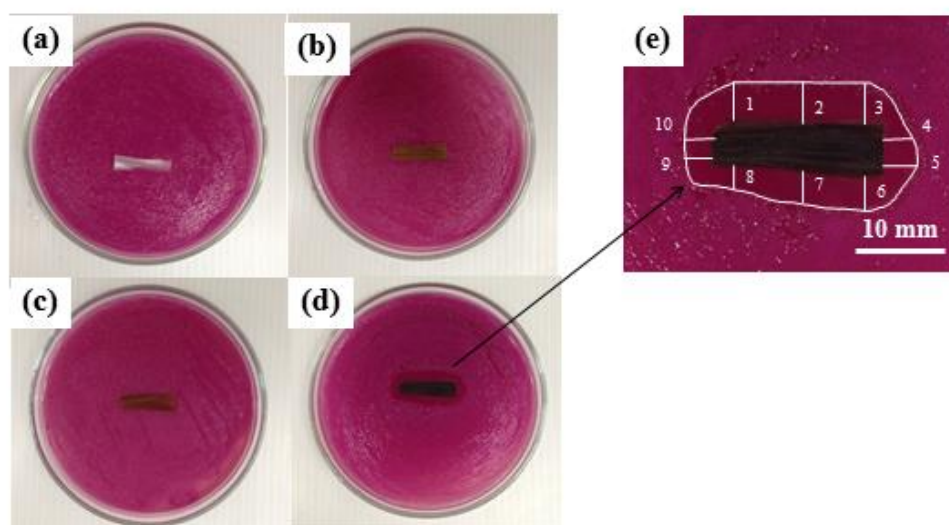
รูปที่ 3.54 ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ นาน 60 นาที



รูปที่ 3.55 เปรี่เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ นาน 60 นาที

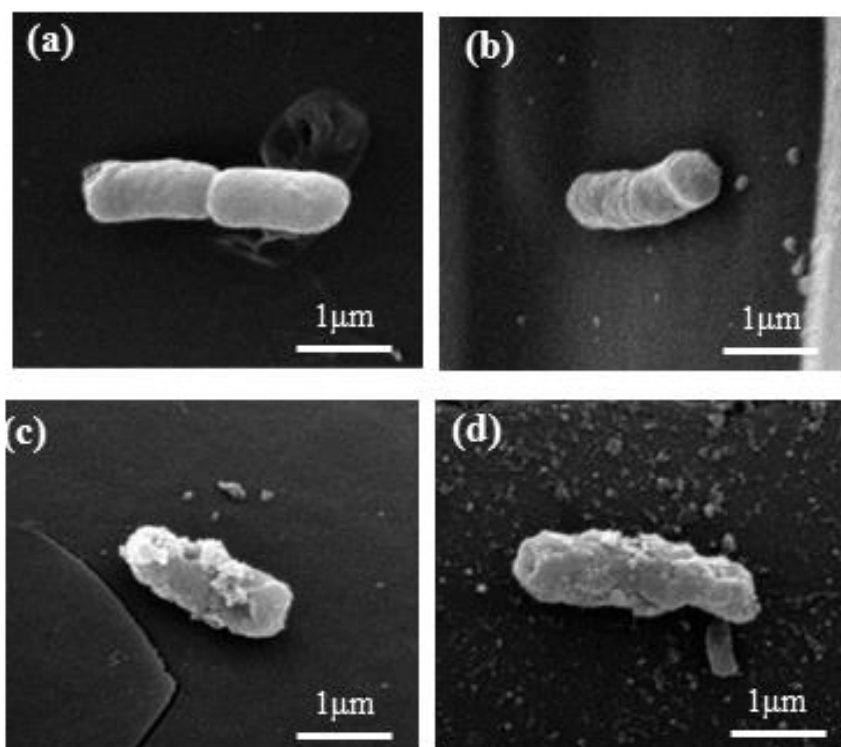
ตารางที่ 3.21 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ภายใต้การรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์ นาน 60 นาที

ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 CFU/ml ภายใต้การรับแสงนาน 60 นาที	
	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
แสงยูวี (UV alone)	8.33	3.67
เส้นใยแก้ว (Glass fibers)	7.33	4.33
PT	89.33	58.00
5NST	99.67	97.67
0.01A5NST	100	100
0.01A5NST (D)	100	100



รูปที่ 3.56 ภาพถ่ายแสดงโซนปลอดเชื้อของฟิล์มสูตรต่างๆ

(a) เส้นใยแก้ว (b) PT (c) 5NST (d) 0.01A5NST และ (e) ภาพขยายของ 0.01A5NST



รูปที่ 3.57 ภาพถ่าย SEM ของเชื้อ *E.coli*. เมื่อถูกยับยั้งการเจริญเติบโตด้วย

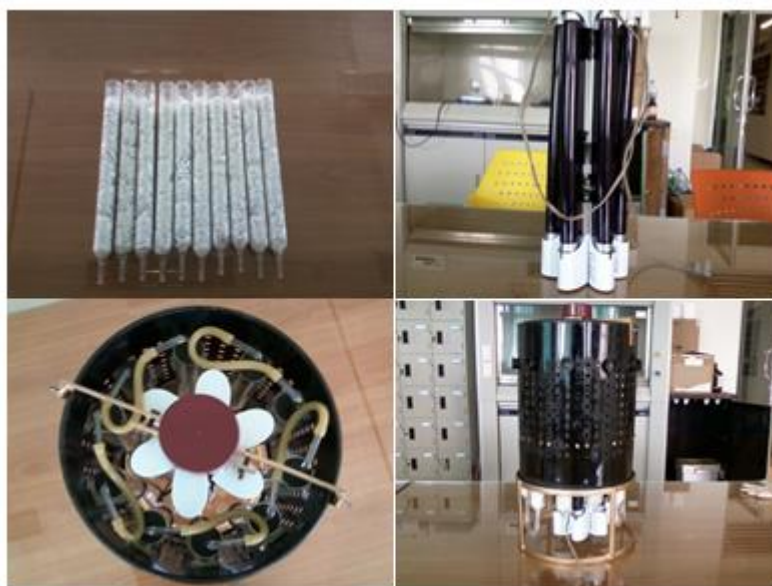
(a) เชื้อควบคุมก่อนการยับยั้ง (b) ยับยั้งด้วย PT (c) ยับยั้งด้วย 5NST และ (d) ยับยั้งด้วย 0.01A5NST ภายใต้การฉายแสงยูวี 60 นาที

3.4 การประยุกต์ใช้งาน ด้วยเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ

เครื่องกรองน้ำที่ออกแบบได้พัฒนาจากเครื่องกรองน้ำของนายพีรวัส คงสง โดยเริ่มต้นจากการศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ด้วยฟิล์ม 0.01A5NST โดยศึกษาปริมาณเส้นใยแก้วที่เหมาะสมในการบรรจุลงในท่ออะคลิกที่ใช้ในเครื่องกรองน้ำ ทำการแปรค่าปริมาณเส้นใยที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมตามลำดับ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^5 CFU/ml ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และในสถานะไม่มีแสง ผ่านเครื่องกรองน้ำด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้ความเข้มแสง 60 วัตต์ และศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารเคมี BPA และ 2,4-DCP ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ ผ่านเครื่องกรองน้ำด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้ความเข้มแสง 60 วัตต์ โดยศึกษาดังหัวข้อต่อไปนี้

3.4.1 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli*

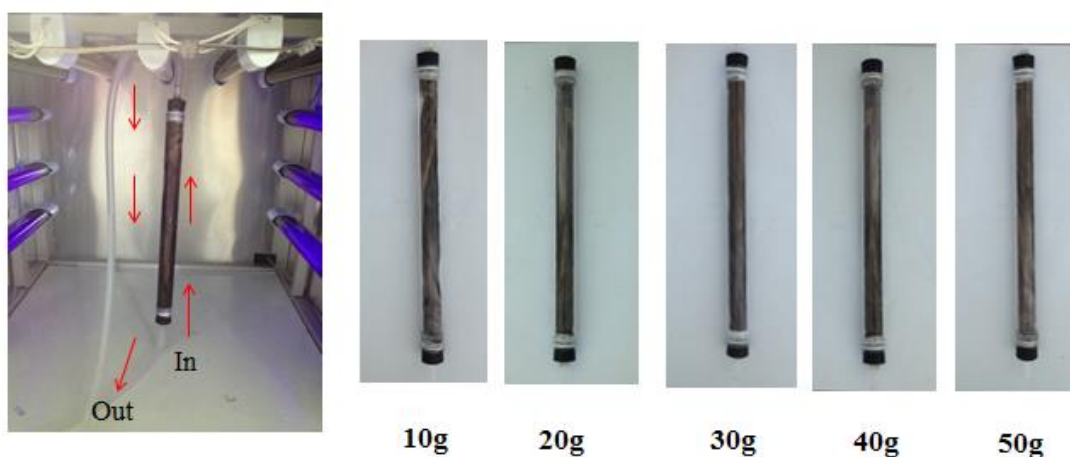
การออกแบบเครื่องกรองน้ำ ออกแบบโดยพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติมจากเครื่องกรองน้ำของนายพิรวัส คงสง รูปที่ 3.58 นำมาปรับปรุงพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้บรรจุเส้นใยแก้วจากเดิมเป็นหลอดแก้วที่มีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งหลอดแก้วเดิมมีการบดบังแสง จึงปรับเปลี่ยนจากหลอดแก้วมาเป็นท่ออะคริลิกใส ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.3 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตรมีปริมาตรเท่ากับ 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเพิ่มจำนวนหลอดบรรจุเส้นใยแก้วให้มากขึ้นจากเดิมมี 10 หลอดเพิ่มเป็น 20 หลอด โดยทำการบรรจุเส้นใยแก้ว 50 กรัมต่อ 1 หลอด ในระบบทำการไหลดใยแก้วทั้งหมด 20 หลอดรวมใช้เส้นใยแก้วทั้งหมดเท่ากับ 1,000 กรัม ซึ่งมากกว่าระบบเดิมที่ไหลดใยแก้ว 90 กรัมต่อ 1 หลอด มีน้ำหนักไหลดรวมเท่ากับ 900 กรัม ซึ่งจากเดิมเครื่องกรองดังกล่าวสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตรได้ 99.99 เปอร์เซ็นต์ในการทดสอบ 5 รอบที่อัตราการไหล 22.3 และ 54.16 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี 60 วัตต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งหวังให้เครื่องกรองน้ำที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิมและสามารถย่อยสลายสารเคมีและฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้สูงกว่าระบบเดิม



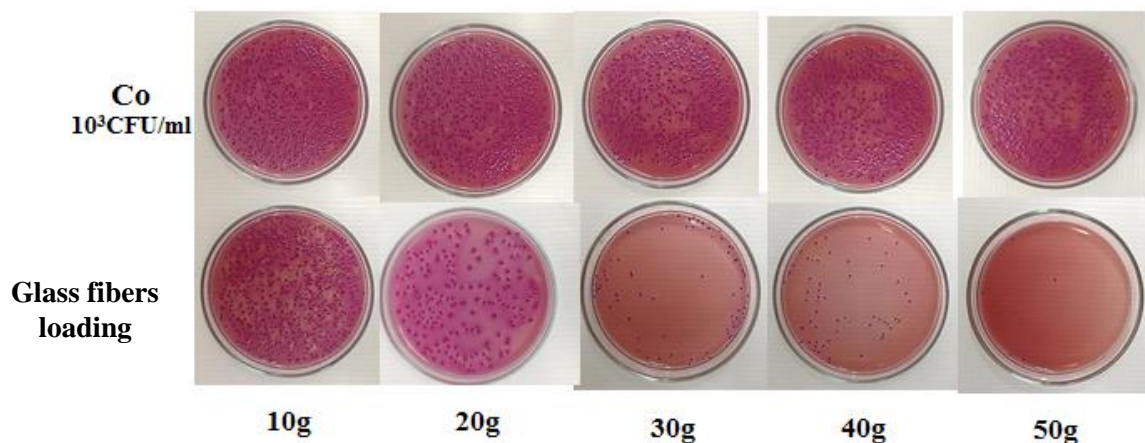
รูปที่ 3.58 เครื่องกรองน้ำของนายพิรวัส คงสง

3.4.1.1 การศึกษาหาปริมาณเส้นใยแก้วที่เหมาะสม

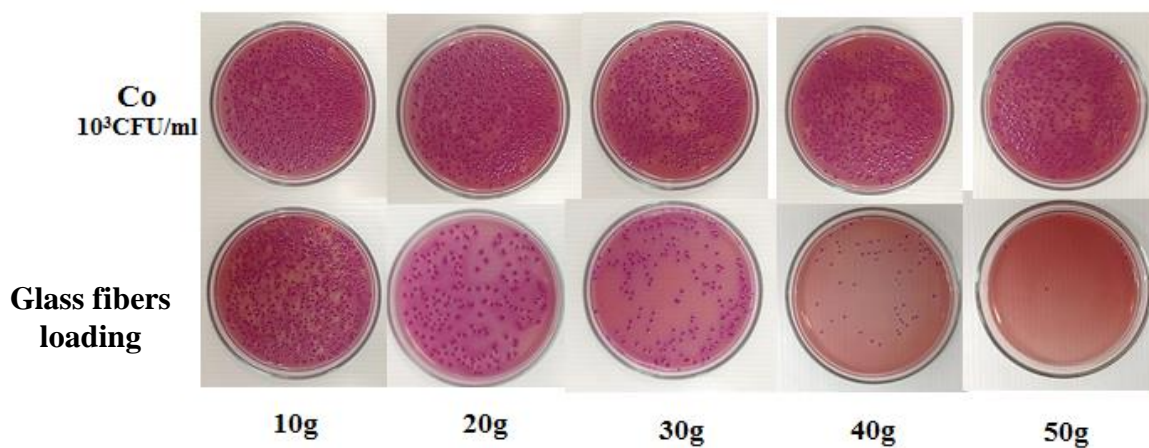
การศึกษาหาปริมาณเส้นใยแก้วที่เหมาะสมต่อการบรรจุ 1 หลอดทดลอง โดยทำการแปรค่าปริมาณเส้นใยแก้วที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอดอะคิลิกปริมาตร 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยให้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์ มีวิธีการทดสอบดังรูปที่ 3.59 จากการทดสอบพบว่าที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 50 กรัมต่อหลอด สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร (ความเข้มข้นที่นายพิรวัส คงสง ใช้ในการทดสอบ) ได้ 98.0 เปอร์เซ็นต์ภายในการไหลผ่าน 1 หลอดทดลองเท่านั้นซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบเดิม และรองลงมาคือที่ปริมาณเส้นใยแก้วบรรจุต่อ 1 หลอดเท่ากับ 40, 30, 20 และ 10 กรัมตามลำดับ และเมื่อทดสอบภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ก็สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 97.33 เปอร์เซ็นต์ ภายในหนึ่งหลอดซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบเดิม จากการศึกษาหาปริมาณเส้นใยแก้วที่เหมาะสมพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นสามารถฆ่าเชื้อได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเส้นใยแก้วมีจำนวนมาก และอัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาทีซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำทำให้เชื้อมีโอกาสสัมผัสกับเส้นใยได้มากขึ้นนั่นเอง และเนื่องจากเส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดสอบมีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่สูง ผลการฆ่าเชื้อดังแสดงในรูปที่ 3.60 และ 3.61 และเปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อดังแสดงในรูปที่ 3.62



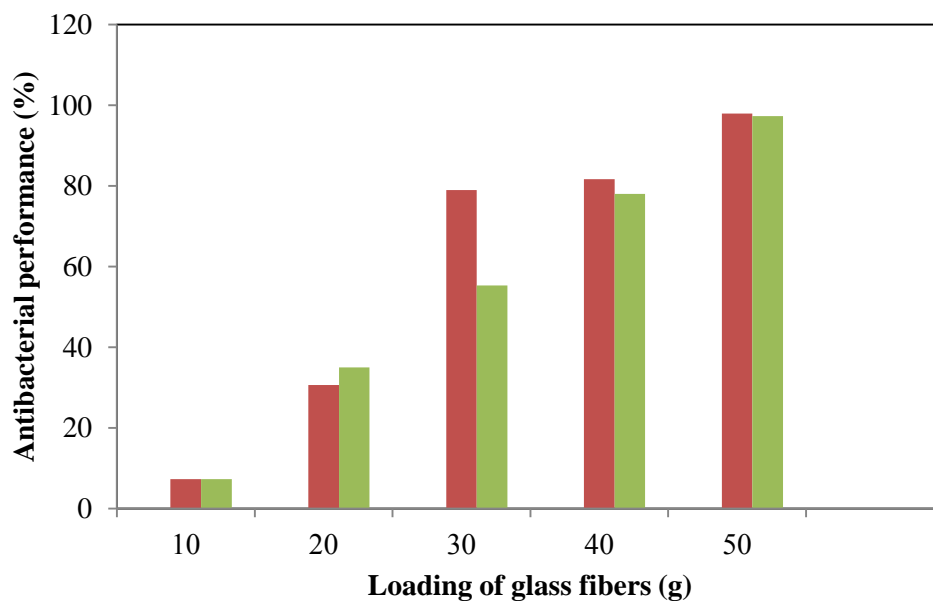
รูปที่ 3.59 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตรของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้วที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี 60 วัตต์



รูปที่ 3.60 ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10³ โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้ว 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี 60 วินาที



รูปที่ 3.61 ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10³ โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้ว 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนต์ 60 วินาที



รูปที่ 3.62 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้ว 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์

ตารางที่ 3.22 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ที่ปริมาณใยแก้วที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อหลอด ด้วยอัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์

0.01A5NST	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^3 CFU/ml ภายใต้การรับแสง	
	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
ปริมาณใยแก้ว (กรัม)		
10	7.33	7.33
20	30.67	35.00
30	79.00	55.33
40	81.67	78.00
50	98.00	97.33

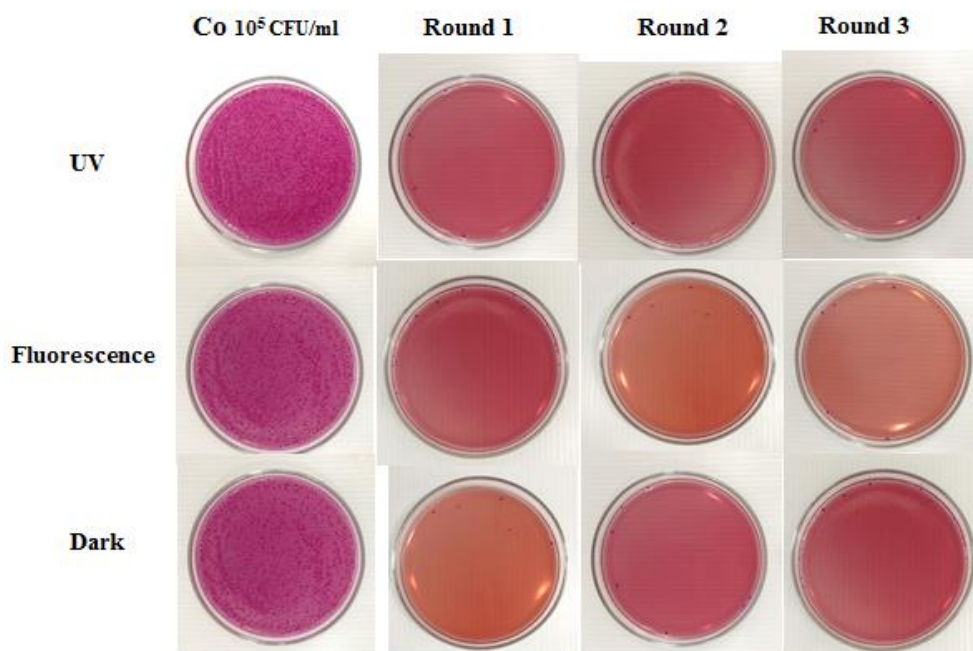
3.4.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ด้วยเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ

จากการศึกษาหาปริมาณใยแก้วที่เหมาะสมพบว่าที่ปริมาณเส้นใยแก้วเท่ากับ 50 กรัมต่อหลอด ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร จึงนำเส้นใยแก้วที่ปริมาณดังกล่าวมาใช้ในเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้ จากนั้นทำการศึกษาการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่มีความเข้มข้นเชื้อเพิ่มขึ้นและเพิ่มอัตราการไหลของระบบ คือใช้ความเข้มข้นเชื้อเท่ากับ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และอัตราการไหลของน้ำที่ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ 60 วัตต์ และที่มืด โดยทดสอบผ่านเครื่องกรองน้ำที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.63

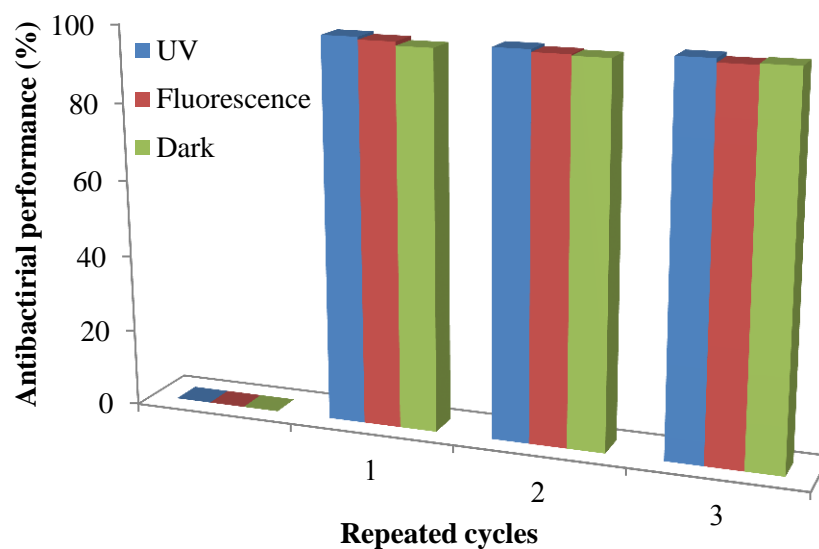
ผลการทดสอบด้วยเครื่องกรองน้ำดังกล่าวในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ที่มีความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้การรับแสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และที่มืด โดยทำการทดสอบในทุกสภาวะแสง 3 ครั้ง ให้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้ ในการทดสอบ 1 รอบผ่านทั้งหมด 20 หลอด ทดสอบภายใต้การรับแสงยูวีสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบภายใต้การรับแสงยูวีสามารถฆ่าเชื้อได้ 98.33 เปอร์เซ็นต์ และทดสอบภายใต้ที่มืดสามารถฆ่าเชื้อได้ 97.33 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบซ้ำครั้งที่ 2 และ 3 พบว่าฟิล์มก็ยังไม่ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.64 และ 3.65 และตารางที่ 3.22



รูปที่ 3.63 เครื่องกรองน้ำที่ออกแบบ และใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.64 ภาพถ่ายแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง



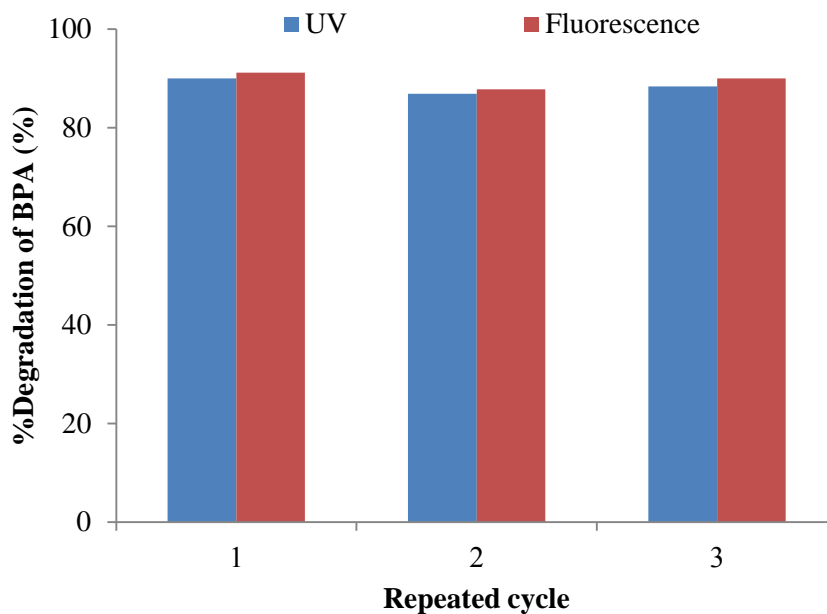
รูปที่ 3.65 เปรี่เซนต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง

ตารางที่ 3.23 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร
ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที

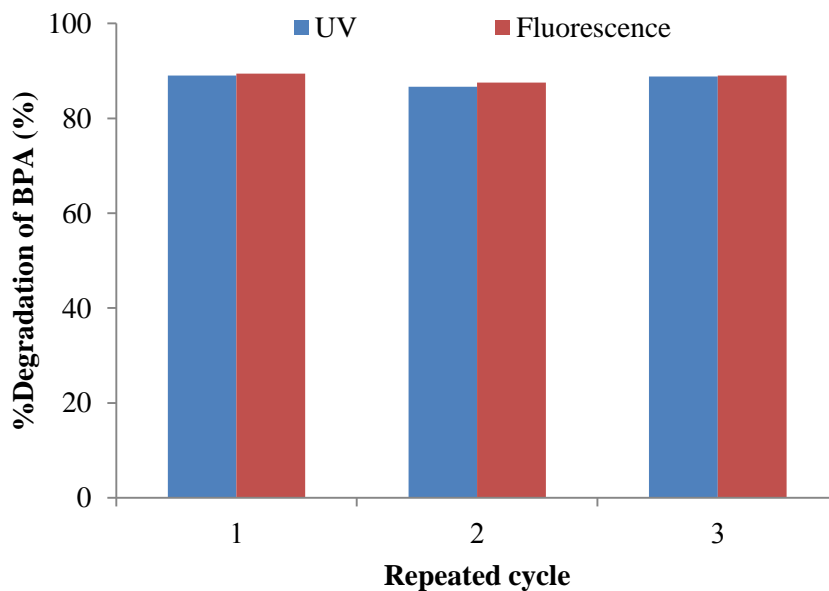
0.01A5NST	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 CFU/ml ภายใต้การรับแสง		
	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์	ไม่มีแสง
จำนวนรอบ			
1	99.00	98.33	97.33
2	98.33	97.67	97.33
3	98.67	97.67	98.00

3.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลาย BPA และ 2,4-DCP

การทดสอบการย่อยสลายสารละลาย BPA และ 2,4-DCP ด้วยเครื่องกรองที่
ออกแบบ ทำโดยใช้ระบบเดียวกับการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* คือใช้หลอดอะทิลิก
ไฮดรอกซีเบนโซอิกแก้วหลอดละ 50 กรัมจำนวน 20 หลอด ใช้ความเข้มแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 60
วัตต์ ทดสอบด้วยอัตราการไหลของน้ำ 500 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ
สารละลาย BPA และ 2,4-DCP เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดสอบในทุกสภาวะแสง 3 ครั้ง
ให้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้ ใน 1 รอบของการไหลครบระบบสามารถย่อยสลายสารละลาย BPA
ได้ 89.98 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การรับแสงยูวี และ 91.12 เปอร์เซ็นต์ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์
ส่วนการย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP สามารถย่อยสลายได้ 89 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การรับแสงยูวี
และ 89.45 เปอร์เซ็นต์ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ จากการทดสอบผ่านเครื่องกรองน้ำที่
ออกแบบให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการทดสอบเบื้องต้นเป็นอย่างมาก ใช้เวลาสั้นๆก็สามารถย่อย
สลายได้สารเคมีทั้งสองชนิดได้ 90 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการทดสอบซ้ำก็ยังคงให้ประสิทธิภาพใน
การย่อยสลายที่ดีดังแสดงในรูปที่ 3.66 และ 3.67 และตารางที่ 3.24 และ 3.25



รูปที่ 3.66 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบด้วยอัตราไหล 500 มิลลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์



รูปที่ 3.67 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบด้วยอัตราไหล 500 มิลลิตรต่อนาที ภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์

ตารางที่ 3.24 เปรอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย BPA ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิตรต่อนาที

0.01A5NST	เปรอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย BPA ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การรับแสง	
จำนวนรอบ	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
1	89.98	91.11
2	86.83	87.74
3	88.37	89.98

ตารางที่ 3.25 เปรอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของฟิล์ม 0.01A5NST ผ่านเครื่องกรองน้ำ ด้วยอัตราไหล 500 มิลลิตรต่อนาที

0.01A5NST	เปรอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลาย 2,4-DCP ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การรับแสง	
จำนวนรอบ	ยูวี	ฟลูออเรสเซนซ์
1	89.00	89.45
2	86.65	87.56
3	88.82	89.03

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตนินร่วมกับซัลเฟอร์ (NST) และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตนินร่วมกับซัลเฟอร์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบ (ANST) เคลือบบนเส้นใยแก้ว และนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลาย MB, BPA, 2, 4- DPC และฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำ ซึ่งปริมาณสารเจือ ความเข้มข้นสารละลายซิลเวอร์นาโนในเตรท เวลาในการจุ่มแช่ และอุณหภูมิเผา มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่พัฒนาได้ดังนี้

ฟิล์มบาง NST ที่เตรียมโดยใช้ไทโอยูเรียเป็นสารตั้งต้นให้ในโตนินและซัลเฟอร์ที่มีปริมาณสารเจือเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โมล (5NST) เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล เผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ให้ฟิล์มที่มีขนาดอนุภาค 50-80 นาโนเมตร มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.15 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู BPA และ 2,4-DPC ได้ภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ และสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้แสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ 5NST ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบเคลือบบนเส้นใยแก้ว เตรียมด้วยวิธีทางเคมีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายซิลเวอร์นาโนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ เวลาในการจุ่มแช่นาน 15 นาที เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง (0.01A5NST) มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.62 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู BPA และ 2,4-DPC ได้ภายใต้การรับแสงยูวีและฟลูออเรสเซนซ์ และสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง

การทดสอบด้วยเครื่องกรองน้ำที่ออกแบบขึ้นด้วยฟิล์ม 0.01A5NST สามารถย่อยสลาย BPA และ 2,4-DPC ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ และสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้แสงยูวี ฟลูออเรสเซนซ์ และไม่มีแสง

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการย่อยสลายสารไตรฮาโลมีเทน คลอรีนอิสระ หรือสารอันตรายอื่นๆที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์
2. ควรนำข้อมูลในการออกแบบชุดปฏิบัติการไปสร้างเพื่อใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

ปณัตตา ยอดแสง. ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

<http://guru.google.co.th/guru/thread?tid=7dbedc9a0ff4b0b5> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).

เล็ก สีคง. วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม. หน่วยโสตทัศนศึกษา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 2547.

วรพจน์ กนกกันตพงษ์ บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิคุณุผล สุรพงษ์ วัฒนจิระ และ ประเสริฐ ภูสันต์. สารที่มีศักยภาพในการก่อกำเนิดน้ำประปากรุงเทพมหานคร. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 8-10 มีนาคม, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย 2549.

สถาบันมะเร็งแห่งชาติ รายงานเรื่อง Population – based Cancer Registry Cancer in Rayong 1999

http://www.mwa.co.th/art_bottle.html (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).

สถิติโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อมประจำปี 2551.

<http://www.boe.moph.go.th/boedb/surdata/disease.php?dcontent=situation&ds=47> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).

อรอนงค์ รัชตราเซนชัย. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโรคติดเชื้อและพาหะนำโรค.

http://webdb.dmsh.moph.go.th/ifc_niha_nih_1_001c.aspx?id=1079.htm (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).

หนังสือพิมพ์เดลินิวส์ วันพุธ ที่ 4 กันยายน 2556.

<http://www.dailynews.co.th/Content/Article/113613/2%20ซิลเวอร์นาโน%20สัญชาติไทย%20ช่วยลดการนำเข้า...กำจัดเชื้อแบคทีเรีย> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤษภาคม 2557).

Ahmadi, N., Nemati, A. and Solati-Hashjin, M. 2014. Synthesis and characterization of co-doped TiO₂ thin films on glass-ceramic. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 26, 41–48.

Alt, V., Bechert, T., Steinrucke, P., Wagener, M., Seidel, P., Dingeldein, E., Domann, E. and Schnettler, R. 2004. An in vitro assessment of the antibacterial properties and cytotoxicity of nanoparticulate silver bone cement. *Biomaterials*. 25, 4383-4391.

- Ao, C.H., Lee, S.C. and Yu, J.C. 2003. Photocatalyst TiO₂ supported on glass fiber for indoor air purification: effect of NO on the photodegradation of CO and NO₂. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 156, 171–177.
- Arman, S.Y., Omidvar, H., Tabaian, S.H., Sajjadnejad, M., Fouladvand, Sh. and Afshar, Sh. 2014. Evaluation of nanostructured S-doped TiO₂ thin films and their photoelectrochemical application as photoanode for corrosion protection of 304 stainless steel. *Surface & Coatings Technology*. 251, 162–169.
- Becker R. and Selden G. The body electric: Electromagnetism and the foundation of life, New York, U.S.A, NY: Quill, 1985.
- Boonyod, S., Sutthisripok, W. And Sikong, L. 2011. Antibacterial Activity of TiO₂ and Fe³⁺ doped TiO₂ Nanoparticles Synthesized at Low Temperature. *Advance Material Research*. 214, 197-201.
- Brosillon, S., Bancon-Montigny, C. and Mendret, J. 2014. Study of photocatalytic degradation of tributyltin, dibutyltin and monobutyltin in water and marine sediments. *Chemosphere*. 109, 173–179.
- Cao, J., Xu, B., Luo, B., Lin, H. and Chen, S. 2011. Preparation, characterization and visible-light photocatalytic activity of AgI/AgCl/TiO₂. *Applied Surface Science*. 257, 7083–7089.
- Cao, S., Liua, B., Fana, L., Yue, Z., Liu, B. and Baocheng, C. 2014. Highly antibacterial activity of N-doped TiO₂ thin films coated on stainless steel brackets under visible light irradiation. *Applied Surface Science*. 309, 119–127.
- Chang, M.Y., Hsieh, Y.H., Cheng, T.C., Yao, K.S., Wei, M.C. and Chang, C.Y. 2009. Photocatalytic degradation of 2,4-dichlorophenol wastewater using porphyrin/TiO₂ complexes activated by visible light. *Thin Solid Films*. 517, 3888–3891.
- Chen, H., Xiao, L. and Huang, J. 2014. Template synthesis of Ag/AgCl microrods and their efficient visible light-driven photocatalytic performance. *Materials Research Bulletin*. 57, 35–40.
- Chen, C.Y. and Chiang, C. L. 2008. Preparation of cotton fibers with antibacterial silver nanoparticles. *Material Letter*. 62, 3607-3609.

- Chiang, L.F. and Doong, R. 2014. Cu-TiO₂nanorods with enhanced ultraviolet- and visible-light photoactivity for bisphenol A degradation. *Journal of Hazardous Materials*. 277, 84–92.
- Chua, C.S., Tan, O.K., Tse, M.S. and Ding, X. 2013. Photocatalytic activity of tin-doped TiO₂ film deposited via aerosol assisted chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*. 544, 571–575.
- Cong, Y., Zhang, J., Chen, F. and Anpo, M. 2007. Synthesis and Characterization of Nitrogen-Doped TiO₂ Nanophotocatalyst with High Visible Light Activity. *Journal of Chemistry C*. 111 (19), 6976–6982.
- Cruz, R., Reyes, L.H., Guzman-Mar, J.L. and Manuel, J. 2011. Photocatalytic degradation of phenolic compounds contained in the effluent of a dye manufacturing industry. *Sustainable Environmental Research*. 21(5), 307-312.
- Daupor, H. and Wongnawa, S. 2014. Urchinlike Ag/AgCl photocatalyst: Synthesis, characterization and activity. *Apply Catalyst A-Gen*. 473, 59-69.
- Darzi, S.J., Mahjoub, A.R. and Sarfi, S. 2012. Visible-light-active Nitrogen doped TiO₂ Nanoparticles Prepared By Sol-gelacid Catalyzed Reaction. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*. 9(3), 69-76.
- Delai Sun, D., Hwa Tay, J. and Min Tan, K. 2003. Photocatalytic Degradation of *E. coliform* in Water. *Water Rerearch*. 37, 3452-3462.
- Dong, C., Yanb, Z., Kokx, J., Chrisey, D.B. and Dinu, C. Z. 2012. Antibacterial and surface-enhanced Raman scattering (SERS) activities of AgCl cubes synthesized by pulsed laser ablation in liquid. *Applied Surface Science*. 258, 9218– 9222.
- Erkan, A., Bakir, U. and Karakas, G. 2006. Photocatalytic microbial inactivation over Pd doped SnO₂ and TiO₂ thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 184, 313–321.
- Fujishima, A., Rao, T.N. and Tryk, D.A. 2000. Titanium Dioxide Photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 1(1), 1-21.
- Galkina, O.L., Sycheva, A., Blagodatskiy, A., Kaptay, G., Katanaev, V.L., Seisenbaeva, G.A., Kessler, V.G. and Agafonov, A.V. 2014. The sol–gel synthesis of cotton/TiO₂ composites and their antibacterial properties. *Surface & Coatings Technology*. 253, 171–179.

- Gomathi Devi, L. and Eraiah Rajashekhar, K. 2011. A Kinetic Model Based on Non-Linear Regression Analysis is Proposed for the Degradation of Phenol under UV / Solar light using Nitrogen doped TiO₂. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical ELSEVIER*. 334, 65–76.
- Grandcolas¹, M., Yonge, L., Van Overschelde, O. and Snyders, R. 2014. Photocatalytic activity of TiO₂ nanodome thin films. *Ceramics International*. 40, 12939–12946.
- Gu, L., Chen, Z., Sun, C., Wei, B. and Yu, X. 2010. Photocatalytic degradation of 2, 4 dichlorophenol using granular activated carbon supported TiO₂. *Desalination*. 263, 107–112.
- Guo, Z., Ma, R. and Li, G. 2006. Degradation of phenol by nanomaterial TiO₂ in wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 119, 55–59.
- Hamadani, M., Reisi-Vanani, A. and Majedi, A. 2010. Synthesis, characterization and effect of calcination temperature on phase transformation and photocatalytic activity of Cu,S-codoped TiO₂ nanoparticles. *Applied Surface Science*. 256, 1837–1844.
- Ho, W., Yua, J.C. and Lee, S. 2006. Low-temperature hydrothermal synthesis of S-doped TiO₂ with visible light photocatalytic activity. *Journal of Solid State Chemistry*. 179, 1171–1176.
- Hong, W.J. and Kang, M. 2006. The Super-Hydrophilicities of Bi–TiO₂, V–TiO₂, and Bi–V–TiO₂ Nano-Sized Particles and Their Benzene Photodecompositions with H₂O addition. *Materials Letters*. 60, 1296–1305.
- Horn, M., Schwerdtfeger, C.F. and Meagher, E.P. 1972. Refinement of the structure of anatase at several temperatures. *Krist.* 2, 136- 273.
- Hou, L.R., Yuan, C.Z. and Peng, Y. 2007. Synthesis and Photocatalytic Property of SnO₂/TiO₂ Nanotubes Composites. *Journal of Hazardous Materials*. B139, 310-315.
- Hou, Y.D., Wang, X.C., Wu, L., Chen, X.F., Ding, Z.X., Wang, X.X. and Fu, X.Z. 2008. N-Doped SiO₂/TiO₂ mesoporous nanoparticles with enhanced photocatalytic activity under visible-light irradiation. *Chemosphere*. 72, 414–421.

- Huang, X. and Li, N. 2008. Structural characterization and properties of the TiO₂ film on tinplate. *Journal of Alloys and Compounds*. 465, 317–323.
- Jiang, K., Zakutayev, A., Stowers, J., Anderson, M.D., Tate, J., McIntyr, D.H., Johnson, D.C. and Keszler, D.A. 2009. Low-temperature, solution processing of TiO₂ thin films and fabrication of multilayer dielectric optical elements. *Solid State Sciences*. 11, 1692–1699.
- Jiaqing, G., Dong, Y., Juhong, Z., Daimei, C. and Zhongyi, J. 2009. Nitrogen-Doped TiO₂ Nanotubes with Enhanced Photocatalytic Activity Synthesized by a Facile Wet Chemistry Method. *Materials Research Bulletin*. 44, 146–150.
- Kaneco, S., Rahman, M.A., Suzuki, T., Katsumata, H. and Ohta, K. Optimization of solar photocatalytic degradation conditions of bisphenol A in water using titanium dioxide. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 163, 419–424.
- Kanai, N., Nuida, T., Ueta, K., Hashimoto, K., Watanabe, T. and Ohsaki, H. 2004. Photocatalytic Efficiency of TiO₂/SnO₂ Thin Film Stacks Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Vacuum*. 74, 723-727.
- Kim, S., Kuk, E., Kyeong, N.Y., Kim, J.H., Park, S.J., Lee, H.J., Kim, H., Park, Y.K., Park, Y.H., Hwang, C.Y., Kim, Y.K., Lee, Y.S., Jeong, D.H. and Cho, M.H. 2006. Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nano medicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*. 3, 95–101.
- Kim, S. and Ehrman, S. H. 2009. Photocatalytic activity of a surface-modified anatase and rutile titania nanoparticle mixture. *Journal of Colloid and Interface Science* 338, 304–307.
- Lee, S.C., Lee, H. U., Lee, S.M., Lee, G., Hong, W.G., Lee, J. and Kim, H.J. 2012. Preparation and characterization of bicrystalline TiO₂ photocatalysts with high crystallinity and large surface area. *Materials Letters*. 79, 191–194.
- Li, H., Wang, D., Fan, H., Wang, P., Jiang, T. and Xie, T. 2011. Synthesis of highly efficient C-doped TiO₂ photocatalyst and its photo-generated charge-transfer properties. *Journal of Colloid and Interface Science*. 354, 175–180.
- Liga, M.V., Bryant, E.L., Colvin, V.L. and Li, Q. 2011. Virus inactivation by silver doped titanium dioxide nanoparticles for drinking water treatment. *Water research*. 45, 535-544.

- Lima, S.P., Huang, N.M., Limb, H.N. and Mazhar, M. 2014. Aerosol assisted chemical vapour deposited (ACVD) of TiO_2 thin film as compact layer for dye-sensitised solar cell. *Ceramics International*. 40, 8045–8052.
- Lin, C.F., Wu, C.H. and Onn, Z.N. 2008. Degradation of 4-chlorophenol in TiO_2 , WO_3 , SnO_2 , TiO_2/WO_3 and $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ systems. *Journal of Hazardous Materials*. 154, 1033–1039.
- Lin, C.H., Lee, J.W., Chang, Y.J., Lee, Y.C. and Hwa, M.Y. 2010. Novel TiO_2 thin films/glass fiber photocatalytic reactors in the removal of bioaerosols. *Surface & Coatings Technology*. 205, S341–S344.
- Lin, X., Rong, F., Ji, X. and Fu, D. 2011. Carbon-doped mesoporous TiO_2 film and its photocatalytic activity. *Microporous and Mesoporous Materials*. 142, 276–281.
- Lin, S., Zhang, X., Sun, Q., Zhou, T. and Lu, J. 2013. Fabrication of solar light induced Fe- TiO_2 immobilized on glass-fiber and application for phenol photocatalytic degradation. *Materials Research Bulletin*. 48, 4570–4575.
- Liu, Y., Liu, J., Lin, Y., Zhang, Y. and We, Y. 2009. Simple fabrication and photocatalytic activity of S-doped TiO_2 under low power LED visible light irradiation. *Ceramics International*. 35, 3061–3065.
- Liu S., Yang, L., Xu, S., Lou, S. and Cai, Q. 2009. Photocatalytic activities of C-N-doped TiO_2 . *Electrochemistry and Communication*. 11, 1748-1751.
- Liu, W., Zhang, L., Cao, L.K., Su, G. and Wang, Y.G. 2011. Glass fibers templated preparation of TiO_2 microtubes assembled from nano/micro hierarchical TiO_2 crystals. *Journal of Alloys and Compounds*. 509, 3419–3424.
- Liu, L., Liu, Z., Bai, H. and Sun, D.D. 2012. Concurrent filtration and solar photocatalytic disinfection/degradation using high-performance Ag/ TiO_2 nanofiber membrane. *Water Research*. 46. 1101-1112.

- Lv, K., Zuo, H., Sun, J., Deng, K., Liu, S., Li, X. and Wang, D. 2008. (Bi, C and N) codoped TiO₂ nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*. 161, 396–401.
- Lv, Y., Liu, H., Zhen, W., Liuc, S., Haod, L., Sanga, Y., Liu, D., Wanga, J. and Boughtone, R.I. 2009. Silver nanoparticle-decorated porous ceramic composite for water treatment. *Journal of Membrane Science*. 331, 50–56.
- Daskalaki, V.M., Frontistis, Z., Mantzavinos, D. and Katsaounis, A. 2011. Solar light-induced degradation of bisphenol-A with TiO₂ immobilized on Ti. *Catalysis Today*. 161, 110–114.
- Mathews, N.R., Morales, E.R., Cortes-Jacome, M.A. and Toledo Antonio, J.A. 2009. TiO₂ thin films Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties. *Solar Energy*. 83, 1499–1508.
- Meagher, E.P. 1979. *Canadian Mineralogist*. 17, 77-85.
- Mechiakh, R. and Bensaha, R. 2007. Variation of the structural and optical properties of sol–gel TiO₂ thin films with different treatment temperatures. *Comptes rendus Physique*. 7, 464–470.
- Melián, E.P., Díaz, O.G., Rodríguez, J.M.D., Arana, J. and Pena, P. 2013. Adsorption and photocatalytic degradation of 2,4 –dichlorophenol in TiO₂ suspensions. Effect of hydrogen peroxide, sodium peroxodisulphate and ozone. *Applied Catalysis A: General*. 455, 227–233.
- Min, S.H., Yang, J.H., Kim, J.Y. and Kwon Y.U. 2010. Development of white antibacterial pigment based on silver chloride nanoparticles and mesoporous silica and its polymer composite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 128, 19–25.
- Mollahosseini, A. and Rahimpour, A. 2014. Interfacially polymerized thin film nanofiltration membranes on TiO₂ coated polysulfone substrate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20, 1261–1268.
- Mthombenia, N. H., Mpenyana-Monyatsib, L., Onyangoa, Maurice S. and Mombab, Maggie N.B. 2013. Breakthrough analysis for water disinfection using silver nanoparticles coated resin beads in fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*. 217– 218, 133– 140.

- Nakamura, R., Tanaka, T. and Nakato, Y. 2004. Mechanism for Visible Light Responses in Anodic Photocurrents at N-Doped TiO₂ Film Electrodes. *Journal of Physics and Chemistry B*. 108 (30), 10617–10620.
- Neelavannan, M.G., Revathi, M. and Basha, C.A. 2007. Photocatalytic and electrochemical combined treatment of textile wash water. *Journal of Hazardous Materials*. 149, 371–378.
- Nolan, N.T., Synnotta, D. W., Seeryb, M.K., Hinderc, S.J., Wassenhovend, A.V. and Pillai, S.C. 2012. Effect of N-doping on the photocatalytic activity of sol–gel TiO₂. *Journal of Hazardous Material*. 211–212, 88–94.
- Ohno, T., Tokieda, K., Higashida, S. and Matsumura, M. 2003. Synergism between rutile and anatase TiO₂ particles in photocatalytic oxidation of naphthalene. *Applied Catalysis A: General*. 244, 383–391.
- Ohno, T., Akiyoshi, M., Umebayashi T., Asai, K., Mitsui, T. and Matsumura, M. 2004. Preparation of S-doped TiO₂ photocatalysts and their photocatalytic activities under visible light. *Applied Catalysis A: General*. 265, 115–121.
- Panniello, A., Curri, M.L., Diso, D., Licciulli, A., Locaputoa, V., Agostiano, A., Comparelli, R. And Mascolo, G. 2012. Nanocrystalline TiO₂ based films onto fibers for photocatalytic degradation of organic dye in aqueous solution. *Applied Catalysis B: Environmental*. 121– 122, 190– 197.
- Rasalingama, S., Kibombo, H.S., Wua, C.M., Penga, R., Baltrusaitisb, J. and Koodali, R.T. 2014. Competitive role of structural properties of titania–silica mixed oxides and a mechanistic study of the photocatalytic degradation of phenol. *Applied Catalysis B: Environmental*. 148– 149, 394– 405.
- Rengifo-Herrera, J.A., Mielczarski, E., Mielczarski, J., Castillo, N.C., Kiwi, J. and Pulgarin, C. 2008. *Escherichia coli* inactivation by N, S co-doped commercial TiO₂ powders under UV and visible light. *Apply Catalyst B-Environmental*. 84, 448-456.
- Rengifo-Herrera, J.A. and Pulgarin, C. 2009. Photocatalytic activity of N, S co-doped and N-doped commercial anatase TiO₂ powders towards phenol oxidation and *E. coli* inactivation under simulated solar light irradiation. *Solar Energy*. 84,37–43.

- Rengifo-Herrera, J.A. and Pulgarin, C. 2010. Photocatalytic activity of N, S co-doped and N-doped commercial anatase TiO₂ powders towards phenol oxidation and *E.coli* inactivation under simulated solar light irradiation. *Solar Energy*. 84, 37-43.
- Senthilnathan, J. and Philip, L. 2010. Photocatalytic Degradation of Lindane under UV and Visible Light using N-Doped TiO₂. *Chemical Engineering Journal*. 161, 83-92.
- Sikong, L., Kantachote, D. and Sutthisripok, W. 2010. Photocatalytic Activity and Antibacterial Behavior of Fe³⁺ Doped TiO₂/SnO₂ Nanoparticles. *Energy Research Journal*. 1(2), 120-125.
- Sikong, L., Kongreong, B., Kantachote, D. and Sutthisripok W. 2011. Inactivation of *Salmonella typhi* Using Fe³⁺ Doped TiO₂/3SnO₂ Photocatalytic Powders and Films. *Journal of Nano Research*. 12, 89-97.
- Sharma, V.K., Siskavo, K.M., Zboril, R. and Gardea-Torresdey, J.L. 2014. Organic-coated silver nanoparticles in biological and environmental conditions: Fate, stability and toxicity. *Advances in Colloid and Interface Science*. 204, 15–34.
- Shouxin, L., Xiaoyun, C. and Xi, C. 2006. Preparation of N-Doped Visible-Light Response Nanosize TiO₂ Photocatalyst Using the Acid-Catalyzed Hydrolysis Method. *Chinese Journal Of Catalysis*. 27(8), 697-702.
- Sohrabnezhad, Sh., Zanjanchi, M.A. and Razavi, M. 2014. Plasmon-assisted degradation of methylene blue with Ag/AgCl/montmorillonite nanocomposite under visible light. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 130, 129–135.
- Sonawane, R.S., Hegde, S.G. and Dongare, M.K. 2002. Preparation of titanium(IV) oxide thin film photocatalyst by sol–gel dip coating. *Materials Chemistry and Physics*. 77, 744–750.
- Sung-Suh, H.M., Choi, J.R., Hah, H.J., Koo, S.M. and Bae, Y.C. 2004. Comparison of Ag deposition effects on the photocatalytic activity of nanoparticulate TiO₂ under visible and UV light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 16, 37–44.
- Surmacki, J., Wron, P., Szadkowska-Nicze, M. and Abramczyk, H. 2013. Raman spectroscopy of visible-light photocatalyst – Nitrogen-doped titanium dioxide generated by irradiation with electron beam. *Chemical Physics Letters*. 566, 54-59.

- Suryaman, D., Hasegawa, K. and Kagaya, S. 2009. Combined biological and photocatalytic treatment for the mineralization of phenol in water. *Chemosphere*. 65, 2502–2506.
- Tian, H., Ma, F., Li, K. and Li, J. 2009. Hydrothermal synthesis of S-doped TiO₂ nanoparticles and their photocatalytic ability for degradation of methyl orange. *Ceramics International*. 35, 1289–1292.
- Ubonchonlaket, K., Sikong, L. and Kooptarnond. 2008. Effect of Calcinations Temperature on Photocatalytic Activity of Ag-doped TiO₂ Coated on Tile Substrate. Special Issue on *Nanotechnology*. 01/2008, 7.
- Ubonchonlaket, K., Sikong, L. and Saito, F. 2011. Photocatalytic disinfection of *P.aeruginosa* bacterial Ag-doped TiO₂ film. *Procedia Engineering*. 32, 656–662.
- 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).
- Wang, Z. and Hu, X. 2014. Fabrication and electrochromic properties of spin-coated TiO₂ thin films from peroxo-polytitanic acid. *Thin Solid Films*. 352, 62-65.
- Wang, W. and Ku, Y. 2003. The light transmission and distribution in an optical fiber coated with TiO₂ particles. *Chemosphere*. 50, 999–1006.
- Wen Wang, Young Ku. 2003. The light transmission and distribution in an optical fiber coated with TiO₂ particles. *Chemosphere*. 50, 999–1006.
- Wang, X. and Lim, T.T. Solvothermal synthesis of C, N codoped TiO₂ and photocatalytic evaluation for bisphenol A degradation using a visible-light irradiated LED photoreactor. *Journal Applied Catalysis B*. 100 (1–2), 355–364.
- Wang, J., Lu, C.H. and Xiong, J.R. 2014. Self-cleaning and depollution of fiber reinforced cement materials modified by neutral TiO₂/SiO₂ hydrosol photoactive coatings. *Applied Surface Science*. 298, 19–25.
- Wei, F., Ni, L. and Cui, P. 2008. Preparation and characterization of N–S-codoped TiO₂ photocatalyst and its photocatalytic activity. *Journal of Hazardous Materials*. 156, 135–140.

- Wen, C., Zhu, Y. J., Kanbara, T., Zhu, H. Z. and Xiao, C. F. 2009. Effects of I and F codoped TiO₂ on the photocatalytic degradation of methylene blue. *Desalination*. 249, 621-625.
- Wu, X., Yin, S., Dong, Q., Guo, C., Li, H., Kimura, T. and Sato, T. 2013. Synthesis of high visible light active carbon doped TiO₂ photocatalyst by a facile calcination assisted solvothermal method. *Applied Catalysis B: Environmental*. 142–143, 450–457.
- Wu, D. and Wang, L. Low-temperature synthesis of anatase C-N-TiO₂ photocatalyst with enhanced visible-light-induced photocatalytic activity. *Applied Surface Science*. 271, 357–361.
- Xiao, Q. and Ouyang, L. 2011. Photocatalytic photodegradation of xanthate over C, N, S - tridoped TiO₂ nanotubes under visible light irradiation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 72, 39–44.
- Xiong, W., Zhao, Q., Li, X. and Zhang, D. 2011. One-step synthesis of flower-like Ag/AgCl/BiOCl composite with enhanced visible-light photocatalytic activity. *Catalysis Communications*. 16, 229–233.
- Zhao, B.X., LI, X. Z. and Wang, P. 2007. Degradation of 2,4-dichlorophenol with a novel TiO₂/Ti-Fe-graphite felt photoelectrocatalytic oxidation process. *Journal of Environmental Sciences*. 19, 1020–1024.
- Yaithongkum, J., Kooptarnond, K., Sikong, L. and Kantachote, D. 2011. Synthesis and Characterization of SnO₂/N-Doped TiO₂ Nanoparticles. *Advance Material Research*. 214, 212-217.
- Yu, H., Leea, S.C., Ao, C.H. and Yu J. 2005. Low-temperature fabrication and photocatalytic activity of clustered TiO₂ particles formed on glass fibers. *Journal of Crystal Growth*. 280, 612–619.
- Yu, J., Zhou, M., Cheng, M. and Zhao, X. 2006. Preparation, characterization and photocatalytic activity of in situ N,S-codoped TiO₂ powders. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 246, 176–184.
- Yu, H., Lee, S.C., Yu, J. and Ao, C.H. 2006. Photocatalytic Activity of Dispersed TiO₂ Particles Deposited on Glass Fibers. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*. 246, 206-211.

- Yang G., Jiang, Z., Shi, H., Jones, M. O., Xiao, T., Edwards, P. P. and Yan, Z. 2010. Study on the photocatalysis of F-S co-doped TiO₂ prepared using solvothermal method. *Apply Catalyst B-Environment*. 96, 458-465.
- Zhang, H., Yang, Z., Zhang, X. and Mao, N. 2014. Photocatalytic effects of wool fibers modified with solely TiO₂ nanoparticles and N-doped TiO₂ nanoparticles by using hydrothermal method. *Chemical Engineering Journal*. 254,106–114.
- Zhao, L., Han, M., and Lian, J. 2007. Photocatalytic activity of TiO₂ films with mixed anatase and rutile structures prepared by pulsed laser deposition. doi:10.1016/j.tsf.2007.10.102.
- Zhou, J., Chengb, Y. and Yua, J. 2011. Preparation and characterization of visible-light-driven plasmonic photocatalyst Ag/AgCl/TiO₂ nanocomposite thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 223, 82– 87.
- Zribi, M., Kanzari, M. and Rezig, B. 2007. Structural, morphological and optical properties of thermal annealed TiO₂ thin films. *Thin Solid Films*. 516, 1476–1479.
- <http://www.gooddrinks.net/2011-02-24-07-51-07.html> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- http://dermnam.blogspot.com/2009/10/blog-post_3559.html (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- <http://www.pharm.su.ac.th/cheminlife/cms/index.php/bisphenol-a.html>
(สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- <http://www.boe.moph.go.th/boedb/surdata/disease.php?dcontent=situation&ds=47>
(สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- http://www.mwa.co.th/art_bottle.html (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- <http://doenv.eng.cmu.ac.th/water/water1.doc> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- <http://www.mwa.co.th/download/prd01/article/wqa/bottle.pdf> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- http://www.thaicam.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=317:2010-08-09-09-58-56&catid=81:2010-08-06-03-43-56&Itemid=147 (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).
- <http://www.nanotec.or.th/th/doc/hUfiJ49photocatalyst.pdf> (สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2555).

- <http://www.nanoyothai.com/images/content/original-1381420852410.png>
(สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- <http://www.nanoyothai.com/images/content/original-1381420571008.png>
(สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- <http://content.chemipan.net/home/index.php/634-บทความ/666-บทความสารเคมี/261-ไทเทเนียม-ไดออกไซด์-titanium-dioxide-tio2-คืออะไร-ตอนที่-4.html> (สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- <http://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-10-29-04-40-02/1574->
(สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- http://matchmaxx.com/onon/silver_nano.pdf (สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- http://www.thaibrush.com/product_th.php?pid=5 (สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- <http://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-10-29-04-40-02/1574->
(สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556).
- http://th.wikipedia.org/wiki/วิลเลียม_ฟอกซ์_เทลบอด (สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2557).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_chloride (สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2557).
- <http://reanoanirut.wordpress.com/เนื้อหาบทเรียน/ปฏิกิริยาของกรดและเบส/ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส/>
(สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrothermal_synthesis (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Solvothermal_synthesis (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://en.wikipedia.org/wiki/File:Continuous_Binary_Fractional_Distillation.PNG \
(สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://en.wikipedia.org/wiki/File:Reflux_labeled.svg (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- <http://www.fujilloy.co.th/index.php/product/coating/cvd-coatng/> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_coating (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolGel_SpinCoating.jpg (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_\(deposition\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_(deposition)) (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=17076886> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- http://www.chem.ryukoku.ac.jp/aoi/research/LPD_e.htm (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Dip-coating> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

<http://de.wikipedia.org/wiki/Sol-Gel-Schicht> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

<http://haamor.com/น้ำดื่มปนเปื้อน-1/> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

http://www.thia.in.th/welcome/article_read/289 (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

[http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/politics/analysis/20120908/469309/พิษสารพิษ
ฉะเชิงเทรา-พบสารก่อมะเร็งเกินมาตรฐาน.html](http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/politics/analysis/20120908/469309/พิษสารพิษ
ฉะเชิงเทรา-พบสารก่อมะเร็งเกินมาตรฐาน.html) (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

<http://www.greenpeace.org/seasia/th/press/releases/water-report-launch/>
(สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

<http://www.technoinhome.com/front/webboard/show.php?tbl=tblwb03&id=19>
(สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

<http://www.hiso.or.th/hiso/ghealth/newsx2226.php> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

<http://www.prominent.co.th/application/potable.html> (สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิต่าง 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตาราง ก.1 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.53	0.20	0.13	0.11	0.07	0.006	0.06
1NST	0.55	0.28	0.21	0.15	0.11	0.09	0.08
2NST	0.52	0.32	0.22	0.16	0.13	0.11	0.09
5NST	0.54	0.13	0.08	0.07	0.04	0.04	0.04
10NST	0.52	0.17	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05

ตาราง ก.2 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.65	0.46	0.42	0.39	0.37	0.31	0.29
1NST	0.69	0.70	0.63	0.60	0.56	0.54	0.53
2NST	0.67	0.58	0.44	0.36	0.32	0.26	0.26
5NST	0.67	0.51	0.33	0.23	0.15	0.12	0.10
10NST	0.69	0.42	0.24	0.16	0.14	0.10	0.10

ตาราง ก.3 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เพาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.88	0.62	0.57	0.52	0.50	0.46	0.42
1NST	0.88	0.69	0.61	0.56	0.49	0.44	0.42
2NST	0.86	0.64	0.48	0.37	0.32	0.22	0.09
5NST	0.90	0.68	0.46	0.42	0.31	0.24	0.04
10NST	0.86	0.57	0.40	0.35	0.23	0.18	0.05

ตาราง ก.4 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เพาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	1.00	0.68	0.60	0.54	0.48	0.44	0.40
1NST	0.99	0.86	0.74	0.66	0.60	0.52	0.48
2NST	0.95	0.77	0.64	0.53	0.45	0.36	0.33
5NST	0.99	0.91	0.87	0.84	0.72	0.63	0.56
10NST	0.99	0.91	0.87	0.84	0.72	0.63	0.59

ตาราง ก.5 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.58	0.22	0.15	0.15	0.12	0.10	0.09
1NST	0.57	0.25	0.16	0.14	0.11	0.09	0.08
2NST	0.57	0.22	0.20	0.13	0.11	0.09	0.08
5NST	0.58	0.11	0.09	0.07	0.06	0.06	0.06
10NST	0.53	0.20	0.15	0.13	0.11	0.09	0.08

ตาราง ก.6 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เหนือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.66	0.57	0.47	0.47	0.44	0.39	0.34
1NST	0.69	0.52	0.47	0.39	0.34	0.28	0.26
2NST	0.65	0.55	0.44	0.33	0.29	0.24	0.24
5NST	0.67	0.43	0.32	0.25	0.19	0.16	0.16
10NST	0.63	0.52	0.4	0.33	0.28	0.23	0.22

ตาราง ก.7 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เพาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.88	0.76	0.73	0.70	0.68	0.66	0.62
1NST	0.87	0.74	0.68	0.64	0.62	0.6	0.57
2NST	0.87	0.74	0.65	0.64	0.58	0.53	0.53
5NST	0.85	0.68	0.63	0.6	0.58	0.52	0.51
10NST	0.87	0.74	0.67	0.62	0.58	0.52	0.52

ตาราง ก.8 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตรต่างๆ เพาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
PT	0.93	0.80	0.77	0.74	0.71	0.67	0.65
1NST	0.92	0.79	0.74	0.71	0.68	0.64	0.58
2NST	0.92	0.76	0.72	0.67	0.66	0.61	0.57
5NST	0.92	0.70	0.67	0.62	0.57	0.52	0.49
10NST	0.91	0.75	0.70	0.66	0.61	0.58	0.52

ภาคผนวก ข. ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตาราง ข.1 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม A5NST สูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
0.01A5NST	0.52	0.21	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05
0.03A5NST	0.58	0.32	0.11	0.09	0.07	0.05	0.05
0.05A5NST	0.46	0.35	0.22	0.14	0.09	0.07	0.05
0.1A5NST	0.54	0.49	0.32	0.25	0.19	0.15	0.13
0.3A5NST	0.67	0.52	0.46	0.43	0.37	0.33	0.32

ตาราง ข.2 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม A5NST สูตรต่างๆ เฝ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	C/C_0						
	ที่มีด 1 ชั่วโมง	ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
0.01A5NST	0.66	0.21	0.18	0.12	0.11	0.08	0.06
0.03A5NST	0.65	0.42	0.39	0.27	0.16	0.12	0.10
0.05A5NST	0.68	0.28	0.26	0.25	0.21	0.18	0.16
0.1A5NST	0.68	0.37	0.32	0.29	0.26	0.19	0.18
0.3A5NST	0.68	0.52	0.51	0.44	0.41	0.38	0.37

ภาคผนวก ค. เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA และ 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบสูตร 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์

ตาราง ค.1 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์ม 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 110 วัตต์ (ชั่วโมง)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	79.51	84.14	85.21	87.38	88.33	90.80	91.58	96.87	99.27	99.65	99.64	99.69
20	65.11	66.50	69.78	71.92	73.83	75.99	79.10	84.12	86.86	90.52	92.40	95.93
30	60.19	66.12	69.99	72.45	77.22	81.90	84.90	87.59	88.86	90.58	90.58	90.12
40	52.34	56.42	64.52	67.17	70.71	72.55	75.70	78.26	71.52	72.87	76.00	76.89
50	46.07	49.31	53.18	56.80	60.66	62.44	65.85	67.21	48.61	52.38	56.92	59.93

ตาราง ค.2 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์ม 0.01A5NST เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย BPA ณ เวลาต่างๆของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์ (ชั่วโมง)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	79.51	84.14	85.21	87.38	88.33	90.80	91.58	96.87	99.27	99.65	99.64	99.69
20	65.11	66.50	69.78	71.92	73.83	75.99	79.10	84.12	86.86	90.52	92.40	95.93
30	34.93	41.82	45.82	47.50	56.93	60.90	64.39	71.95	71.28	77.12	82.10	84.89
40	35.37	38.83	44.15	52.27	55.54	61.41	67.79	71.94	57.75	62.00	63.92	67.41
50	28.37	30.46	35.76	40.50	46.86	51.31	55.14	58.29	19.45	24.24	29.80	36.79

ตาราง ค.3 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์ม 0.01A5NST
 เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 110 วัตต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 110 วัตต์ (ชั่วโมง)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	41.03	50.84	57.68	66.80	70.56	73.54	75.82	90.29	95.49	98.49	98.45	98.66
20	16.14	27.83	36.41	41.88	48.62	55.92	66.04	76.46	87.13	91.05	93.21	93.35
30	30.51	44.77	46.73	50.72	53.87	54.77	55.14	58.75	60.47	68.35	72.00	74.46
40	32.65	41.58	44.21	49.78	52.83	57.02	59.98	64.67	64.98	67.11	69.52	72.03
50	20.84	27.49	36.72	39.47	43.37	46.43	49.04	53.10	57.53	58.05	60.46	61.11

ตาราง ค.4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆของฟิล์ม 0.01A5NST
 เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4-DCP ณ เวลาต่างๆของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 110 วัตต์ (ชั่วโมง)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	34.66	54.85	67.14	72.05	75.67	76.78	80.85	91.12	93.04	95.42	95.62	97.26
20	35.70	47.74	62.57	67.66	68.58	74.56	80.02	86.06	87.26	88.81	89.65	91.03
30	22.91	34.84	51.52	53.72	52.60	56.42	61.12	61.18	63.67	67.27	68.60	70.37
40	25.67	36.23	51.85	55.02	57.14	59.67	60.46	61.10	62.71	64.64	64.88	65.67
50	21.40	29.65	42.83	45.96	47.53	48.58	49.40	53.82	57.05	57.93	60.47	44.15

ภาคผนวก ง. เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี และฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ตาราง ง.1 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (นาที)					
	10	20	30	40	50	60
UV alone	0	0	0	3.33	6.67	8.33
Glass fibers	0	0	0	3.33	6.00	7.33
PT	0	3.33	16.67	31.67	59.33	89.33
5NST	25.00	78.33	89.83	97.50	99.33	99.67
0.01A5NST	66.67	95.00	96.83	99.00	99.00	100.00
0.01A5NST (Dark)	66.17	80.33	86.50	97.33	99.00	100.00

ตาราง ง.2 เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ของฟิล์มสูตรต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 50 วัตต์

ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเชื้อ 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ณ เวลาต่างๆของการรับแสงยูวี 50 วัตต์ (นาที)					
	1	2	3	4	5	6
Fluorescence alone	0	0	0	0	1.67	3.67
Glass fibers	0	0	0	0	3.33	4.33
PT	0	0	6.67	28.33	34.33	58.00
5NST	0	6.67	40.00	50.00	78.33	97.67
0.01A5NST	66.67	95.00	96.67	99.67	100.00	100.00
0.01A5NST (Dark)	66.17	80.33	96.33	99.00	99.00	100.00

ภาคผนวก จ. ผลงานที่ตีพิมพ์

Noophum, B., Sikong, L. and Kooptanond, K. 2013. Photocatalytic properties of nitrogen-sulfur co-doped TiO₂ films coated on glass fiber. *Advanced Materials Research*. 781-784, 2237-2240.