การทำความสะอาดน้ำดื่มด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนฟิล์ม

Cleaning Drinking Water with TiO_2 Nano-Films

พีรวัส คงสง

Peerawas Kongsong

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Doctor of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2558

การทำความสะอาดน้ำดื่มด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนฟิล์ม

Cleaning Drinking Water with TiO_2 Nano-Films

พีรวัส คงสง

Peerawas Kongsong

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Doctor of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2558

ชื่อวิทยานิพนธ์ การทำความสะอาดน้ำดื่มด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนฟิล์ม
ผู้เขียน นายพีรวัส คงสง
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

……..……..……...
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

…….……...
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส

…….……...
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร)

คณะกรรมการสอบ

…….ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาหามะสูไฮมี มะแซ)

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

...……..…..……กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส)

……..……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร)

……..……กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

…….…….
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รศ.ดร. เล็ก สีคง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายพีรวัส คงสง)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายพีรวัส คงสง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การทำความสะอาดน้ำดื่มด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนฟิล์ม
ผู้เขียน นายพีรวัส คงสง
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุกและไนโตรเจน โดยมีแอมโมเนียมคาร์บอเนตและโพลีไวนิลไพโรลิโดนเป็นแหล่งให้ไนโตรเจน สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล–เจล แล้วเคลือบลงบนเส้นใยแก้วชนิด E-glassโดยวิธีจุ่มเคลือบและเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูและสารเคมีในน้ำ ได้แก่ กรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) และทดสอบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus* (N_0 = 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์บำบัดน้ำโดยมีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบอยู่บนเส้นใยแก้วบรรจุอยู่ในระบบและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูของฟิล์ม TiO_2/3SnO_2/40PVP สามารถย่อยสลายได้ 90.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าฟิล์ม TiO_2 ที่ย่อยสลายได้เพียง 71.30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การย่อยสลายสารเคมีในน้ำและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย พบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli, S.typhi* และ*S.aureus*ได้หมดที่อัตราการไหล 1.80 ลิตรต่อนาที และสามารถย่อยสลาย กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล และไกลโฟเสต ได้ 91.30, 95.50, 71.80 และ 88.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 1.8 ลิตร สามารถย่อยสลายสารเคมีดังกล่าวได้น้อย จะเห็นว่าที่อัตราการไหลสูงประสิทธิภาพยังต่ำอยู่ จึงได้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ใหม่โดยการเพิ่มคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์เข้าไปในส่วนท้ายของระบบ เพราะจากการทดลอง พบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารเคมีเหล่านี้ได้ดีถึงแม้ว่าจะไม่สามารถยับยั้งเชื้อโรคได้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์หมดอายุเร็วกว่าฟิล์ม TiO_2 มาก จึงควรใช้ปริมาณน้อยเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ต้องเปลี่ยนบ่อย จากผลการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบใหม่ในการกำจัดสารเคมีต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.80 ลิตรต่อนาที พบว่า สามารถกำจัด กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ไนเตรต (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน (C_0 = 20

มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ 98.50, 98.90, 97.30, 97.80 และ 98.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าประสิทธิภาพของฟิล์มค่อนข้างคงที่เมื่อทดสอบการใช้งานเป็นเวลา 600 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมมีข้อดี คือ สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและย่อยสลายสารเคมีบางชนิดที่เป็นอันตรายในน้ำดื่มได้ ในขณะที่ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกไฮบริดกับถ่านกัมมันต์ถูกพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูง ซึ่งใช้งานได้นานกว่าระบบที่ใช้ถ่านกัมมันต์อย่างเดียว

Thesis Title Cleaning Drinking Water with TiO_2 Nano-Films

Author Mr. Peerawas Kongsong

Major Program Materials Engineering

Academic Year 2015

Abstract

This study aimed to investigate the efficiency of glass fiber which has been coated by TiO_2doping with $SnO_2$and nitrogen.TiO_2 films were prepared by sol-gel method and coated on E–glass type of glass fibers by using dip-coating. Then the films were calcined at temperature of 600°C for 2 h. Ammonium carbonate and polyvinylpyrrolidone were utilized as the sources of nitrogen. The photdegradation efficiency of harmful chemicals which are methylene blue, humic acid (C_0=10 mg/L), fulvic acid (C_0=10 mg/L), 2,4-dichlorophenol (C_0=10 mg/L) and glyphosate (C_0=1x10^{-4} M) contaminated in drinking water were investigated using N-doped $3SnO_2/TiO_2$ films immobilized on glass fibers. The disinfection effect of the films were also investigated to inhibit the growth of *E.coli*, *S.typhi* and *S.aureus* (N_0=10^3 CFU/mL) in order to design and fabricate a photo-reactor containing photocatalytic TiO_2 composite films coated on glass fibers. It was found that $TiO_2/3SnO_2$/40PVP film shows the higher photdegradation rate over methylene blue (90.40%) than that of TiO_2 film (71.30 %). While the degradation of harmful compounds and disinfection rate were also performed. It was found that at the flow rate of 1.80 L/min the photo-reactor can completely kill *E.coli*, *S.typhi* and *S.aureus* and degradation rate over humic acid, fulvic acid, glyphosate and 2,4-dichlorophenol contaminated in made up drinking water at the water flow rate of 0.25 L/min were 91.30, 95.50, 71.80 and 88.70 %, respectively. However, it was seen that the degradation rate at the high water flow rate was low. Therefore, the photo-reactor was redesigned by adding the activated carbon column in the end of the photocatalytic system due to its high absorption rate of these chemicals although it can't inhibit bacteria. Because the activated carbon must be replaced more often than TiO_2 films, it should be used in small amount. From the experimental study on removal of humic acid, fulvic acid, 2,4-dichlorophenol, nitrate (C_0=20 mg/L) and carbofuran (C_0=20 mg/L) using a new designed reactor,

it was found that average percent removal at the water flow rate of 1.80 L/min were 98.50, 98.90, 97.30, 97.80 and 98.10%, respectively. Furthermore, the efficiency of the TiO_2 composite films is stable during the 600 h experimental period. It is apparent that TiO_2 composite photocatalytic reactor shows advantages in antibacterial and degradation of some hazardous chemical compounds contaminated in drinking water while the photocatalytic reactor hybrid with activated carbon has proved to be high efficiency and stability for long term use than the system that using only activated carbon.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา ตลอดจนช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่เอื้อประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

ขอบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาหามะสูไฮมี มะแซ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมในการสอบสัมภาษณ์ปากเปล่าขั้นสุดท้ายเพื่อความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการ ตลอดจนเป็นแบบอย่างในการนำวิชาความรู้ไปใช้ในการดำเนินชีวิตต่อไป

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยและขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความร่วมมือและคำปรึกษาต่างๆ เป็นอย่างดี ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่สามารถเอ่ยนามไว้ในที่นี้ได้ทั้งหมด ที่สนับสนุน เสียสละเวลากำลังกายและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดจนการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและเอก เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่เป็นกำลังใจ ช่วยเหลือแนะนำและเป็นที่ปรึกษาที่ดีในทุกโอกาส

ผู้วิจัยขออุทิศส่วนดี และประโยชน์อันพึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ แด่บุพการีผู้มีพระคุณ ซึ่งเป็นผู้ที่คอยให้กำลังใจ คำปรึกษาและเป็นแบบอย่างที่ดีมาตลอดจนถึงวันนี้

พีรวัส คงสง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ 5
Abstract 7
กิตติกรรมประกาศ 9
สารบัญ 10
รายการตาราง 12
รายการรูป 15
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ 22
บทที่ 1 1
บทนำ 1
1.1 บทนำ 1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ 4
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 58
บทที่ 2 59
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย 59
2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย 59
2.2 ขั้นตอนการวิจัย 59
2.3 การตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์ม 77
2.4 การออกแบบและการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำดื่ม 79
บทที่ 3 80
ผลและการอภิปรายผล 80
3.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD 80
3.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM 83
3.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค AFM 86
3.4 ผลการวิเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR 88
3.5 ผลการวิเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค UV–Vis DRS 90
3.6 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค XPS 94

3.7 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 99
3.8 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ 102
3.9 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฟัลวิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ 104
3.10 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ 106
3.11 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายไกลโฟเสตของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ 108
3.12 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ 110
3.13 การทดสอบการดูดซับคาร์โบฟูรานและไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ 119
3.14 การออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำดื่ม 123
3.15 การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและย่อยสลายสารเคมีในน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น 127
บทที่ 4 135
บทสรุปและข้อเสนอแนะ 135
4.1 บทสรุป 135
บรรณานุกรม 138
ภาคผนวก 151
ประวัติผู้เขียน 161

รายการตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ร้อยละของคุณภาพน้ำบริโภคในประเทศไทย โดยจำแนกตามประเภทของแหล่งน้ำตั้งแต่ปี 2551–2556 4
ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ 7
ตารางที่ 3 มลสาร (Pollutant) ที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซีส 15
ตารางที่ 4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซีสในการบำบัดสารมลพิษ 15
ตารางที่ 5 ส่วนประกอบและสมบัติของแก้วชนิดต่างๆ ที่ทำเป็นเส้นใยเสริมแร 20
ตารางที่ 6 ชนิดของแบคทีเรียแบ่งตามระดับความรุนแรงในการก่อโรค 27
ตารางที่ 7 สมบัติบางประการและหมู่ functional group ที่เกี่ยวข้องของ กรดฮิวมิคและกรดฟัลวิค 30
ตารางที่ 8 รูปแบบของไนโตรเจนที่เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ 41
ตารางที่ 9 ขนาดผลึกที่คำนวณโดยใช้สมการของ Scherer ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 82
ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 86
ตารางที่ 11 ความขรุขระและพื้นผิวของของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่ 88
ตารางที่ 12 ความถี่และชนิดของการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิค FTIR ของอนุภาคไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 89
ตารางที่ 13 แถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 93
ตารางที่ 14 เปอร์เซ็นต์อะตอมที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง XPS ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 99
ตารางที่ 15 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ 101
ตารางที่ 16 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายกรดฮิวมิคด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ 104
ตารางที่ 17 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายกรดฟัลวิคด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ 106
ตารางที่ 18 ตารางเปรียบเทียบการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ 108
ตารางที่ 19 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายไกลโฟเสตด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ 110
ตารางที่ 20 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ 118
ตารางที่ 21 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมการการดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ 121
ตารางที่ 22 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมการการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ 122

รายการตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 23 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีที่เวลาต่างกัน ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี ..152

ตารางที่ 24 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิคเมื่อได้รับรแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดฮิวมิคเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 153

ตารางที่ 25 ความเข้มข้นของกรดฟัลวิคเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดฟัลวิคเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 154

ตารางที่ 26 ความเข้มข้นของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี..... 155

ตารางที่ 27 ความเข้มข้นของไกลโฟเสต เมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไกลโฟเสตเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ $1x10^{-4}$ โมลาร์ โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี 156

ตารางที่ 28 ผลการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 15 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 157

ตารางที่ 29 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และTSP40 ทดสอบภายในเวลา 30 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 157

ตารางที่ 30 ผลการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 50 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 158

รายการตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 31 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของคาร์โบฟูราน โดยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0= 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 159
ตารางที่ 32 ผลการดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร 159
ตารางที่ 33 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไนเตรต จากการดูดซับของถ่านกัมมันต์ปริมาณที่ต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0=20 มิลลิกรัมต่อลิตร 160
ตารางที่ 34 กราฟแสดงการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อสารละลายไนเตรต 50 มิลลิลิตร 160

รายการรูป

หน้า

รูปที่ 1 ร้อยละของคุณภาพน้ำบริโภคที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2551 – 2556 (กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข) 3
รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด 5
รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรู๊คไคต์.....6
รูปที่ 4 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง.....10
รูปที่ 5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....11
รูปที่ 6 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล.....16
รูปที่ 7 กระบวนการโซล–เจล.....18
รูปที่ 8 โครงสร้างของกรดฮิวมิค (Stevenson, 1982) 29
รูปที่ 9 โครงสร้างของกรดฟัลวิค (Stevenson, 1994).....29
รูปที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล 31
รูปที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของไกลโฟเสต 32
รูปที่ 12 โครงสร้างทางเคมีของคาร์โบฟูราน.....33
รูปที่ 13 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน (Liu et al., 2007) 36
รูปที่ 14 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุในคอมพอสิตฟิล์ม SnO_2/TiO_2 (Hou et al., 2007).....37
รูปที่ 15 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทส และรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ Hu และคณะ (2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์ 38
รูปที่ 16 สมบัติของธาตุต่างๆ เมื่อเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ (Kudo et al., 2009).....39
รูปที่ 17 การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจน 40
รูปที่ 18 ชุดทดสอบของ Sun และคณะ (2003).....43
รูปที่ 19 ชุดทดสอบที่ใช้หินภูเขาไฟเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Subrahmanyum et al., 2008).....44
รูปที่ 20 ชุดทดสอบ Fua และคณะ (2006).....45
รูปที่ 21 ชุดทดสอบโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนผ้าฝ้าย (Tryba et al., 2008).....46
รูปที่ 22 ชุดทดสอบของ Byrne และคณะ (1998) 46

รายการรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 23 ชุดทดสอบของ Bla□ková และคณะ (1998) 47
รูปที่ 24 ชุดทดสอบของ Jang และคณะ (2005) 48
รูปที่ 25 ชุดทดสอบของ Xiu และคณะ (2005) 49
รูปที่ 26 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Pestana และคณะ (2014) (ก) ภาพจากด้านหน้า และ (ข) ภาพจากด้านข้าง 49
รูปที่ 27 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Mehrjouei และคณะ (2014) (ก) ภาพรายละเอียด 2 มิติ และ (ข) ภาพโครงสร้างแบบ 3 มิติ 50
รูปที่ 28 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Mehrjouei และคณะ (2014) 52
รูปที่ 29 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Ida และคณะ (2014) 53
รูปที่ 30 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Liu และคณะ (2013) (ก) รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ (ข) ภาพตัดขวางและ (ค) ท่อและทิศทางของแสง 54
รูปที่ 31 ชุดทดสอบ Peill และคณะ (2009) 55
รูปที่ 32 ชุดทดสอบของ Hatch และคณะ (2006) 56
รูปที่ 33 ชุดทดสอบของพีรวัส คงสง (2554) 57
รูปที่ 34 การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2 ด้วยวิธีโซล–เจล 62
รูปที่ 35 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/5SiO_2$ ด้วยวิธีโซล–เจล 63
รูปที่ 36 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/3SnO_2/N$ ด้วยวิธีโซล–เจล 64
รูปที่ 37 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/3SnO_2/PVP$ ด้วยวิธีโซล–เจล 65
รูปที่ 38 โครงสร้างของเมทิลีนบลู 66
รูปที่ 39 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.5×10^{-5}–3.0×10^{-5} โมลาร์ 66
รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู 0.2×10^{-5}–1.0×10^{-5} โมลาร์ กับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 67
รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิค 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 68
รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฟัลวิค 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 70

รายการรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 71
รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไกลโฟเสต $0.2x10^{-4}$–$1.0x10^{-4}$ โมลาร์กับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 72
รูปที่ 45 ขั้นตอนการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย 74
รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูราน 3–21 มิลลิกรัมต่อลิตรค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 75
รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไนเตรต 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis 76
รูปที่ 48 XRD patterns ของฟิล์ม TSN เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 81
รูปที่ 49 XRD patterns ของฟิล์ม TSP เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 82
รูปที่ 50 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 84
รูปที่ 51 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตร TSN20 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) 200 เท่า (ข) 500 เท่า และ (ค) 40,000 เท่า 85
รูปที่ 52 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 85
รูปที่ 53 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) T (ข) TS (ค) TSN20 และ (ง) TSP40 87
รูปที่ 54 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของอนุภาคสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 89
รูปที่ 55 การดูดกลืนสเปกตรัมของอนุภาคสูตร TSN เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 91
รูปที่ 56 การดูดกลืนสเปกตรัมของอนุภาคสูตร TSP เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 91
รูปที่ 57 ค่า Photon energy $(\alpha h\nu)2$ ของอนุภาคสูตร TSN เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 92
รูปที่ 58 ค่า Photon energy $(\alpha h\nu)2$ ของอนุภาคสูตร TSP เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 92
รูปที่ 59 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ600 องศาเซลเซียส 93

รายการรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 60 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม (ก) T (ข) TSN20 และ (ค) TSP40 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....96
รูปที่ 61 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม T เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) Ti 2p และ (ข) O 1s96
รูปที่ 62 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม TSN20 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) Ti 2p (ข) O 1s (ค) Sn 3d และ (ง) N 1s....97
รูปที่ 63 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม TSP40 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) Ti 2p (ข) O 1s (ค) Sn 3d และ (ง) N 1s....98
รูปที่ 64 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....100
รูปที่ 65 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....101
รูปที่ 66 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง....102
รูปที่ 67 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฮิวมิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....103
รูปที่ 68 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฮิวมิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....103
รูปที่ 69 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฟัลวิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....105
รูปที่ 70 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฟัลวิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....105
รูปที่ 71 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....107
รูปที่ 72 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....107
รูปที่ 73 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไกลโฟเสตโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSNทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส....109

รายการรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 74 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไกลโฟเสตโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสง เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....109
รูปที่ 75 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของฟิล์มสูตร (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) T (ค) TS (ง) TSN20 และ (จ) TSP40 ทดสอบภายในเวลา 20 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....112
รูปที่ 76 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตร (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) T (ค) TS (ง) TSN20 และ (จ) TSP40 ทดสอบภายในเวลา 40 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....113
รูปที่ 77 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตร (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) T (ค) TS (ง) TSN20 และ (จ) TSP40 ทดสอบภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....114
รูปที่ 78 ผลการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ ทดสอบภายในเวลา 15 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....115
รูปที่ 79 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 30 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 115
รูปที่ 80 ผลการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 50 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 116
รูปที่ 81 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์มสูตร T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 20 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 116
รูปที่ 82 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์มสูตร T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 40 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่ 600 องศาเซลเซียส.....117

รายการรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 83 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 20 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 117

รูปที่ 84 ภาพถ่าย SEM ของเชื้อแบคทีเรียบนฟิล์ม (ก) *S. typhi* (ก่อนทดสอบ) (ข) *E.coli* (ก่อนทดสอบ) (ค) *S.aureus* (ก่อนทดสอบ) (ง) *S. typhi* (หลังได้รับแสงยูวี 15 นาที) (จ) *E.coli* (หลังได้รับแสงยูวี 40 นาที) และ (ฉ) *S.aureus* (หลังได้รับแสงยูวี 60 นาที) ของฟิล์ม TSN20 119

รูปที่ 85 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของคาร์โบฟูราน โดยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0= 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 120

รูปที่ 86 กราฟแสดงการดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัม ต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร 120

รูปที่ 87 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไนเตรต จากการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0= 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 121

รูปที่ 88 กราฟแสดงการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัม ต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร 122

รูปที่ 89 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้น (ก) ท่ออะคริลิคสำหรับบรรจุเส้นใยแก้ว และ (ข) หลอดแบล็คไลต์ 124

รูปที่ 90 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้น (ก) ภาพจากด้านข้างของกล่องภายใน และ (ข) ภาพจากด้านบนของกล่องภายใน 125

รูปที่ 91 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ (ก) ภาพจากด้านข้าง และ (ข) ภาพจากด้านหน้า 126

รูปที่ 92 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น (ก) กล่องภายใน และ (ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ 127

รูปที่ 93 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่าง กัน ($N_0 = 10^3$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร) 129

รายการรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 94 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่าง กัน โดยทดสอบกับกรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) 129

รูปที่ 95 ผลการทดสอบความคงทนของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังจากใช้งานเป็นเวลานาน ทดสอบกับเชื้อ *E.coli* (N_0 = 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที 130

รูปที่ 96 ภาพถ่ายเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตร TSN40 หลังจากใช้งานแล้วเป็นเวลา 600 ชั่วโมง เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) 500 เท่า (ข) 1,500 เท่า และ (ค) 5,000 เท่า 130

รูปที่ 97 ผลการทดสอบการดูดซับสารเคมีต่างๆ ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทดสอบกับ กรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) ไนเตรต (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที ..131

รูปที่ 98 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเครื่องปฏิกรณ์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ (N_0 = 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที 133

รูปที่ 99 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างกัน โดยทดสอบกับกรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไนเตรต (C_0 =20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที 133

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

2,4-DCP	2,4-ไดคลอโรฟีนอล
AFM	Atomic force microscopy
AF	แฟคเตอร์ความถี่ (นาที$^{-1}$)
AR	Alkali resistant
C	ความเข้มข้นของสารเคมีต่างๆ ณ เวลาทดสอบ
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเคมีต่างๆ
CFU/mL	โคโลนีต่อมิลลิลิตร
C.perfringen	*Clostridium perfringens*
BSG	Borosilicate glass
E_a	พลังงานกระตุ้น(จูลต่อโมล)
ECR	Corrosion-resistant E-glass
E_g	ค่าแถบช่องว่างพลังงาน)อิเล็กตรอนโวลต์(
E.coli	*Escherichia coli*
E_r	พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบในหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะ
FA	กรดฟัลวิค
FTIR	Fourier transformed infrared spectrophotometer
GF	เส้นใยแก้ว (Glass fiber)
GRP	Glass fiber reinforce polyester
h	ค่าคงตัวของพลังค์ (6.626×10^{-34} จูล.วินาที)
HA	กรดฮิวมิค
K	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา
N	จำนวนเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลาทดสอบของ (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)
N_0	จำนวนเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น(โคโลนีต่อมิลลิลิตร)
P_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (1.0×10^{-4} โมลาร์)
PMMA	Polymethylmethacrylate
P_t	ความเข้มข้นของฟอสเฟต ณ เวลาทดสอบ
PVA	Polyvinyl alcohol

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ(

PVP	โพลีไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส)8.314 จูล(เคลวิน.โมล/
t	ขนาดผลึก(นาโนเมตร)
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
T	TiO_2
TEOS	Tetraethyl orthosilicate
THMs	Trihalomethane
TS	$TiO_2/3SnO_2$
TSN	$TiO_2/3SnO_2/N$
TSN10	$TiO_2/3SnO_2/10N$
TSN20	$TiO_2/3SnO_2/20N$
TSN30	$TiO_2/3SnO_2/30N$
TSN40	$TiO_2/3SnO_2/40N$
TSP	$TiO_2/3SnO_2/PVP$
TSP10	$TiO_2/3SnO_2/10PVP$
TSP20	$TiO_2/3SnO_2/20PVP$
TSP30	$TiO_2/3SnO_2/30PVP$
TSP40	$TiO_2/3SnO_2/40PVP$
TTIP	Titanium (IV) isopropoxide
S.aureus	*Stapphylococcus aureus*
SEM	Scanning electron microscope
S.typhi	*Salmonela typhi*
UV	Ultraviolet
UV-Vis	Ultraviolet-visible spectrophotometer
UV-Vis DRS	UV-visible diffuse reflectance spectroscopy
XRD	X-ray diffractrometer
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์(นาโนเมตร)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ(

β	Line width at half maximum height(เรเดียน)
θ	มุมสะท้อน (เรเดียน)
ν	ความถี่ของแสง) เฮิรตซ์(

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

น้ำดื่มเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตมนุษย์อย่างยิ่ง ซึ่งในร่างกายของคนเราจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำจะนำสารอาหาร วิตามิน เกลือแร่และออกซิเจนเข้าสู่ร่างกาย ทำให้อวัยวะต่างๆ ทำงานได้อย่างเต็มที่และน้ำจะช่วยพาของเสียไปทิ้งที่ไต ปอด ผิวหนัง และที่ลำไส้ในรูปของปัสสาวะ ลมหายใจออก เหงื่อและอุจจาระ ดังนั้นสุขภาพที่ดีจึงเกี่ยวข้องกับคุณภาพและปริมาณของการดื่มน้ำ การดื่มน้ำที่สะอาดให้เพียงพอจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง โดยน้ำที่สะอาดจะต้องใส ไม่มีสิ่งปนเปื้อน ปราศจากกลิ่น รส อันเป็นที่น่ารังเกียจ ไม่มีเชื้อโรคที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วยและมีแร่ธาตุตามธรรมชาติผสมอยู่บ้าง เพราะแร่ธาตุบางอย่างมีประโยชน์และจำเป็นต่อร่างกาย แต่ที่สำคัญน้ำจะต้องไม่มีสิ่งปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำบริโภค

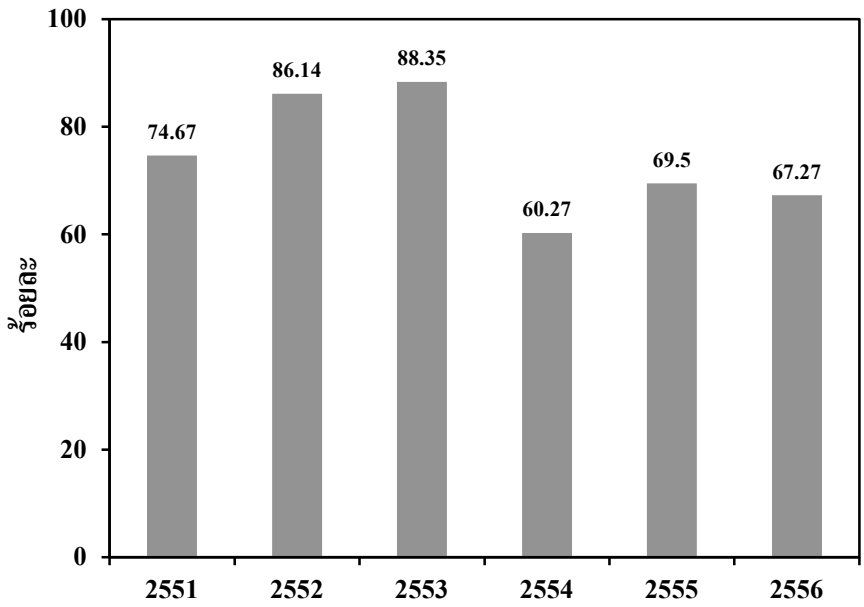
โลกของเราประกอบด้วยพื้นที่น้ำมากถึง 2 ใน 3 แต่มีเพียงร้อยละ 1 เท่านั้นที่เป็นน้ำจืดและสามารถนำมาเป็นน้ำเพื่ออุปโภคและบริโภคได้ ซึ่งกว่าน้ำจะมาถึงผู้บริโภคนั้น น้ำได้ไหลผ่านสิ่งต่างๆ มากมาย พร้อมปนเปื้อนมากับโลหะหนัก เชื้อโรคและสารเคมีต่างๆ ทำให้น้ำไม่สะอาดพอสำหรับอุปโภคและบริโภค จากอัตราการเพิ่มประชากรของโลกและการปล่อยสารเคมีออกมาในสิ่งแวดล้อม ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาน้ำดื่มในอนาคตมากยิ่งขึ้น โดยข้อมูลจากองค์การอนามัยโลกระบุว่า ประชากรโลกป่วยจากการดื่มน้ำปนเปื้อนอุจจาระ ปีละ ประมาณ 1,800 ล้านคน เช่น โรคอุจจาระร่วง บิด อหิวาตกโรคและไทฟอยด์ เป็นต้น และมีผู้เสียชีวิตปีละประมาณ 500,000 คน เฉลี่ยมีคนเสียชีวิตนาทีละ 1 คน ในส่วนของประเทศไทย สำนักระบาดวิทยารายงานในปี 2557 พบผู้ป่วยโรคอุจจาระร่วงและโรคบิด ซึ่งมีสาเหตุจากการดื่มน้ำไม่สะอาดทั่วประเทศประมาณ 1 ล้านคนและเสียชีวิต 8 คน (สำนักสารนิเทศ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2558)

สถานการณ์น้ำดื่มในประเทศไทยจากผลการสำรวจข้อมูลและสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำบริโภคในครัวเรือนทั่วประเทศจากทุกแหล่งน้ำบริโภคที่ประชาชนใช้ในครัวเรือน ระหว่างปี 2551–2556 จำนวน 4,423 ตัวอย่าง ของกลุ่มวิจัยและพัฒนาคุณภาพน้ำบริโภค สำนักสุขาภิบาลอาหารและ

น้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข พบว่า คุณภาพน้ำบริโภคไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาแยกคุณภาพทางด้านกายภาพ ด้านเคมีและด้านแบคทีเรีย พบว่า ไม่ผ่านมาตรฐานเฉลี่ยร้อยละ 22.81, 16.59 และ 82.58 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโดยจำแนกตามประเภทของแหล่งน้ำ ได้แก่ น้ำประปา น้ำดื่มบรรจุขวด น้ำบ่อตื้น น้ำบ่อบาดาล น้ำฝนและน้ำตู้หยอดเหรียญ พบว่า น้ำบริโภคไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แสดงในตารางที่ 1 จากผลการสำรวจดังกล่าวจะเห็นได้ว่าคุณภาพของน้ำสำหรับบริโภคของคนไทยไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเกินกว่าครึ่ง โดยไม่ผ่านมาตรฐานด้านแบคทีเรียมากที่สุด ซึ่งปัญหาดังกล่าวก็ส่งผลทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารและอาจก่อให้เกิดโรคอื่นๆ ตามมาในระยะยาวได้

ปัจจุบันนี้มีการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของน้ำโดยใช้เครื่องกรองน้ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้น้ำสะอาดและสามารถนำมาดื่มได้อย่างปลอดภัย โดยประเภทของเครื่องกรองน้ำพอจะจำแนกได้ ดังนี้ เครื่องกรองน้ำที่มีตัวดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เครื่องกรองน้ำระบบรีเวอร์ออสโมซีส (Reverse osmosis RO) เครื่องกรองน้ำที่ใช้หลักการกลั่น (Distillation filter) เครื่องกรองน้ำที่ใช้โอโซน (Ozone filter) เครื่องกรองน้ำที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet filter) เครื่องกรองน้ำที่ใช้หลักการตกตะกอน (Sediment filter) ระบบการแลกเปลี่ยนอิออนด้วย เรซิน (Ion–exchange resin) และเครื่องกรองน้ำที่ใช้ระบบการคัดกรอง (Filtration) เป็นต้น เครื่องกรองน้ำแต่ละชนิดก็มีจุดเด่นและข้อจัดกัดที่แตกต่างกันและมีการนำเอาหลายระบบมารวมกันเพื่อลดข้อจัดกัดและเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น ระบบโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ก็เป็นอีกระบบที่ยังไม่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากนัก โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีแสงมากระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ (Valence band) ไปสู่แถบการนำ (Conduction band) และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนมีพลังงานเพิ่มขึ้น เรียกออกซิเจนตัวนี้ว่าซุปเปอร์ออกไซด์อนุมูลลบ (Superoxide anion radical (O_2^-))ในแถบเวเลนซ์จะเกิดหลุมอิเล็กตรอน (Hole (h^+)) และหลุมอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำหรือความชื้นทำให้เกิด Hydroxyl radical ซึ่งอนุภาคทั้งสองนี้จะมีสมบัติในการออกซิเดชัน สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ให้แตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (Agustina et al.,2005) นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติที่เรียกว่า Bactericidal effects ซึ่งสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและสลายแบคทีเรียที่ตายแล้ว รวมทั้งสารพิษที่เกิดขึ้นหลังจากการฆ่าแบคทีเรียเหล่านั้น ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีกว่าสารต่อต้านแบคทีเรียตัวอื่นๆ อีกทั้งเป็นสารที่เสถียร ไม่เสื่อมสลาย แต่ยังคงสามารถทำงานได้ต่อไปเป็นระยะเวลานานตราบที่ยังคงมีแสง (พรนภา สุจริตวรกุล, 2548) กระบวนการโฟโตแคตะไลติกจึงมีจุดเด่นที่สำคัญ คือ สามารถย่อยสารอินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติที่เป็นต้นเหตุทำให้น้ำขุ่น สามารถย่อยสลาย

สารเคมีที่เป็นอันตรายบางชนิดที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้และสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารได้ด้วย จึงมีแนวโน้มที่จะนำระบบกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาการทำความสะอาดน้ำดื่ม โดยการทดสอบการการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำและทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบอยู่บนเส้นใยแก้ว ตลอดจนออกแบบต้นแบบเครื่องทำความสะอาดน้ำดื่มเพื่อให้ใช้งานได้ในระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 1 ร้อยละของคุณภาพน้ำบริโภคที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2551 – 2556 (กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข)

ตารางที่ 1 ร้อยละของคุณภาพน้ำบริโภคในประเทศไทย โดยจำแนกตามประเภทของแหล่งน้ำตั้งแต่ปี 2551–2556

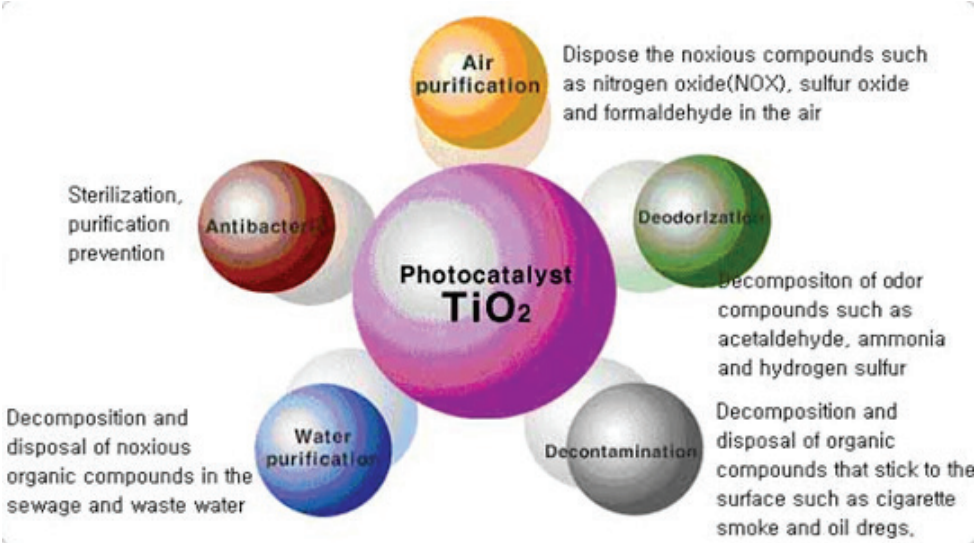
ประเภทน้ำ	ปี 2551	ปี 2552	ปี 2553	ปี 2554	ปี 2555	ปี 2556
น้ำประปา	53.33	78.26	86.67	46.67	43.77	32.35
น้ำดื่มบรรจุขวด 20 ลิตร	–	–	–	76.47	72.64	78.10
น้ำบ่อตื้น	88.57	95.45	96.23	96.08	52.55	91.26
น้ำบ่อบาดาล	95.65	93.75	93.54	92.31	79.59	79.34
น้ำฝน	90.53	92.59	85.71	80.53	86.5	78.57
น้ำตู้หยอดเหรียญ	–	66.67	–	42.31	50.00	51.02

ที่มา: จากรายงานสถานการณ์น้ำสะอาดเพื่อการบริโภคในประเทศไทย กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรกของตารางธาตุ ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ (รูปที่ 2) เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษและราคาไม่แพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางด้านการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น



รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด

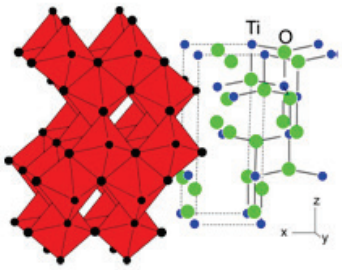
(ที่มา: http://www.onlinemarket.com.au/whatisnew/photocatalyst/:15/02/2554)

นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมแล้ว ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ตัวอย่างกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_X) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซินและสารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction กระบวนการสังเคราะห์สาร Fischer–Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ (SO_2) เป็นต้น

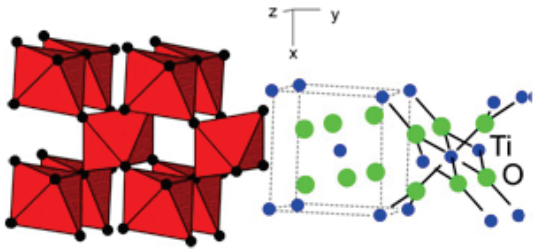
1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรก ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 3 ได้แก่ รูไทล์ อะนาเทสและบรู๊คไคต์ ซึ่งรูไทล์และอะนาเทสมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนบรู๊คไคต์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิค (Orthorhombic) (ตารางที่ 2) อะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 อิเล็กตรอนโวลต์) ทำให้อะนาเทสมีสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ เพราะอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมอิเล็กตรอนเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ไทเทเนียม

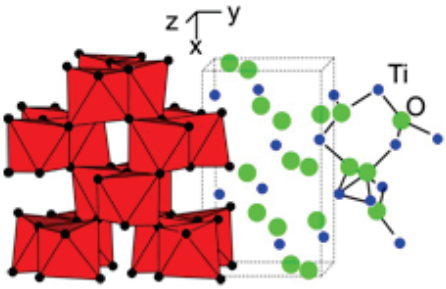
ไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสจะมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ (Yang et al., 2002) สมบัติที่ส่งผลต่อการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนซึ่งจะให้ผลปฏิกิริยาดีมากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำคู่กัน เช่นในระบบของ TiO_2/SnO_2 จากการศึกษาของ Yang และคณะ (2002) พบว่า ระบบของ TiO_2/SnO_2 เป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีเนื่องจากมี Quantum yield สูง และมีความแตกต่างของแถบการนำใน TiO_2 และ SnO_2 ส่งผลให้มีการแยกของ Photoinduce e^-–hole pair และยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะป้องกันการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาและในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย



(ก) อะนาเทส



(ข) รูไทล์



(ค) บรู๊คไคต์

รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรู๊คไคต์ (ที่มา: http://www.staff.aist.go.jp/.../english/itscgallary–e.htm: 19/11/2553)

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Meagher et al., 1979)

Material name			Rutile			
Composition			TiO_2			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
a(Å), *b*(Å), *c*(Å)			4.593(2)	4.593(2)	2.959(2)	
α(deg), β(deg), γ(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	2*a*	1	0	0	0	0.42(6)
O	4*f*	1	0.3051(7)	0.3051(7)	0	0.6(6)

ตารางที่ 1.2 (ต่อ) (Horn et. al., 1972)

Material name			Anatase			
Composition			TiO_2			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
a(Å), *b*(Å), *c*(Å)			3.7842(13)	3.7842(13)	9.5146(15)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å^3)			136.3			
D_x (g/cm^3)			3.89			
Space group			$I4_1/amd$ (No.141)			
Atom	Site	*G*	*x*/*a*	*y*/*b*	*z*/*c*	*B* (Å^2)
Ti	4*a*	1	0	0	0	0.390(63)
O	8*e*	1	0	0	0.2081(2)	0.613(90)

ตารางที่ 1.2 (ต่อ) (Meagher et al., 1979)

Material name			Brookite			
Composition			TiO_2			
System			Orthorhombic			
Temperature (°C)			25			
a(Å), *b*(Å), *c*(Å)			9.174(2)	5.449(2)	5.138(2)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å^3)			257			
D_x (g/cm^3)			4.13			
Space group			*Pbca* (No.61)			
Atom	Site	*G*	*x*/*a*	*y*/*b*	*z*/*c*	*B* (Å^2)
Ti	8*c*	1	0.1289(1)	0.0972(1)	0.8628(1)	0.37(3)
O	8*c*	1	0.0095(4)	0.1491(5)	0.1835(5)	0.46(6)
O	8*c*	1	0.2314(4)	0.1110(4)	0.5366(6)	0.53(7)

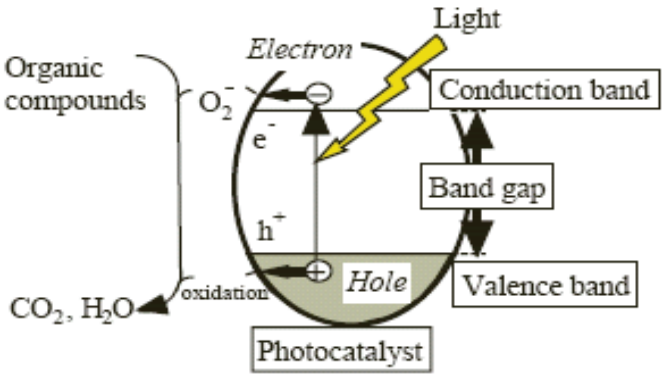
โครงสร้างผลึกของอะนาเทส รูไทล์ และบรู๊คไคต์ สามารถแสดงได้ในรูปของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลและโครงสร้างผลึกของบรู๊คไคต์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล (รูปที่ 1.2)

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่ 3 ชนิด ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส (ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์, 2551) และมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะนาเทสเป็นรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ หรือ

เซรามิกที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) นอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกดังกล่าว ได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก ในการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทสและรูไทล์นิยมนำมาศึกษากันโดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา การมีโครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ (เช่น อะนาเทส 70–75 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 25–30 เปอร์เซ็นต์) ก็มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทสเพียงอย่างเดียว โดยมีตัวแปรหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคและที่สำคัญมาก คือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์, 2551)

ลักษณะของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n–type semiconductor) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดัคชัน(Oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำจะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดัคชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมอิเล็กตรอนที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง (ที่มา: http://believerwoman.wordpress.com/2007/08/01/what–is–hydrosyntetic–photocatalyst:28/11/2553)

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงาน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน หลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอะนาเทสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแตกต่างกัน คือ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับโครงสร้างผลึกอะนาเทส และ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์, 2551)

2) ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic effect)

ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตแคตะลิสต์ (Photocatalyst) จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของสารกึ่งตัวนำ หลักการเกิดปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติก คือ เมื่อวัสดุโฟโตแคตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นและกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ ทำให้ในแถบเวเลนซ์

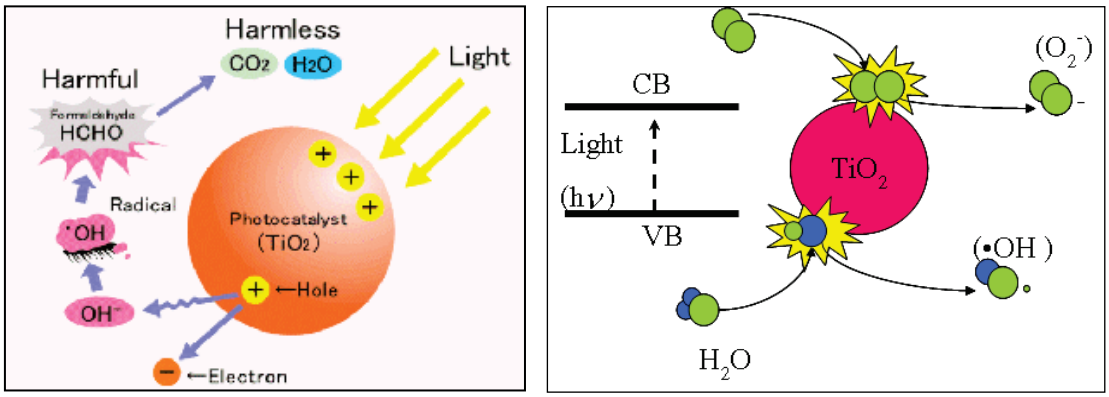
เกิดหลุมอิเล็กตรอนขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล ($OH^{\cdot}$) และซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน (O_2^-) ดังแสดงในสมการ (1.1)–(1.3) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตแคตะลิสต์

$$TiO_2 + h*V \rightarrow e_{cb} + h^+_{vb} \qquad \text{.....(1.1)}$$

$$O_2 + e_{cb} \rightarrow O_2^- \qquad \text{.....(1.2)}$$

$$H_2O + h^+_{vb} \rightarrow OH\cdot + H^+ \qquad \text{.....(1.3)}$$

ไฮดรอกซิลเรดิคอลและซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา: www.antonio.licciulli.unile.it: 10/01/2553)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกใช้เป็นโฟโตแคตะลิสต์อย่างแพร่หลาย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นพิษ มีสมบัติทางเคมีที่เสถียร มีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่สูงและมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ในขณะเดียวกันผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) สูงด้วย ซึ่งมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มที่เคลือบด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า 0 องศา ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี โดยปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างในผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์จะหลุดและเกิดหลุมอิเล็กตรอนขึ้น ซึ่งหลุมอิเล็กตรอนจะตอบสนองต่อผิวของอะตอมออกซิเจนและเกิดหมู่ไฮดรอกซิล จากปรากฏการณ์นี้จึงมีการนำไป

ประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ เช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้องหรือการป้องกันหมอกจับกระจกรถยนต์ตอนอากาศเย็น (Kanai et al., 2004; Hubbell et al., 2005)

มีการศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทสอย่างกว้างขวาง โดยมีการเจือสารลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเน้นไปทางด้านสิ่งแวดล้อมและการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปศึกษาการทำลายเชื้อโรคและกำจัดเซลล์มะเร็ง ซึ่งเป็นโรคที่มีอัตราการตายของคนมากเป็นอันดับต้นๆ (Blake et al., 1999) รูปแบบของโฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้งาน อาจอยู่ในรูปอนุภาคหรืออยู่ในรูปฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุที่ต้องการทดสอบก็ได้

3) ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลซีส

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลซีส ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายและความเข้มของแสง (Bing et al., 1999; Fox et al, 1993; Stafford et al., 1996; Tang et al., 1997; Venkatadri et al., 1993)

1. ค่าพีเอช

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลซีสขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำและมีค่าเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลาง (Point of zero charge) คือ 6.0–6.3 และหลุมอิเล็กตรอนจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลซีส เมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลแรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 3 และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้แถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 มิลลิโวลต์ต่อหนึ่งหน่วยพีเอช

2. ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารปนเปื้อนและยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะโดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลาย ก็จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซีสลดลงเนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลง ทั้งนี้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชันส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1–5 กรัมต่อลิตร

3. อุณหภูมิ

จากข้อมูลทางจลศาสตร์ อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียสเขียนได้ดังนี้

$$K = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \qquad \text{..... (1.4)}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, นาที$^{-1}$ (Reaction rate constant, min^{-1})

A = แฟคเตอร์ความถี่, นาที$^{-1}$ (Frequency factor, min^{-1})

E_a = พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล (Activation energy, J mole^{-1})

R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (Absolution temperature, K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมที่พล็อตระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (K) กับค่า 1/T (Reutergadh et al., 1997; Serpone et al., 1989)

$$InK = \frac{E_a}{RT} + InA \qquad \text{..... (1.5)}$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซีสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนกับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน ซึ่งความถี่ในการชนกันของโมเลกุลก็มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซีส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับอิเล็กตรอนที่แถบการนำ ทำให้เกิดซุปเปอร์ออกไซด์แรดิคัลและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนอิออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงเป็นตัวยืดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ระหว่างอิเล็กตรอนกับหลุมอิเล็กตรอนและออกซิเจนจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลอีกด้วย

5. ความเข้มของแสง

เนื่องจากความเข้มของแสง คือ พลังงานต่อหน่วยเวลา นั่นคือ อนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ (ν) จะมีพลังงาน (E) = $h\nu$ หรือคิดเป็น 1 ควอนตัม ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_r ดังนี้

จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ = <u>พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ</u> …… (1.6)

พลังงานของแสง 1 โฟตอน

= $E_r/h\nu$ …… (1.7)

จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที = ความเข้มแสง/ $h\nu$ …… (1.8)

การกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิดอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ระดับความเข้มแสงต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสงและที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง (Ollis et al., 1991; Tseng et al., 1991) ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงรังสียูวี (Ultraviolet, UV) เป็นสัดส่วนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) มีความยาวคลื่นระหว่าง 100 ถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งแสงแดดประกอบด้วยความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. ยูวีซี (Ultraviolet C) มีความยาวคลื่น 100–290 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้โดยมากจะถูกดูดซับโดยก๊าซโอโซนในบรรยากาศ ฉะนั้นแสงยูวีมาถึงโลกจะอยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่น 290–400 นาโนเมตร

2. ยูวีบี (Ultraviolet B) มีความยาวคลื่น 290–320 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวเกรียมแดดและผิวหนังอักเสบ เป็นตัวหลักที่ทำให้ผิวแก่ก่อนวัย และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้เร็วขึ้น

3. ยูวีเอ (Ultraviolet A) มีความยาวคลื่น 320–400 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวคล้ำแดดโดยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน แต่ไม่ทำให้เกิดการอักเสบ

4. แสงสีขาว (Visible light) มีความยาวคลื่น 400–800 นาโนเมตร

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

4) การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซีสในการบำบัดมลพิษ

กระบวนการโฟโตแคตะไลซีสเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการกำจัดสารพิษ และเป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่มีความอันตรายจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้มีได้หลากหลายดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 มลสาร (Pollutant) ที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซีส (Hoffman et al., 1995; Yang et al., 2006)

ประเภทของมลสาร	ตัวอย่าง
สารอินทรีย์	benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, phenols, trichloroethylene และสารระเหยจำพวก halogenated hydrocarbon, PCBs (polychlorinated biphenyls), DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane), dioxins, สารฆ่าแมลงและสารปราบศัตรูพืช, ลิกนิน,สารลดแรงตึงผิว humic acids (HA)
สารอนินทรีย์	cyanide, hydrogen sulfide, mercury, cadmium, chromium (Cr^{+6}), sulfite, manganese, lead, zinc, copper, arsenic
เชื้อโรค	*Escherichia coli, Lactobacillus acidophilus, Saccharomyces cerevisiae, Fecal coliform*

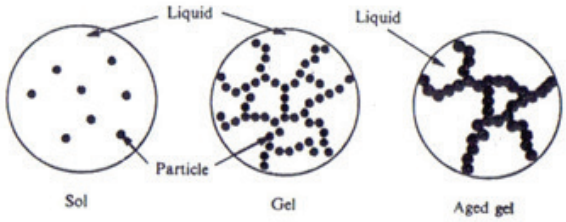
ตารางที่ 4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซีสในการบำบัดสารมลพิษ (Hoffman et al., 1995)

ชนิดของตัวกลาง	**การประยุกต์ใช้**
น้ำ	- การฆ่าเชื้อโรค - การย่อยสลายปราบศัตรูพืช - กำจัดมลสารอนินทรีย์ - ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ - ย่อยสลายสี - สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	- ลดกลิ่นภายในอาคาร - ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	- บำบัดยาฆ่าแมลง - ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในด้านการบำบัดสารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์มากกว่าที่จะใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่เป็นสารอนินทรีย์ รวมถึงนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคด้วย ดังแสดงได้ในตารางที่ 4 (สุจิตรา นาวารัตน์, 2553)

1.2.2. กระบวนการโซล–เจล

กระบวนการผลิตด้วยวิธีโซล–เจล เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกแก้วและโดยเฉพาะวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซล–เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1–1.0 ไมโครเมตร เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล
(ที่มา: http://phys.suwan.ac.kr/jgyoon/lab/solgel.ht; and Scherer, 1990: 1/01/2553)

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

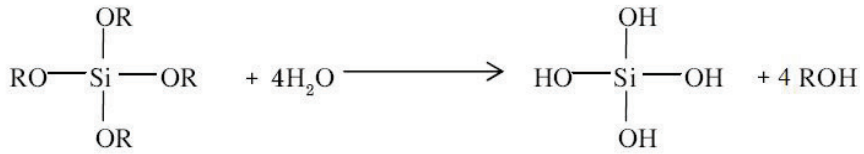
Hydrolysis: $M-O-R+H_2O \rightarrow M-OH+R-OH$ .....(1.9)

Water Condensation: $M-OH+HO-M \rightarrow M-O-M+H_2O$ .....(1.10)

AlcoholCondensation: $M-O-R+HO-M \rightarrow M-O-M+R-OH$ .....(1.11)

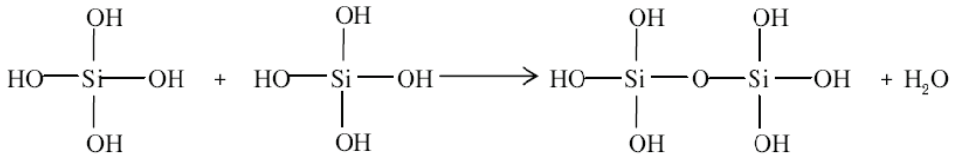
ขั้นตอนแรกของการทำโซล–เจล คือ ผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล–เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะบางชนิดที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วนอัลคอกไซด์(Alkoxide) ชนิดอื่น เช่น อะลูมิเนต (Aluminate) ไทเทเนต (Titanate) และบอร์เรต (Borate) มีใช้กันแพร่หลาย

และมักใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $Si(OR)_4$ ซึ่ง R คือ CH_3(TMOS) C_2H_5(TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำดังสมการ



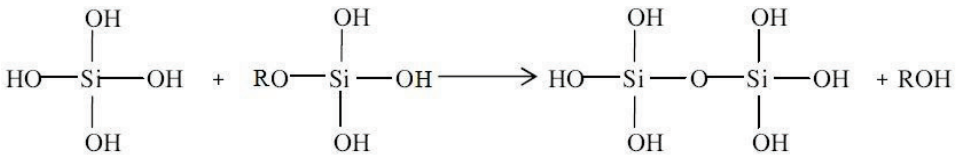
……..……(1.12)

และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นในน้ำ



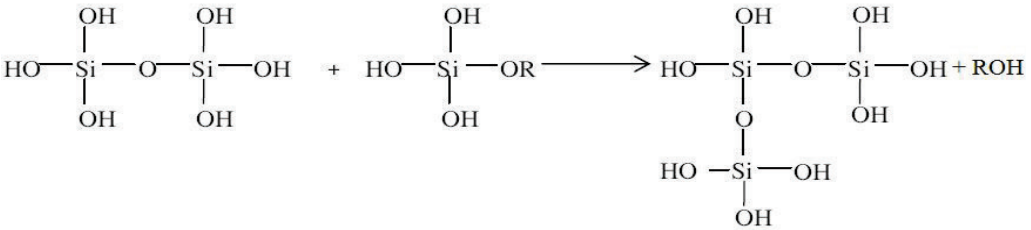
……...(1.13)

หรือ การควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์



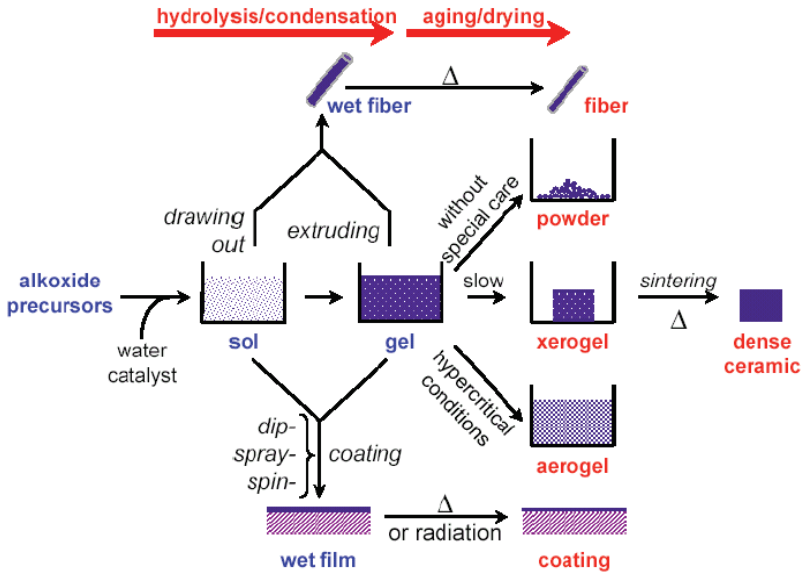
….(1.14)

สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อไปจนกลายเป็นโครงตาข่ายซิลิกา (Silica network) อยู่ในภาวะที่เรียกว่า เจล จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า พอลิคอนเด็นเซชัน



(1.15)

ในกระบวนการผลิตทั้งจากภาวะที่เป็น โซล หรือ เจล เมื่อเข้าสู่ภาวะทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) และฟิล์มเคลือบ (Coating film) เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 กระบวนการโซล–เจล

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

วิธีโซล–เจล ประกอบด้วยการเตรียมสารละลายเนื้อเดียวกัน เปลี่ยนสารละลายเป็นโซล สำหรับ TEOS ปฏิกิริยาจะเริ่มด้วยการไฮโดรไลซีสกลุ่ม Alkoxyl หนึ่งหรือมากกว่าของโมเลกุล TEOS ในการผลิตจะใช้น้ำและแอลกอฮอล์ 2 โมเลกุลประกอบด้วย OH –group จะถูกพอลิเมอไรซ์โดยกำจัดน้ำออก ทำให้เกิดการฟอร์มตัวด้วยพันธะ Si–O–Si และเมื่อต่อกับกลุ่มอื่นก็จะได้เป็นพันธะ Si–O–Si–O–Si การซ้ำกระบวนการทำให้ได้โมเลกุลเป็นเส้นยาวหรืออนุภาคเป็น 3 มิติที่โมเลกุลเส้นตรงและอนุภาคละเอียดประกอบด้วยพันธะซ้ำๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 1.6

ข้อดีของวิธี โซล–เจล

– ทำให้เกิดพันธะบางๆ ระหว่างวัสดุฐาน (Substrate) กับตัวสารเคลือบ

– สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้

– สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่ายๆ และที่มีรูปร่างซับซ้อน

– ทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง

– มีความบริสุทธิ์สูง

– ความเป็นเนื้อเดียวกัน

– เตรียมได้ด้วยอุณหภูมิต่ำ

การนำเทคโนโลยีโซล–เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้ว สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสงและการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล–เจล จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารและวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัว หรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่ หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล–เจล จะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลสามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล–เจล มาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมลักษณะและสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล–เจล เป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคได้จริง (เล็ก สีคง, 2547)

1.2.3 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

เส้นใยแก้ว ผลิตโดยให้แก้วหลอมหยดผ่านรูเล็กๆ และดึงให้ยืดออกด้วยพวยอากาศ แก้วมาตรฐานที่ใช้สำหรับเสริมแรงในวัสดุผสม คือ แก้วชนิด E (ชนิดโบโรซิลิเกต) ในกรณีที่ต้องการสมรรถนะเชิงกลสูงขึ้นจะใช้แก้วชนิด R และชนิด S สำหรับทนต่อกรดและเบส จะใช้แก้ว ECR และ AR แก้วชนิด C จะทนต่อสารเคมีใช้เป็นวัสดุผสมชนิด GRP ในการทำโครงสร้างและบุผนังด้านในจะใช้แก้วชนิด E และ ECR ชนิดเส้นใยต่อเนื่อง ส่วนประกอบของแก้วชนิดต่างๆ ที่ใช้สำหรับทำเส้นใยแก้วที่กล่าวแล้ว แสดงดังตารางที่ 5 เส้นใยแก้วที่ผลิตจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5–25 ไมโครเมตร จะทำเป็นเกลียว ซึ่งมีความแข็งแรงดึง 5 จิกะพาสคาล เส้นใยแก้วขนาดสั้นใช้สำหรับเป็นฟิลเลอร์ในเรซินพอลิเมอร์สำหรับการหล่อพิมพ์ กลุ่มของเส้นใยอาจถูกสานเป็นรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการเสริมแรงหรืออาจถักเป็นรูปแบบต่างๆ

สำหรับเส้นใยที่จัดเรียงแบบสุ่มต่อเนื่องและเส้นใยขนาดสั้น จะต้องใช้ไบเดอร์เพื่อให้เส้นใยเกาะติดกับเนื้อเมทริกซ์ของวัสดุผสม ไบเดอร์สำหรับเส้นใยแก้วชนิด E ได้แก่ PVA อิมัลชั่นสำหรับแก้วชนิด C ได้แก่ พอลิอคริเลต หรือ พอลีสไตรีน สำหรับเมทริกซ์ชนิดอิพ๊อกซี่ หรือ พอลิเอสเตอร์ ส่วนใหญ่ไม่ต้องใช้ไบเดอร์ (เล็ก สีคง, 2547)

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบและสมบัติของแก้วชนิดต่างๆ ที่ทำเป็นเส้นใยเสริมแรง (เล็ก สีคง, 2547)

	ส่วนประกอบ (%โดยน้ำหนัก)						
	A	C	E	ECR	R	S	AR
SiO_2	72.0	64.6	52.4	58.4	60.0	64.4	61.0
Al_2O_3	1.2	4.1	14.0	11.0	25.0	25.0	0.5
CaO	10.0	13.4	17.2	22.0	9.0	–	5.0
MgO	2.5	3.3	4.6	2.2	6.0	10.3	0.05
Na_2O, K_2O, Li_2O	14.2	9.6	0.8	0.9	–	–	14.0
B_2O_3	–	4.7	10.6	0.09	–	–	–
BaO	–	0.9	–	–	–	–	–
ZnO	–	–	–	3.0	–	–	–
ZrO_2	–	–	–	–	–	–	13.0
TiO_2	–	–	–	2.1	–	–	5.5
Fe_2O_3	0.3	–	0.4	0.26	–	–	0.5
ความถ่วงจำเพาะ	2.45	2.45	2.56	2.6	2.58	2.49	2.74
ดัชนีหักเหแสง	1.51	1.52	1.54	–	–	1.52	1.56
ความแข็งแรงดึงของเส้นใยเส้นเดียว (GPa)	3.1	–	3.6	3.4	4.4	4.5	2.5
มอดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย (GPa)	72.0	–	76.0	73.0	85.0	86.0	80.0
จุดอ่อนตัว (°C)	700	690	850	900	990	1000	860

1.2.4 ถ่านกัมมันต์(Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ คือ วัตถุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูงเป็นการนำเอาวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง ซึ่งหากดูที่พื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก 87–90 เปอร์เซ็นต์ และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบ คือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากก๊าซและของเหลวได้ในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้น

สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยอาจใช้ในกระบวนการทางสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันมาก

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) แต่ถูกทำขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาโดยเครื่อง XRD (X–ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซเรย์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่น ๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้หรือถ่านแกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงอันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง โครงสร้างผิวเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูง

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้เป็นรูพรุนหรือโครงสร้างภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูงและมีความสามารถในการดูดซับสูงด้วยเช่นกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กระทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้ สมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจกระทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area) ลักษณะของตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด–เบส อุณหภูมิและเวลาในการสัมผัส (รุจิรา, 2556)

1.2.5 ปัญหาสิ่งปนเปื้อนในน้ำดื่ม

1. ปัญหาน้ำดื่มปนเปื้อน จุลินทรีย์ โลหะหนักและสารเคมี

จากการสุ่มตรวจวิเคราะห์น้ำดื่มโรงเรียนในเขตเทศบาล และโรงเรียนในเขตชนบท โดยศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ 14 แห่ง ทั่วประเทศ และสำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร เป็นผู้ดำเนินการ ในช่วงระหว่างเดือน มี.ค.–ส.ค. 2549 ที่ผ่านมา น้ำดื่มที่เก็บตัวอย่างจากโรงเรียนในเขตชนบท ได้แก่ โรงเรียนในจังหวัด เชียงใหม่ เชียงราย พิษณุโลก ขอนแก่น อุดรธานี นครราชสีมา อุบลราชธานี สมุทรสงคราม โรงเรียนในเขตเทศบาล ได้แก่ โรงเรียนในจังหวัด ชลบุรี นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี ตรัง ภูเก็ต เชียงราย นครราชสีมา และสงขลา ผลการศึกษา พบว่า คุณภาพน้ำดื่มในโรงเรียนในภาพรวมถูกต้องตามมาตรฐานเพียง 36.88 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น แต่ต่ำกว่ามาตรฐานถึง 63.12 เปอร์เซ็นต์ หรือต่ำกว่ามาตรฐานถึง 457 แห่ง จาก 724 แห่ง โดยคุณภาพน้ำดื่ม

ในโรงเรียนในภาพรวมต่ำกว่ามาตรฐานด้านเคมี 32.32 เปอร์เซ็นต์ ต่ำกว่ามาตรฐานด้านจุลชีววิทยา 22.79 เปอร์เซ็นต์ ต่ำกว่ามาตรฐานทั้งด้านเคมีและจุลชีววิทยา 8.01 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกเป็นน้ำดื่มในโรงเรียนเขตชนบท พบว่า ต่ำกว่ามาตรฐานสูงถึง 70.73 เปอร์เซ็นต์ หรือ 360 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 509 ตัวอย่าง น้ำดื่มในชนบทส่วนใหญ่ต่ำกว่ามาตรฐานด้านเคมี 41.65 เปอร์เซ็นต์ ด้านจุลชีววิทยา 20.63 เปอร์เซ็นต์ และต่ำกว่ามาตรฐานทั้ง 2 ด้าน 8.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำดื่มในโรงเรียนเขตเทศบาล พบว่า ต่ำกว่ามาตรฐาน 45.12 เปอร์เซ็นต์ หรือ 97 ตัวอย่าง จาก 215 ตัวอย่าง โดยส่วนใหญ่ต่ำกว่ามาตรฐานด้านจุลชีววิทยา 27.91 เปอร์เซ็นต์ ด้านเคมี 10.23 เปอร์เซ็นต์ และต่ำกว่ามาตรฐานทั้ง 2 ด้าน 6.98 เปอร์เซ็นต์

สำหรับแหล่งน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตชนบท พบว่า มีความหลากหลายกว่าโรงเรียนในเขตเมือง โดย 84.07 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำบาดาลที่นำมาทำประปาหมู่บ้าน ซึ่งมีการจัดสร้างโดยงบประมาณของหลายหน่วยงาน เช่น กรมอนามัย กรมโยธาธิการ สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท กรมทรัพยากรธรณี (รพช.) ส่วนที่เหลือมาจากน้ำผิวดิน 10.28 เปอร์เซ็นต์ น้ำฝน 2.62 เปอร์เซ็นต์ แม่น้ำ 1.01 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ อีก 2.02 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่โรงเรียนในเขตเมืองส่วนใหญ่จะมีแหล่งน้ำดื่มจากน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค 92.70 เปอร์เซ็นต์ และน้ำถัง 7.30 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จากการสำรวจ พบว่า น้ำบรรจุถังที่โรงเรียนจัดซื้อต่ำกว่ามาตรฐานถึง 61.90 เปอร์เซ็นต์ น้ำที่มาจากแหล่งน้ำของการประปาส่วนภูมิภาคต่ำกว่ามาตรฐานถึง 34.55 เปอร์เซ็นต์ โดยมีสาเหตุสำคัญมาจากการดูแลความสะอาดเครื่องทำน้ำเย็นของโรงเรียนในเขตเมืองและการทำความสะอาดระบบการกรองน้ำดื่มในโรงเรียน

ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำดื่มในโรงเรียนพบทั้งสารเคมี โลหะหนัก และเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคต่อระบบทางเดินอาหาร เกินมาตรฐานความปลอดภัย ประกอบด้วย สารตะกั่ว พบจำนวน 12 แห่ง แคดเมียม พบ 12 แห่ง แมงกานีส พบ 4 แห่ง อะลูมิเนียม พบ 3 แห่ง ฟลูออไรด์ พบ 3 แห่ง ไนเตรท พบ 104 แห่ง เหล็ก พบ 87 แห่ง ความกระด้าง พบ 64 แห่ง ส่วนเชื้อจุลินทรีย์ พบ เชื้อแบคทีเรีย *E.coli* 83 แห่ง *S.aureus* พบ 3 แห่ง *S.typhi* พบ 6 แห่ง และ *C.perfringen* พบ 35 แห่ง

เหตุผลหนึ่งที่ทำให้น้ำดื่มมีการปนเปื้อนสูงทั้งสารเคมี โลหะหนัก และเชื้อจุลินทรีย์ เพราะการจัดการสิ่งแวดล้อมไม่ดี โดยเฉพาะปุ๋ยเคมี ทำให้แหล่งน้ำมีปริมาณสารไนเตรทสูง จนไม่ปลอดภัยในการบริโภค นอกจากนี้จากการสำรวจ พบว่า มีโรงเรียน 2 แห่งใช้ตะกั่วบัดกรีเชื่อมภาชนะเก็บน้ำดื่มโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ (ที่มา http://www.clinicdek.com/index .php?Option =com_content&task=view&id =672&Itemid=2)

2. การปนเปื้อนของสารเคมีจากอุตสาหกรรม

จากรายงานของสถาบันมะเร็งแห่งชาติปี 2542 พบว่า ประชาชนจังหวัดระยองมีสถิติผู้ป่วยมะเร็งสูงที่สุดของประเทศไทยและจากรายงานผลการตรวจอากาศและสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำของกรมควบคุมมลพิษ โดยกรมควบคุมมลพิษติดตั้งสถานีตรวจวัดอากาศ 6 แห่งในเขตมาบตาพุด ระหว่างเดือนกันยายน 2549 ถึงกันยายน 2552 โดยตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC, volatile organic compound) จำนวน 9 ชนิด ด้วยวิธีนำค่าที่วัดได้ 24 ชั่วโมงมาเฉลี่ย ผลการตรวจพบว่า มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย จำนวน 6 ชนิด ปนเปื้อนในระดับที่สูงไม่เกินมาตรฐาน คือ ไวนิลคลอไรด์, ไดคลอโรมีเทน, คลอโรฟอร์ม, ไตรคลอโรเอทธิลีน, 1,2–ไดคลอโรโพรเพนและ เตตระคลอโรเอทิลีน ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 3 ชนิด คือ 1,3–บิวทาไดอีน, เบนซีน และ 1,2–ไดคลอโรมีเทน พบว่า มีการปนเปื้อนในระดับสูงเกินมาตรฐาน ซึ่งสารเคมีดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็งในคนจำแนกโดย International Agency for Research on Cancer (IARC) ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization) ได้จัดจำแนกความเป็นพิษของสารเคมีที่ก่อมะเร็งไว้หลายระดับ ซึ่งสารเคมีที่พบสูงเกินมาตรฐานของจังหวัดระยอง คือ 1,3–บิวทาไดอีนและเบนซิน จัดเป็นสารก่อมะเร็งกลุ่มที่ 1 คือ ก่อมะเร็งในคน (Carcinogenic to humans) ส่วน 1,2–ไดคลอโรมีเทน นั้นเป็นสารก่อมะเร็งประเภท กลุ่ม 2B คือ อาจก่อมะเร็งในคน (Possibly carcinogenic to humans) อย่างไรก็ตามสารอีก 6 ชนิด ถึงแม้จะพบค่าเฉลี่ยสูงไม่เกินมาตรฐานแต่บางช่วงเวลาก็ตรวจพบสูงเกินมาตรฐานเมื่อนำมาเฉลี่ย 24 ชั่วโมงจึงมีค่าไม่เกินมาตรฐาน แต่อากาศที่ปนเปื้อนเหล่านั้นคนที่พักอาศัยในบริเวณนั้นได้สูดดมเข้าไปทางลมหายใจเรียบร้อยแล้ว นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อนของโลหะหนักและสารเคมีหลายชนิดในแหล่งน้ำธรรมชาติ และน้ำบ่อตื้นของประชาชน ซึ่งเป็นผลการตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษและรายงานการศึกษาของหน่วยงานอื่น จึงสอดคล้องกับสถิติของผู้ป่วยมะเร็งของจังหวัดระยอง โรคภูมิแพ้โดยเฉพาะที่พบในเด็ก และรายงานความผิดปกติของทารกแรกคลอด (www.oknation.net)

3. การปนเปื้อนของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช

ด้วยเหตุที่ผลกระทบของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชต่อสิ่งแวดล้อมเป็นต้นทุนที่ไม่ได้รวมอยู่ในราคาซื้อขาย การใช้สารเคมีจึงกลับกลายเป็นการผลักภาระของผลกระทบไปสู่ภายนอกระบบนิเวศที่ถูกทำให้เปราะบางลงไม่สามารถรักษาความสมดุลในธรรมชาติและส่งผลต่อแนวโน้มการระบาดของศัตรูพืชที่นับวันจะรุนแรงและถี่ยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชประเมินได้จาก 3 เกณฑ์สำคัญ คือ ฤทธิ์ในการฆ่าศัตรูพืช ความเจาะจง และเวลาของการตกค้าง อย่างไรก็ตามเกษตรกรผู้ใช้ส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับมิติแรกของประสิทธิภาพมากกว่า จึงทำให้สารเคมีที่มีฤทธิ์ทำลายในวงกว้าง (Broad–based spectrum) เช่น ไกลโฟเสตและคาร์โบฟูราน ถูก

นำเข้าและใช้มากที่สุดในประเทศ (สถิติการนำเข้าวัตถุอันตราย, สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร) เมื่อสารเคมีที่มีพิษร้ายแรงเหล่านี้กระจายสู่ระบบนิเวศ จะก่อให้เกิดความเสียหายที่หลากหลายต่อสภาพแวดล้อม รวมถึงสัตว์และพืชที่เป็นประโยชน์

พิษภัยของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชสร้างความเสียหายต่อระบบนิเวศอย่างหนักหน่วง ทั้งการลดลงของพืชคลุมดินบางชนิดและสัตว์ที่มีประโยชน์ รวมถึงตัวห้ำตัวเบียนที่กินศัตรูพืชเป็นอาหาร สารเคมีเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อสัตว์แต่ละชนิดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับฤทธิ์ของสารเคมี ความสามารถในการตกค้างในดินหรือน้ำ ลักษณะภายนอกของสารเคมี และลักษณะการใช้ของเกษตรกร เป็นต้น การศึกษาส่วนใหญ่ได้วิเคราะห์ผลกระทบของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชต่อสัตว์ 4 ชนิด คือ นก ไส้เดือน ปลา และผึ้ง ตั้งแต่การตีพิมพ์ของหนังสือ “เงามฤตยู” (Silent Spring) โดยเรเชล คาร์สัน ค.ศ. 1962 มีการศึกษาผลกระทบของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชต่อนกมากขึ้นและทำให้นกเป็นตัวชี้วัดสำคัญต่อความเสียหายจากสารเคมี เนื่องจากนกได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยการกินสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่อยู่ในรูปเม็ด การกินแมลงที่มีสารเคมีตกค้าง และการลดลงของแหล่งอาหารของนก เป็นต้น ข้อมูลสถิติในต่างประเทศ พบว่า ประชากรนกในพื้นที่เกษตรกรรมของยุโรปลดลงกว่าครึ่งหนึ่ง และนกป่าลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่ ค.ศ. 1980 ด้วยสาเหตุสำคัญจากสารเคมี (Isenring, 2010) ส่วนในสหรัฐอเมริกา ผลกระทบต่อนกก่อให้เกิดการแบนสารเคมีกำจัดศัตรูพืชหลายชนิด เช่น โมโนโครโตฟอส ไดอะซินอนและคาร์โบฟูราน

เมื่อสารเคมีกำจัดศัตรูพืชซึมลงสู่ดิน ไส้เดือนหรือสัตว์ในดินที่มีประโยชน์อื่นๆจะได้รับพิษโดยตรง ความสูญเสียของประชากรสัตว์เหล่านี้ทำให้ดินเสื่อมสภาพลง น้ำซึมผ่านลงดินได้ยากขึ้น สารอินทรีย์ในดินลดลง และส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชที่เพาะปลูก สารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีความเป็นพิษสูงต่อไส้เดือน ได้แก่ สารเคมีกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต กลุ่มคาร์บาเมท (โดยเฉพาะคาร์โบฟูราน และคาร์บาริล) และสารเคมีป้องกันโรคพืช (เช่น เมโนมิล และ คาร์เบนดาซิม) (Pennsylvania State University, 2008) ส่วนสารเคมีกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้ากว่า 70 เปอร์เซ็นต์ จากสารเคมีทั้งหมดในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่มีความเป็นพิษน้อยต่อไส้เดือน ยกเว้นสาร 2,4–ดีเพนดิเมทาลินและไซโรมาซีน ที่สามารถก่อให้เกิดพิษเมื่อได้รับในปริมาณสูง ในขณะเดียวกัน สารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำยังทำให้ปลาหลายชนิดตายลง ซึ่งบางครั้งเป็นผลกระทบทางอ้อมจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชที่ทำให้พืชในแหล่งน้ำเน่าและปลาขาดออกซิเจนในการหายใจ (Helfrich et al., 1996) ผลสำรวจการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชเฝ้าระวัง เช่น คาร์โบฟูราน EPN เมโทมิลและ ไดโครโตฟอส พบว่า แม้มีการฉีดพ่นหรือหว่านสารเคมีเหล่านี้ตามคำแนะนำบนฉลาก แต่ปลาที่เลี้ยงไว้ในร่องน้ำของแปลงเกษตรกลับได้รับพิษเฉียบพลันและตายลง (วิภา ตั้งนิพนธ์ และคณะ, 2552) ในขณะที่บางการศึกษาระบุว่าการได้รับพิษในปริมาณน้อยแต่

เรื้อรังของปลาอาจส่งผลร้ายแรงกว่าพิษเฉียบพลันเพราะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมและกระบวนการทำงานของอวัยวะต่างๆ ซึ่งสร้างความเสียหายต่อความอยู่รอดและการเจริญพันธุ์ (Kegley et al.,1999)

1.2.6 ลักษณะที่สำคัญของเชื้อแบคทีเรียที่ทำการศึกษาวิจัย

1. *S.typhi* (*Salmonella typhi*)

S.typhi เป็นเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์หนึ่งในตระกูล *Salmonnella* จัดอยู่ใน Family Enterobacteriaceae แบคทีเรีย *Salmonnella* พบมากกว่า 2,000 serotype เชื้อนี้ไม่สามารถ Ferment lactose ติดสีแกรมลบ รูปร่างแท่ง มีขนาดประมาณ 0.5–3.0 ไมโครเมตร ไม่สร้างสปอร์ เคลื่อนที่ด้วยแฟลกเจลลา (Flagella) ที่ยาวและมีอยู่รอบเซลล์ (Peritrichous) เป็นแบคทีเรีย facultative anaerobe สามารถเจริญได้ดีทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ไม่สร้างแคปซูล การแยกพิสูจน์เชื้อของ *Salmonnella* นิยมใช้การทดสอบทางเคมีและซีรั่มวิทยา ซึ่งง่ายต่อการพิสูจน์ เชื้อ *S.typhi* ไม่สร้างก๊าซไนโตรเจนซัลไฟด์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Triple Sugar Iron agar (TSI) ซึ่งเป็นอาหารที่ใช้แยกความแตกต่างของเชื้อแบคทีเรียใน Family *Enterobacteriaceae* แบคทีเรีย *S.typhi* เป็นแบคทีเรียที่อันตรายที่สุดที่นำมาศึกษา เปรียบเทียบกับเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* (ตามตารางที่ 6) โดยปกติ *Salmonnella* พบอยู่ในลำไส้หรือทางเดินอาหารของคนและสัตว์ โดยเฉพาะสัตว์ปีก เช่น ไก่ เป็ดและห่าน จึงมีโอกาสปนเปื้อนในเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เชื้อชนิดนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะติดเชื้อในกระแสเลือด ทำให้เกิดไข้ไทฟอยด์ (Typhoid fever) ในคน นอกจากนี้ยังสามารถแพร่กระจายไปกับอุจจาระ น้ำและสิ่งแวดล้อม เชื้อ *Salmonnella* เพียง 15–20 เซลล์ ก็สามารถก่อให้เกิดอันตรายได้ ทั้งนี้ความรุนแรงของโรคขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อ อายุและสุขภาพของผู้ป่วยเป็นสำคัญ *S.typhi* และ *S. paratyphi A, B* และ *C* เป็น *Salmonnella* ชนิดที่ทำให้เกิดอาการไข้ไทฟอยด์ในมนุษย์ทุกกลุ่มอายุ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นทารก ผู้ป่วยสูงอายุและผู้ที่มีสุขภาพอ่อนแอ จะพบว่ามีอาการที่รุนแรงโดยผู้ป่วยจะได้รับเชื้อโดยกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีเชื้อปนเปื้อน จากนั้นเชื้อจะผ่านกระเพาะอาหารและลำไส้ แล้วจึงเข้าสู่กระแสเลือดไปยังอวัยวะต่างๆ ซึ่งจะพบเชื้อได้ในปอด ตับ ม้าม ถุงน้ำดี ไขกระดูก ขณะเชื้อเข้าสู่กระเลือดจะสร้างเอนโดทอกซินก่อให้เกิดอาการไข้ เชื้อที่อยู่ในกระแสเลือดเมื่อผ่านไตจะถูกขับออกจากปัสสาวะ เนื่องจากน้ำดีเป็นปัจจัยที่ช่วยในการเจริญของเชื้อ จึงพบเชื้ออยู่ในถุงน้ำดี เชื้อมีการเพิ่มจำนวนและไหลออกมากับน้ำดีลงสู่ลำไส้เล็กและขับถ่ายเชื้อออกทางอุจจาระ ส่วนใหญ่โรคนี้ไม่ทำให้เสียชีวิต แต่ผู้ป่วยที่หายจากโรค Salmonellosis แล้วยังเป็นพาหะของเชื้อได้ ซึ่งต้องระมัดระวังการสัมผัสอาหาร เพราะมีโอกาสที่จะแพร่เชื้อสู่อาหารได้ จากการสำรวจพบ *Salmonnella* ที่สามารถแยกได้จากสิ่งแวดล้อม เช่น แม่น้ำ

น้ำกร่อยและน้ำทะเล ซึ่งปนเปื้อนอุจจาระของคนและสัตว์ นอกจากนี้เชื้อนี้ยังมีความสัมพันธ์กับการดื้อยาและสามารถอยู่รอดในสิ่งแวดล้อมได้นานหลายเดือน

2. *E.coli* (*Escherichia coli*)

เชื้อ *E.coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปร่างแท่ง มีขนาดประมาณ 1.1–6.0 ไมโครเมตร เคลื่อนที่ได้ด้วยแฟลกเจลลา ไม่สร้างสปอร์ เจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 8–44 องศาเซลเซียส ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน แต่อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 37 องศาเซลเซียส มีแคปซูลบางๆ หุ้มอยู่รอบตัวทำให้เชื้อทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี เช่น มีชีวิตอยู่ตามเสื้อผ้าแห้งและในฝุ่นละอองได้หลายวัน อยู่ในน้ำได้นานหลายสัปดาห์ เชื้อ *E.coli* ชนิดที่สร้างสารพิษและที่ทำให้เกิดการทำลายเซลล์ สามารถแบ่งออกได้ 4 กลุ่ม คือ Enteropathogenic *E.coli* (EPEC), Enterotoxigenic *E.coli* (ETEC), Enteroinvasive *E.coli* (VTEC) และ Enterohemorrhagic *E.coli* (EHEC) ETEC และ สามารถสร้างสารพิษที่มีผลทำให้เกิดอาการของโรคทางเดินอาหารเป็นพิษแบบ Infection และ Intoxication ตัวอย่างของ EHEC ที่สำคัญ คือ *E.coli* O157: H7 ซึ่งระบาดครั้งใหญ่ในสหรัฐอเมริกาเมื่อปี 2540 ผู้ป่วยจะมีอาการเลือดออกจากลำไส้ใหญ่ มีเลือดปนกับอุจจาระ มีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อาเจียน ไม่มีไข้ มีอาการไตล้มเหลว หากเกิดในเด็กและผู้สูงอายุจะมีผลทำให้เสียชีวิตจากอาการไตวายได้ ปกติเชื้อ *E.coli* เป็นแบคทีเรียประจำถิ่น (Normal flora) ที่อาศัยอยู่ในลำไส้เล็กตอนปลายและลำไส้ใหญ่ของคนและสัตว์เลือดอุ่น ซึ่งสามารถแพร่กระจายเชื้อ โดยปนเปื้อนมากับอุจจาระ ดิน น้ำใช้ เนื้อสัตว์ ผักสดที่นำมาประกอบอาหาร รวมทั้งอาหารทะเลที่มีการปนเปื้อนของน้ำเสีย อาหารที่มักพบว่าเป็นสาเหตุของการระบาดของ *E.coli* จะเป็นอาหารประเภทที่มีการปรุงสุกไม่เพียงพอ โดยเฉพาะอาหารประเภทที่ทำจากเครื่องในหรือเนื้อสัตว์ เช่น ไส้กรอก แฮม เนื้อบด นมที่ผ่านการแปรรูปไม่ถูกวิธี น้ำดื่มและน้ำผลไม้

3. *S.aureus* (*Staphylococcus aureus*)

เชื้อ *S.aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก อยู่ในวงศ์ Family *Micrococcaceae* สกุล *Staphylococcus* มีรูปร่างทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7–1.2 ไมโครเมตร ส่วนใหญ่มีการเรียงตัวอยู่รวมกันเป็นกลุ่มคล้ายพวงองุ่น ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนที่ เจริญได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อเกือบทุกชนิด เจริญได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน เป็นเชื้อที่ทนต่อความร้อนและความแห้งได้ดี พบได้ทั่วไปตามผิวหนังหรือบริเวณจมูกผู้ที่มีสุขภาพดี การติดเชื้อมักไม่รุนแรงและหายได้เอง ปกติเชื้อนี้จะอาศัยอยู่ตามร่างกายของคนโดยไม่ก่อให้เกิดโรค แต่เมื่อใดที่ร่างกายเกิดความผิดปกติ เช่น ระบบภูมิคุ้มกันบกพร่องหรือมีบาดแผล เชื้อที่อาศัยอยู่เหล่านั้นจะก่อโรคได้ทันทีโดยสามารถก่อให้เกิดการติดเชื้อที่ผิวหนังและเนื้อเยื่อต่างๆ ทั่วร่างกาย จึงพบสาเหตุสำคัญของการติดเชื้อในโรงพยาบาล บางครั้งเชื้อนี้อาจทำให้เกิดการติดเชื้อที่รุนแรงได้ เช่น ปอดบวม และเป็น

สาเหตุของโรคทางเดินอาหารเป็นพิษจากการรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำที่มีเชื้อหรือสารพิษเอนเทอโร ทอกซินของเชื้อ *S.aureus* เข้าไป การเกิดโรคเป็นแบบอินโทซิเคชั่น สารพิษชนิดนี้สามารถทนความร้อนได้ดีมาก อาหารที่มีเชื้อและสารพิษปนเปื้อนจะไม่มีกลิ่น สี หรือรสชาติที่ผิดปกติไป ผู้ป่วยที่ได้รับเชื้อและสารพิษจะเกิดอาการอาหารเป็นพิษภายในเวลา 1–6 ชั่วโมง เนื่องจากสารพิษไปออกฤทธิ์ที่เยื่อบุลำไส้เล็ก ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องและท้องเดิน (สุภาพ เหมืองแก้ว, 2548)

ตารางที่ 6 ชนิดของแบคทีเรียแบ่งตามระดับความรุนแรงในการก่อโรค (ธีรพร กงบังเกิด, 2546)

ระดับความรุนแรง	แบคทีเรีย
อันตราย	*S.typhi*
อันตรายปานกลางและมักระบาดในวงกว้าง	*E. coli*
อันตรายปานกลางและระบาดในวงจำกัด	*S. aureus*

1.2.7 สารเคมีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

1. กรดฮิวมิค (Humic acid, HA)

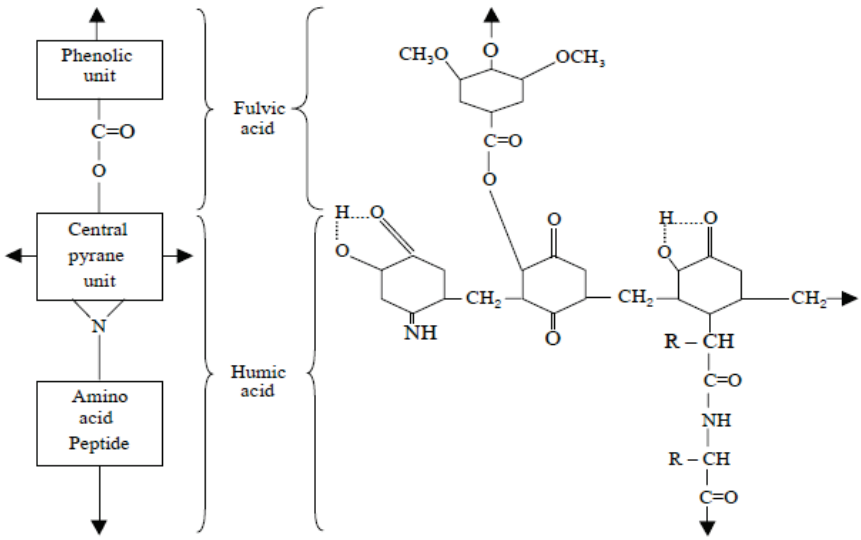
กรดฮิวมิคเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติ พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นสาเหตุทำให้เกิดสีเหลืองหรือสีชาของน้ำ การเกิดปฏิกิริยาหรือการรวมตัวเป็นสารประกอบนี้ไม่เป็นที่แน่ชัด แต่ละโมเลกุลของกรดฮิวมิคมีโครงสร้างที่ซับซ้อนไม่แน่นอน Stevenson, (1982) ได้ศึกษา พบว่า กรดฮิวมิคมีโครงสร้างดังรูปที่ 8 ซึ่งกลุ่มของ Functional group ที่ยื่นออกมาตามพื้นผิวของมันจะเป็นส่วนที่คลอรีนอิสระจะมาทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็นไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane, THMs) โครงสร้างกรดฮิวมิคอาจต่างกันได้ แต่จะมีลักษณะสมบัติคล้ายกันเนื่องจากหมู่องค์ประกอบย่อยภายในโมเลกุล เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่เอไมด์ (Amide) และฟีนอล (Phenolic) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงไม่กี่ร้อยไปจนถึงหมื่น สามารถจับตัวกันได้ตามธรรมชาติกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น มีประจุเป็นลบอันเนื่องมาจากหมู่องค์ประกอบย่อย เมื่อมีค่า พีเอชสูงขึ้นเสถียรภาพโมเลกุลจะสูงขึ้นเนื่องจากการแยกกันของหมู่องค์ประกอบย่อยและเป็นผลจากการที่มีประจุลบเพิ่มมากขึ้นในสารละลาย ในสารประกอบที่เป็นกรดหมู่ฟังก์ชันเอไมด์จะรับประจุบวกทำให้กรดฮิวมิคกลายเป็นประจุบวก แต่ในสารละลายที่เป็นกลางหรือเบสหมู่คาร์บอกซิลจะสูญเสียประจุบวกทำให้มีประจุเป็นลบ กรดฮิวมิคมีลักษณะที่สำคัญ คือ จะไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยสารอินทรีย์ (ปิยรัตน์ สาระวงศ์, 2545)

กรดฮิวมิคและกรดฟัลวิคที่เกิดจากการย่อยสลายพืชต่างๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดสีแท้ที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำที่มีความคงตัวสูง การกำจัดออกจากไม่สามารถทำได้โดยง่าย สีของน้ำจึงสัมพันธ์กับปริมาณสารฮิวมิคที่ละลายอยู่ในน้ำ (Wang, 1990) ในน้ำดื่มส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอรีนอิสระกับสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ เช่น กรดฮิวมิค และกรดฟัลวิค สามารถเขียนสมการแสดงปฏิกิริยาการเกิดไตรฮาโลมีเทนได้ ดังนี้

$$\text{Organic + Free Chlorine + } (Br^- \text{ or } I^-) \longrightarrow \text{THMs + Other Halogenated Organics} \quad \ldots\ldots(1.16)$$

ไตรฮาโลมีเทนเป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอโรฟอร์ม ซึ่งมีรายงานการทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง และสารที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลอโรฟอร์มจัดเป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพ ปกติมนุษย์จะได้รับคลอโรฟอร์มได้จาก อาหาร อากาศและน้ำ เมื่อได้รับเข้าไปร่างกายจะดูดซึมคลอโรฟอร์มได้ดีบริเวณปากและช่องท้อง จะถูก Metabolize ไปเป็น CO_2, Chlorite ion และ Phosgene ซึ่ง Phosgene ที่เกิดขึ้นคือสารก่อมะเร็ง (Onodera, 1985) จากการศึกษาของ ราชัน ธีระพิทยาตระกูล (2545) โดยสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำ 48 ตัวอย่าง จากจุดเก็บแม่น้ำลำตะคอง 24 จุดนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หากรดฮิวมิค แล้วเติมคลอรีนความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์หาไตรฮาโลมีเทนหลังจากกำจัดคลอรีนที่เหลือก็พบความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณไตรฮาโลมีเทน จากการทดสอบค่าทางสถิติได้สมการเชิงเส้น (Linear equation) ดังนี้

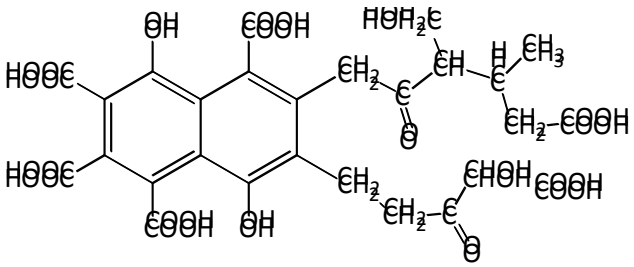
$Y=8.633+7.083X$ (Y=ปริมาณไตรฮาโลมีเทน หน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลิตร, X=ปริมาณกรดฮิวมิค หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร) ……(1.18)



รูปที่ 8 โครงสร้างของกรดฮิวมิค (Stevenson, 1982)

2. กรดฟัลวิค (Fulvic acid, FA)

กรดฟัลวิคเป็นส่วนที่ละลายจากขั้นตอนการสกัดกรดฮิวมิค ดังนั้นคุณสมบัติของกรดฟัลวิคจึงสามารถละลายได้ทั้งในกรดและในเบส มีสีเหลืองอ่อนถึงสีน้ำตาล กรดฮิวมิคและกรดฟัลวิคมีสมบัติที่ต่างกันดังตารางที่ 7 (นงนุช กำลังแพทย์, 2550) กรดฟัลวิคมีโครงสร้างโมเลกุลไม่ซับซ้อนมากเท่ากับกรดฮิวมิค ส่วนใหญ่อยู่ในรูป Aliphatic โครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างยืดหยุ่น มีช่องเปิดภายในขนาดต่างๆ อยู่มาก เปิดโอกาสให้สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์อื่นๆ เข้าไปยึดเกาะภายในโมเลกุลได้ง่าย (รูปที่ 9) น้ำที่มีการปนเปื้อนกรดฟัลวิคจะส่งผลต่อสีและกลิ่นของน้ำ (เพ็ญประภา เฟื่องอักษร, 2553)



รูปที่ 9 โครงสร้างของกรดฟัลวิค (Stevenson, 1994)

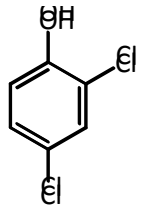
ตารางที่ 7 สมบัติบางประการและหมู่ functional group ที่เกี่ยวข้องของ กรดฮิวมิคและกรดฟัลวิค

คุณสมบัติ	กรดฮิวมิค	กรดฟัลวิค
องค์ประกอบโดยน้ำหนัก (wt%)		
C	50–60	40–50
H	4–6	4–6
O	30–35	44–50
N	2–4	<1–3
S	1–2	0–2
ละลายในกรดแก่	ไม่ละลาย	ละลาย
หมู่ function group (ปริมาณออกซิเจน ในหมู่ function group)		
น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง	100–ล้าน	180–10,000
คาร์บอกซิล	14–15	58–65
ฟีนอล	10–38	9–19
แอลกอฮอล์	13–15	11–16
คาร์บอนิล	2–23	4–11
เมทอกซิล	1–5	1–2

3. 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (2,4–dichlorophenol)

2,4–ไดคลอโรฟีนอล มีสูตรโมเลกุล คือ $C_6H_4Cl_{12}O$ โดยมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 10 โครงสร้างมีลักษณะเป็นวงแหวนเบนซินที่มีหมู่ไฮดรอกซีต่อในตำแหน่งที่ 1 และมีคลอรีนต่อในตำแน่งที่ 2 และ 4 มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีกลิ่นคล้ายฟีนอล มีมวลโมเลกุล 163 กรัมต่อโมล จุดเดือด 209–211 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 40–43 องศาเซลเซียส ความดันไอ 0.075 มิลลิเมตรปรอท ที่ 25 องศาเซลเซียส 2,4–ไดคลอโรฟีนอลได้นำไปใช้เป็นส่วนประกอบใน ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าพยาธิในลำไส้ ยาฆ่าหนอนผีเสื้อ ยาต้านเชื้อโรค ยาฆ่าเห็บ ไร ผลิตภัณฑ์รักษาเนื้อไม้ ซึ่ง 2,4–ไดคลอโรฟีนอล มีพิษต่อมนุษย์ ดังนี้ เมื่อถูกผิวหนังทำให้เกิดอาการแสบร้อน หากกลืนกินทำให้เกิดแผลไหม้แสบร้อนในปากลำคอ หลอดอาหาร กระเพาะ และลำไส้ เมื่อหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือก ทำให้ไอและหายใจลำบาก และยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ อาจมีผลเสียระยะยาวต่อสภาวะแวดล้อมในน้ำ สามารถติดไฟได้เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะก่อให้เกิดก๊าซหรือไอระเหยที่เป็นอันตรายและกรดไฮโดรคลอริก (ฐาปนันท์

พุทธา, 2549) การดื่มน้ำที่มีสาร 2,4–ไดคลอโรฟีนอล จะส่งผลการทำงานของตับไตและระบบเลือด ซึ่งค่ามาตรฐานน้ำดื่มของ EPA (U.S. Enviromental Protection Agency) กำหนดว่าน้ำดื่มไม่ควรมี 2,4–ไดคลอโรฟีนอล เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร (U.S. EPA, 1998) ส่วนมาตรฐานน้ำบริโภค กระทรวงสาธารณสุข กำหนดว่าน้ำดื่มไม่ควรมีฟีนอล เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร

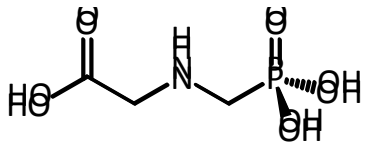


รูปที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล

4. ไกลโฟเสต (Glyphosate)

ไกลโฟเสต มีสูตรทางเคมี คือ $C_3H_8NO_5P$ มีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 11 ไกลโฟเสตเป็นสารเคมีที่ประเทศไทยได้มีการนำเข้าสูงเป็นอันดับต้นๆในบรรดาสารซึ่งนำมาใช้ในการกำจัดวัชพืช สารชนิดนี้ถูกควบคุมการนำเข้าแล้วในหลายๆ ประเทศ สารกำจัดวัชพืชไกลโฟเสตมีชื่อการค้าหลายชื่อและนับว่าเป็นสารกำจัดวัชพืชที่ใช้กันมากที่สุดในโลก ไกลโฟเสตมีชื่อทางเคมีว่า N–(ฟอสโฟโนเมทิล) ไกลซีน เป็นสารอนุพันธ์ของฟอสโฟโนเมทิลของกรดอะมิโนไกลซีน ไกลโฟเสตบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่อะมิโน 1 หมู่ และเป็นกรดที่แตกตัวได้ 3 หมู่ ไกลโฟเสตถูกสังเคราะห์ขึ้นในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Henri Martin ซึ่งในขณะนั้นยังไม่ทราบถึงฤทธิ์ในการกำจัดวัชพืช สารเคมีนี้ถูกนำไปใช้พัฒนาต่อโดยนักวิทยาศาสตร์ของบริษัท Monsanto และใช้เป็นสารกำจัดวัชพืชในเวลาต่อมา ไกลโฟเสตมีคุณสมบัติเป็นกรด แต่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของเกลือ โดยเฉพาะรูปของเกลือไอโซโพรพิลามิน เนื่องจาก ไกลโฟเสตเป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีฤทธิ์กว้าง ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ไกลโฟเสตที่ใช้โดยทั่วไปในการกำจัดวัชพืชจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อนถึงสีน้ำตาล ละลายน้ำได้ดี โดยมีชื่อทางการค้าที่รู้จักกันดี คือ ราวด์อัพ (Roundup®) ไกลโฟเสตมีองค์ประกอบหลักที่สามารถทำลายดีเอ็นเอ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง การกลายพันธุ์และเป็นอันตรายต่อเซลล์สืบพันธุ์ ข้อมูลจากการศึกษาเกษตรกรที่เมืองออนตาริโอ ประเทศแคนาดา ชี้ให้เห็นว่าการสัมผัสกับสารกำจัดวัชพืชที่มีไกลโฟเสตเป็นส่วนประกอบหลักจะเสี่ยงต่อการแท้งลูกเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่า การสัมผัสสารไกลโฟเสตที่ความเข้มข้นต่ำเป็นเวลา 18 ชั่วโมงจะทำให้เซลล์รกจำนวนมากเริ่มตาย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการคลอดลูกก่อนกำหนดและการแท้งลูกไกลโฟเสตความเข้มข้นที่ใช้ใน

การเกษตร (21–42 มิลลิโมลาร์) เป็นพิษกับตัวอ่อนมนุษย์รวมถึงเซลล์รก ไกลโฟเสตที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 กรัมต่อลิตร สามารถยับยั้งการทำงานของต่อมไร้ท่อ ทำให้ปริมาณเทสโทสเตอโรนลดลง 35 เปอร์เซ็นต์ และยังรบกวนการทำงานของยีนที่ควบคุมการสร้างเอสโตรเจน ซึ่งมีผลต่อการเกิดมะเร็งเต้านมชนิดที่สัมพันธ์กับฮอร์โมนเอสโตรเจน สำหรับประเทศไทยนั้น จำนวนผู้ป่วยที่ได้รับพิษจากสารเคมีทางการเกษตรมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เด็กที่มีผู้ปกครองเป็นเกษตรกร จะพบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในปัสสาวะสูงกว่าเด็กที่มีผู้ปกครองประกอบอาชีพอื่นๆ การนำสารเคมีกำจัดศัตรูพืชมาใช้นั้นมีเพียงส่วนน้อยที่มีผลโดยตรงกับศัตรูพืช สารส่วนมากจะกระจายไปสู่สิ่งแวดล้อม ตกค้างในดิน ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน รวมถึงกระจายลงสู่แหล่งน้ำต่างๆ มีรายงานว่าสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้กันนั้นมีแค่ 0.1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่เข้าไปทำลายสิ่งมีชีวิตเป้าหมาย ส่วนที่เหลืออีก 99.9 เปอร์เซ็นต์ นั้นจะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ในแหล่งน้ำ ดินและอากาศ (ภัทรารัตน์ เทียมเก่า, 2557) ซึ่งมีผลต่อน้ำดื่มที่ผลิตจากแหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับค่ามาตรฐานน้ำดื่มของ EPA กำหนดว่าน้ำดื่มไม่ควรมีไกลโฟเสตเกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร (U.S. EPA, 1995)



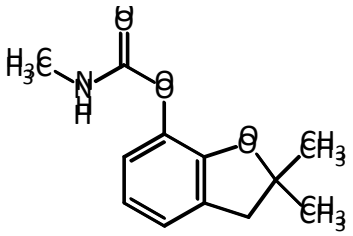
รูปที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของไกลโฟเสต

5. คาร์โบฟูราน (Carbofuran)

คาร์โบฟูรานมีชื่อทางเคมี คือ 2,3–ไดไฮโดร–2,2–ไดเมทิลเบนโซฟูราน–7–อิล–เมททิลคาร์บาเมท (2,3–dihydro–2,2–dimethylbenzofuran–7–yl methylcarbarmate) หรือ 2,3–ไดไฮโดร–2,2–ไดเมทิล–เบนโซฟูรานิล เมทิลคาร์บาเมท (2,3–dihydro–2,2–dimethylbenzofuranyl methylcarbarmate) มีสูตรโครงสร้าง คือ $C_{12}H_{15}NO_3$ และมีโครงสร้างทางเคมีแสดงในรูปที่ 12 คาร์โบฟูรานเป็นยาฆ่าแมลงชนิดดูดซึมเข้าสู่ราก ลำต้น และใบ มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของระบบประสาทที่รวดเร็วและรุนแรง มีฤทธิ์การทำลายสูง วางจำหน่ายในชื่อการค้าว่า ฟูราดาน (Furadan) มีฤทธิ์ในการป้องกันศัตรูพืชหลายชนิด เช่น เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลในข้าว หนอนแมลงวันเจาะต้นในถั่วฝักยาว ไส้เดือนและแมลงหวี่ขาวยาสูบในมะเขือเทศ เพลี้ยไฟแตงโมในพืชตระกูลแตง เป็นต้น มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น เมื่อโดนความร้อนจะให้ควันที่เป็นพิษ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ดีในอะซีโตน อะซีโตนไนไตร์ เบนซีนและไซโครเฮกเซน มีจุดหลอมเหลวที่ 153–154 องศาเซลเซียส ความดันไอที่ 33 องศาเซลเซียส คือ 2.7

เมกะพาสคาล ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังได้น้อยกว่าทางการหายใจและทางปาก เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะมีครึ่งชีวิต 6 ถึง 12 ชั่วโมง จากนั้นจะถูกขับออกมาทางปัสสาวะและสามารถถูกขับออกมาจากน้ำนมมารดาได้ร้อยละ 1 สำหรับการสลายตัวในดินมีค่าครึ่งชีวิต 30 ถึง 120 วัน จึงสามารถละลายไปยังน้ำใต้ดินและแพร่กระจายได้โดยง่าย การสลายตัวจะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นเบส ส่วนการสลายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าครึ่งชีวิต 8.2 สัปดาห์ ที่พีเอช 7.0 และ 1 สัปดาห์ ที่พีเอช 8.0 ตามลำดับ การสลายตัวในพืชจะมีครึ่งชีวิต 4 วัน

คาร์โบฟูรานจะเป็นพิษอย่างรุนแรงเมื่อเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจและทางปาก จะมีพิษปานกลางเมื่อเข้าสู่ร่างกายโดยการดูดซึมทางผิวหนัง มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์อะเซทิลโคลีนเอสเทอเรส (Acetylcholinesterase: AChE) เมื่อเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อท้องเกร็ง มีเหงื่อออกมาก ท้องร่วง น้ำลายฟูมปาก ตาพร่า หายใจลำบาก ความดันโลหิตสูง ควบคุมตัวเองไม่ได้ หมดสติและตายเนื่องจากระบบหายใจล้มเหลว จากการทดลองในสัตว์ พบว่า ปริมาณที่กินแล้วทำให้สัตว์ทดลองตายไปครึ่งหนึ่ง (LD_{50}) มีค่า 5 ถึง 13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในหนู 19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสุนัขและกระต่ายมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้จากการทดลองในหนู โดยให้กินคาร์โบฟูรานในปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน เป็นเวลา 2 ปี พบว่า ทำให้น้ำหนักลดลง แต่ไม่เกิดผลดังกล่าวเมื่อทดลองกับสุนัขและไม่ทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลองและยังไม่มีรายงานว่าทำให้เกิดมะเร็งในคน ปริมาณที่มนุษย์สามารถรับได้มากที่สุดโดยไม่เป็นอันตราย (ADI) คือ 0.001 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน (ปริยานุช สายสุพรรณ์, 2553) มาตรฐานน้ำดื่มของ EPA กำหนดว่าน้ำดื่มไม่ควรมีคาร์โบฟูรานเกิน 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร (U.S. EPA, 1974)



รูปที่ 12 โครงสร้างทางเคมีของคาร์โบฟูราน

6. ไนเตรต (Nitrate, NO_3^-)

ปริมาณไนเตรตในน้ำดื่มเป็นดัชนีชี้วัดแบบหนึ่งที่ใช้เพื่อควบคุมมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม ซึ่งความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำ สามารถรายงานในรูปของไนเตรต–ไนโตรเจน (Nitrate–

nitrogen, NO_3^- –N) หรือในรูปของไนเตรตไอออน (NO_3^- ion) ก็ได้ ขึ้นกับมาตรฐานของแต่ละประเทศหรือภูมิภาค ซึ่งสามารถเทียบเคียงค่าปริมาณได้ คือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ NO_3^- ion มีค่าความเข้มข้นโดยประมาณเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของไนเตรต–ไนโตรเจน (NO_3^-–N) ถึงแม้ว่าไนเตรตจะเป็นสารที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์และสุขภาพของสิ่งแวดล้อม แต่ปริมาณความเข้มข้นที่สูงในน้ำดื่มกลับเป็นอันตรายอย่างยิ่ง หากปริมาณไนเตรต–ไนโตรเจน ที่วิเคราะห์ได้เกินกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (เกินกว่าปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมให้มีได้ หรือ Drinking Water Maximum Contaminant Level, MCL) ซึ่งผู้ผลิตน้ำดื่มจะต้องมีกระบวนลดปริมาณไนเตรตในน้ำด้วย ซึ่งมาตรฐานน้ำดื่มที่ปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา กำหนดให้มีปริมาณไนเตรต–ไนโตรเจนในหน่วยความเข้มข้น มิลลิกรัมต่อลิตร ไว้ดังนี้คือ มีปริมาณไนเตรต–ไนโตรเจนและไนไตรท์ ได้สูงสุดไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มาตรฐานน้ำบริโภค กระทรวงสาธารณสุข กำหนดให้มีปริมาณไนเตรต–ไนโตรเจนไม่เกิน 4 มิลลิกรัมต่อลิตร

สารประกอบของไนโตรเจนสามารถเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบและแอมโมเนีย โดยแหล่งใหญ่สำหรับการปนเปื้อนของไนเตรตอินทรีย์มาจากของเสียขับถ่ายจากคนและสัตว์ ในขณะที่ไนเตรตอนินทรีย์มาจากโพแทสเซียมไนเตรตและแอมโมเนียมไนเตรต ซึ่งใช้ในปุ๋ยเคมีเกินกว่าร้อยละ 80 และยังมาจากวัตถุระเบิดประมาณร้อยละ 16 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแหล่งการปนเปื้อนส่วนใหญ่ มาจากการชะจากแหล่งดินในการกสิกรรมที่ใช้ปุ๋ยเคมีนั่นเองและดินสามารถการดูดซับไนเตรตไว้ได้น้อยมาก ไนเตรตจึงสามารถชะละลายในน้ำได้เป็นอย่างดีและละลายอยู่ในน้ำผิวดิน เพราะไนเตรตไม่สามารถกลายเป็นไอได้ ไนเตรตจึงคงตัวในน้ำจนกว่าจะมีการนำไปใช้ประโยชน์โดยพืชและสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย การสลายตัวของไนเตรตเกิดได้เร็วในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

ปริมาณไนเตรตที่สูงเกินค่ากำหนดในแหล่งน้ำและน้ำดื่มมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ และสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ตลอดจนความสูญเสียทางเศรษฐกิจ เช่น การเปลี่ยนแหล่งน้ำดิบเพื่อการเตรียมน้ำดื่ม เป็นต้น ความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ เป็นผลมาจากน้ำดื่มหรือเป็นผลจากการรับประทานอาหารที่มีไนเตรตสูง เช่น ผักและเนื้อสัตว์ที่มีการเติมสารไนเตรตเพื่อการปรุงและถนอมอาหาร จากผลการวิจัย พบว่าหญิงมีครรภ์ ควรหลีกเลี่ยงการได้รับปริมาณไนเตรตสูงในอาหารและน้ำดื่ม เนื่องจากจะมีผลต่อทารกในครรภ์ ทำให้คลอดก่อนกำหนด และมีโอกาสแท้งบุตรได้ นอกจากนี้ยังพบว่าทารกที่มีอายุน้อยกว่า 6 เดือน อาจเกิดโรคที่เรียกว่า Blue Baby Syndrome หรือทางการแพทย์เรียกว่า Methemoglobinemia อาการที่พบในทารก คือ เลือดมีพีเอชที่สูง ทำให้แบคทีเรียในลำไส้สามารถเปลี่ยนรูปของไนเตรตเป็นไนไตรท์ได้มากขึ้น โดยไนไตรท์สามารถถูกดูดซับและรวมตัวกับฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) เป็น เมทีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งส่งผลให้

การลำเลียงออกซิเจนได้ลดลง นอกจากนี้ยังมีอาการอื่นๆ ที่พบ คือ ปลายนิ้วมือนิ้วเท้า ริมฝีปาก มีสีเขียวคล้ำ ปวดศีรษะ วิงเวียน หน้ามืดคล้ายจะเป็นลม ช็อก หมดสติและกล้ามเนื้อชักกระตุกหรือแม้แต่สมองได้รับอันตรายจากการขาดออกซิเจนและทำให้เสียชีวิตได้ (กองวิเคราะห์และทดสอบ กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ, 2548)

1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีสมบัติทางเคมีที่ดีหลายอย่าง เช่น มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงจากสารจำพวกกรด ก๊าซคลอรีนหรือจำพวกเกลือ มีความเสถียร ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ด้วยสมบัติเหล่านี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ มากมาย (Fujishima et al., 2000) เช่น การนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้ด้านการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย การเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า การย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ทั้งในน้ำและอากาศ เคลือบวัสดุเพื่อช่วยในการทำความสะอาดตัวเอง ฯลฯ

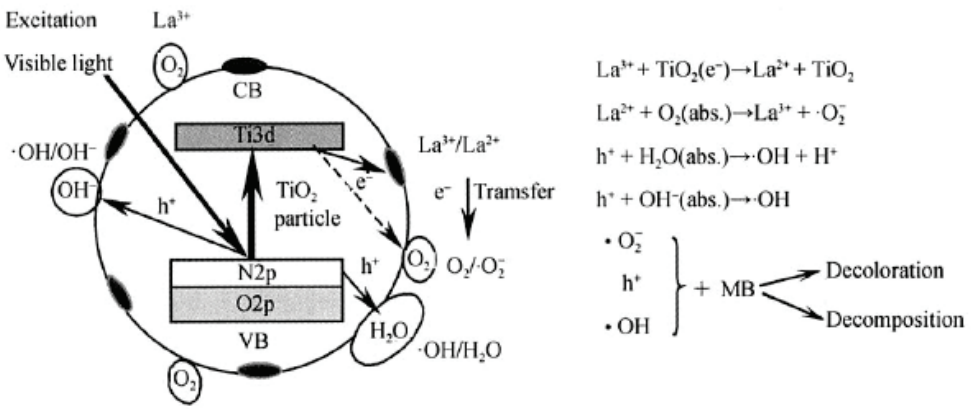
วิธีการเตรียมอนุภาคหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น Hydrothermal, CVD (Chemical vaper deposition), PVD (Physical deposition), EPD (Electrophoresis deposition), Precipitation, CBD (Chemical bath deposition), Microemulsion, Electrospinning, Hydrothermal และวิธีโซล–เจล การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล–เจลเป็นวิธีที่ง่ายและราคาไม่แพง ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) และปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ของไทเทเนียมไดออกไซด์โพรพอกไซด์บิส (เพนเทนไดโอเนต) และ 1,3–โพรเพนไดออล โดยเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมเฟสและขนาดอนุภาคของสารสังเคราะห์ เพราะอุณหภูมิในการเผามีผลต่อโครงสร้างของผลึกและพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเฟสอะนาเทสเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงถึง 700 องศาเซลเซียส โครงสร้างของผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์เกือบทั้งหมด ส่วนการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนที่อุณหภูมิต่ำ (180–240 องศาเซลเซียส) ทำได้โดยการเติมสารละลายเพื่อลดแรงตึงผิวในกรณีที่ใช้ Titanium isopropoxide เป็นสารตั้งต้น อัตราส่วนต่อน้ำหนักสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนี้ 15/100, 25/100 และ 35/100 ฟิล์มตกตะกอนโดยใช้วิธี Spray deposition ไทเทเนียม ไดออกไซด์จะมีขนาดผลึกระดับนาโนและมีลักษณะพรุนหลังจากการทำอบผนึก การเตรียมอนุภาคระดับนาโนและฟิล์ม

สามารถใช้เป็น Gas sensing สามารถใช้งานได้ในทางด้านชีววิทยาและ Photo–electrodes เพื่อทำ Dye–sensitized solar cell (Rao et al., 2007)

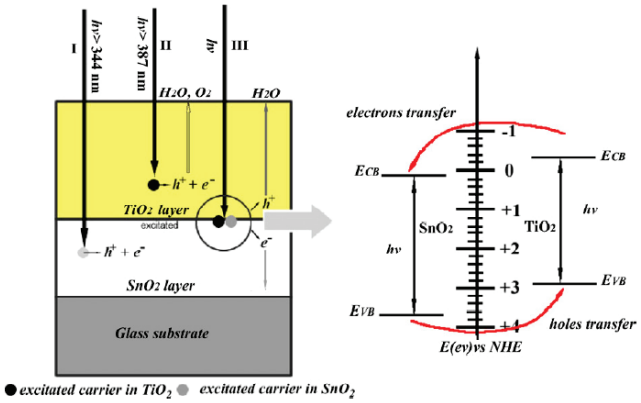
1.3.1 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

1) การเจือด้วยโลหะหรืออโลหะ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ การเจือด้วยโลหะและอโลหะเป็นวิธีที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของการเจือโลหะและอโลหะได้มีการอธิบายไว้หลายๆ โมเดลด้วยกัน แตกต่างกันไปตามชนิดของสารเจือ

Liu และคณะ (2007) ศึกษากลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจนและแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน พบว่าโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนจะเกิดเฟสอะนาเทสและเกิดเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสกับรูไทล์ เมื่อเจือด้วยไนโตรเจนอย่างเดียว ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจนอย่างเดียว เนื่องจากขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนมีขนาดที่เล็กกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจน การเจือด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนมีกลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน (Liu et al., 2007)



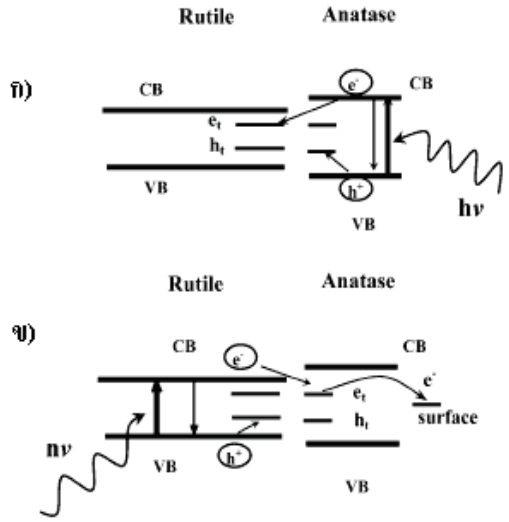
รูปที่ 14 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุในคอมพอสิตฟิล์ม SnO_2/TiO_2 (Hou et al., 2007)

Hou และคณะ (2007) อธิบายถึงกลไกของการเจือ SnO_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งแถบช่องว่างพลังงานของ SnO_2 เท่ากับ 3.80 อิเล็กตรอนโวลต์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส) เท่ากับ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ (Sayılkan et al., 2007) ซึ่งกว้างกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นตำแหน่งแถบการนำของ SnO_2 มีค่าต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 14 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง ยูวีที่มากพอ อิเล็กตรอนจะหลุดจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบการนำสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำของ SnO_2 ซึ่งที่มีพลังงานน้อยกว่าได้ และจะถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของ SnO_2 ทำให้ลดระยะเวลาในการกลับมารวมตัวของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ มีผลให้หลุมอิเล็กตรอนที่เกิดบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

2) การทำให้เกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์

การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง คือ การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ ให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างอะนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 75:25 ซึ่งผลิตโดยวิธีไฮโดรไลซิส Tetra–isopropyl–orthotitanate ต่อด้วยวิธีการทำให้ชิ้นงานแน่นขึ้น (Densification) ภายใต้ความดัน 1,500–4,000 กิโลปาสคาล (Zhao et al., 2007) จากเดิมที่เฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีที่สุด แต่จากการศึกษาและทดลองจากงานวิจัยหลายๆ งาน พบว่า เฟสผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะลิติกได้สูงเช่นกัน กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเฟสผสม อาจเกิดจากเมื่ออิเล็กตรอนของเฟสอะนาเทสถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนกระโดดไปยังแถบ

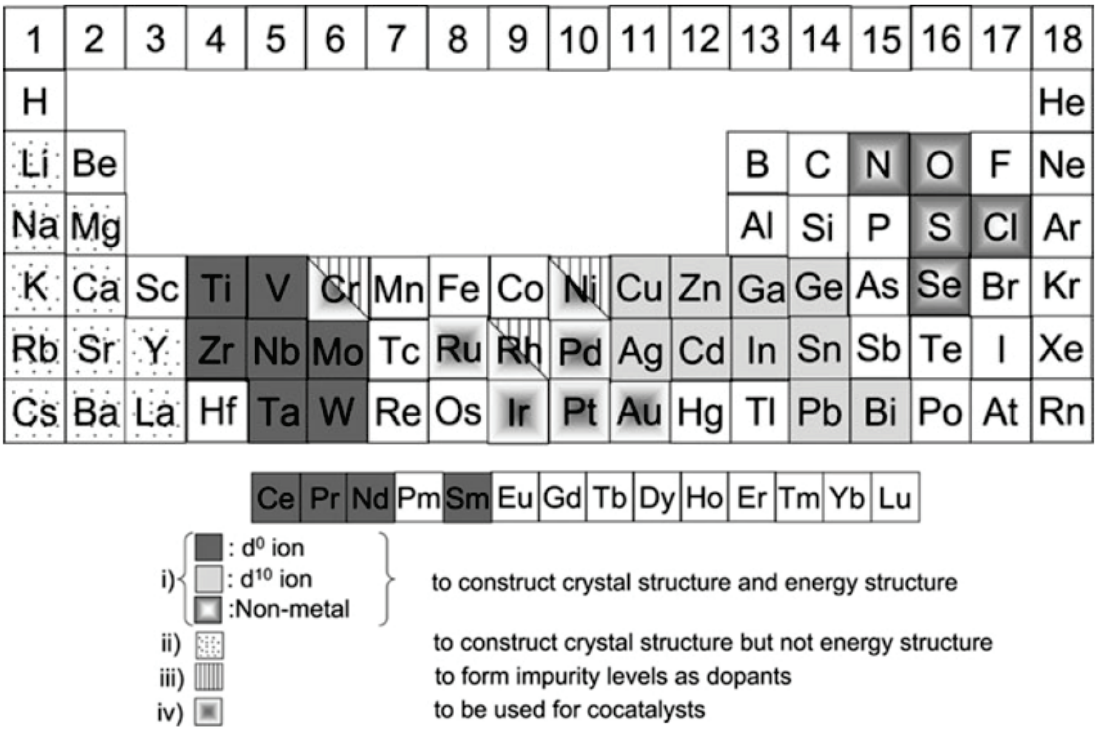
การนำไฟฟ้า แต่มีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมอิเล็กตรอนได้อีก แต่เมื่อมีเฟสรูไทล์อยู่ด้วย เฟสรูไทล์จะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) (Hu et al., 2003) ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมอิเล็กตรอนได้เร็ว กลไกแสดงดังรูปที่ 15ก หรืออาจพิจารณากลับกันตามรูปที่ 15ข โดยเมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์จะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทส (3.20 อิเล็กตรอนโวลต์) แต่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำไฟฟ้าแล้วกลับมารวมกับหลุมอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีเฟสอะนาเทสผสมอยู่ด้วย เฟสสอะนาเทสจะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้



รูปที่ 15 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทส และรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ Hu และคณะ (2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์

3) การลดช่องว่างของแถบพลังงาน

ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้มากมาย แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องใช้แสงยูวีในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง (3.20 eV สำหรับเฟสอะนาเทส) ขณะที่แสงแดดมีแสงยูวีน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานในช่วงแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ จึงมีการปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือธาตุที่เป็นโลหะ เช่น Cr, Fe, V, Mn, Cu, Zn และ Ni และธาตุที่เป็นอโลหะ เช่น B, C, N, S และ F ซึ่งธาตุต่างๆ แสดงดังรูปที่ 16 จะมีผลต่อโครงสร้างและแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์

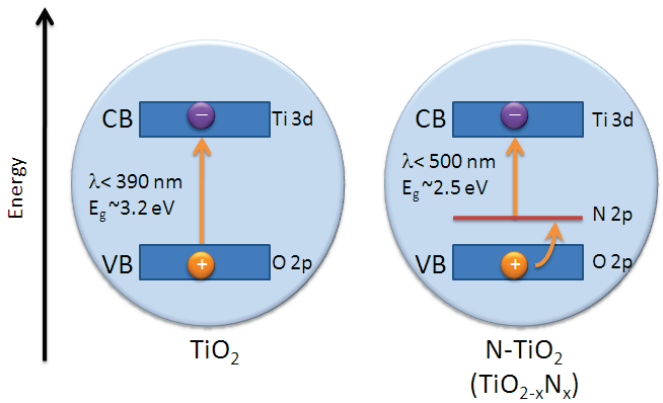


รูปที่ 16 สมบัติของธาตุต่างๆ เมื่อเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ (Kudo et al., 2009)

1.3.2 การลดแถบช่องว่างพลังงานด้วยการเจือไนโตรเจน

เริ่มมีการค้นพบการลดแถบช่องว่างพลังงานโดยการเจือไนโตรเจนและมีการตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1986 โดย Sato และในปี 2001 นักเคมีชื่อ Asahi เขาได้ทำการศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจน ผลทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาทั้งแสงยูวีและแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าซึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 390–500 นาโนเมตร การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเติมไนโตรเจนลงไป Trie (2003) และ Nakoto (2004) ก็ได้อธิบายว่า ในชั้นออบิทัลของ 2p–N มีช่องว่างที่น้อยกว่าออบิทัลของ 2p–O ทำให้อิเล็คตรอนกระโดดจาก 2p–O ไปยัง 2p–N และกระโดดต่อไปยัง 3d Ti ทำให้สามารถลดพลังงานในการกระตุ้นได้ (รูปที่ 17) ส่วน Geng และคณะ (2000) ได้ศึกษาแหล่ง ไนโตรเจน ที่ต่างกัน โดยใช้แหล่ง ไนโตรเจน จาก ไตรเอทธิลอะมีน เอทิลลามินและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ พบว่า การใช้ ไตรเอทธิลอะมีน ให้ผลผลปฏิกิริยาดีที่สุด ในการเพิ่มประสิทธิภาพของไทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจน การเจือไนโตรเจนอาจทำได้โดยการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แก๊สไนโตรเจนหรือแอมโมเนียก็ได้ (Dawson et al., 2014) นอกจากประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์จะขึ้นกับขนาดแถบช่องว่างพลังงาน ขนาดผลึก พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ความเป็นผลึก รูปแบบของไนโตรเจนก็มีผลต่อประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์เช่นกัน ซึ่งรูปแบบของไนโตรเจนสามารถอธิบาย

จากการวิเคราะห์ XPS โดยค่าพลังงานยึดเหนี่ยว N 1s จะบอกรูปแบบของไนโตรเจนในไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 8 โดยค่าพลังงานยึดเหนี่ยวในช่วง 396.3–397.4 ไนโตรเจนจะแทนที่อะตอมออกซิเจนอยู่ในรูป TiN พลังงานยึดเหนี่ยวในช่วง 398.0–399.8 ไนโตรเจนจะแทนที่อะตอมออกซิเจนอยู่ในรูป N–Ti–O พลังงานยึดเหนี่ยวในช่วง 400.0–400.5 ไนโตรเจนเป็นอะตอมแทรกอยู่ในรูป Ti–O–N และ พลังงานยึดเหนี่ยวในช่วง 398.0–399.8 ไนโตรเจนจะแทนที่อะตอมออกซิเจนอยู่ในรูป N–Ti–O จากการศึกษาของ Dawson และคณะ 2014 พบว่า อะตอมไนโตรเจนแบบแทรกมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอะตอมไนโตรเจนแบบแทนที่ภายใต้แสงยูวี แต่อะตอมแบบแทนที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอะตอมไนโตรเจนแบบแทรกภายใต้แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า เนื่องจากการเจือไนโตรเจนทำให้แถบช่องว่างพลังงานลดลง อิเล็กตรอนสามารถกระโดดกลับจากแถบการนำได้ง่ายและอะตอมแบบแทรกจะช่วยลดการรวมตัวกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน ทำให้ส่งผลดีต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 17 การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจน
(ที่มา:http://photochemistryportal.net/home/index.php/2009/09/30/metal– oxide–photocatalysis:17/01/2554)

ตารางที่ 8 รูปแบบของไนโตรเจนที่เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์

ช่วงของพลังงานยึดเหนี่ยว (eV)	ตำแหน่งของพลังงานยึดเหนี่ยว (eV)	รูปแบบ N	ข้อมูลอ้างอิง
396.3–397.4	396.3	Substitutional N	Park et al., (2014)
	396.5	β –N	Ruzimuradov et al.,(2015)
	396.9	TiN	Sun et al., (2013)
	397.3	TiN	Lei et al., (2015)
	397.4	TiN	Cheng et al., (2012)
398.0–399.8	398.0	N–Ti–O	Dawson et al., (2014)
	398.5	Substitutional N	Soares et al., (2011)
	398.7	N–Ti–O	Li et al., (2015)
	399.0	N–Ti–O	Myilsamy et al., (2015)
	399.5	N–Ti–O, Substitutional N	Li et al., (2015)
	399.6	N–Ti–O	Lin et al., (2011)
	399.6	N–Ti–O, Substitutional N	Kadam et al., (2014)
	399.8	N–Ti–O	Jaiswal et al., (2012)
400.0–400.5	400.0	Interstitial N	Mamane et al., (2014)
	400.0	Ti–O–N	Wang et al., (2015)
	400.1	Interstitial N	Zeng et al., (2014)
	400.4	Ti–O–N	Ashkarran et al., (2014)
	400.5	Ti–O–N	Zhang et al., (2014)
	400.5	Interstitial N	Soares et al., (2011)
401.5–406.5	401.5	N species	Li et al., (2015)
	401.7	N species	Lei et al., (2015)
	402.0	N species	Sun et al., (2013)
	404.0	NH_3 หรือ N_2	Wang et al., (2015)
	406.5	NO หรือ NO_2	Li et al., (2015)

1.3.3 การฆ่าเชื้อโรคและสลายสารปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการโฟโต

แคตะไลติก

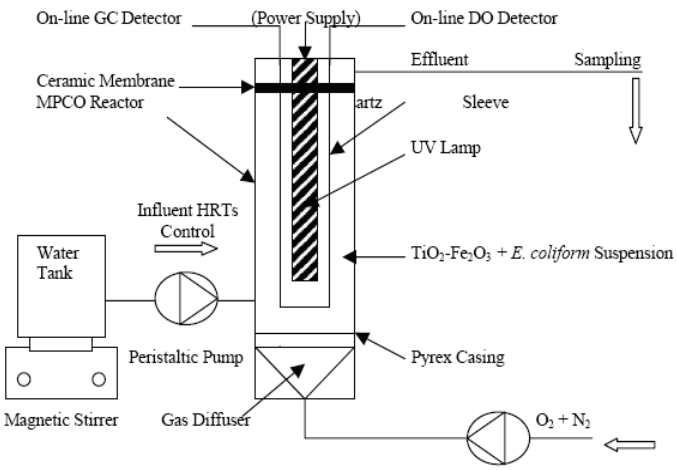
ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดจากสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือ ซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยแสงยูวี (ความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร) ทำให้เกิด Electron–hole pairs ขึ้นในอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นในบรรยากาศที่มีออกซิเจนและสารอินทรีย์ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าและสามารถรีดิวซ์ออกซิเจนที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้กลายเป็นซูเปอร์ออกไซด์อนุมูลลบ ในขณะที่หลุมอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ สามารถออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์เพื่อกลายเป็นอนุมูลของสารอินทรีย์แล้วถูกออกซิไดซ์ต่อไปอีกทีหนึ่ง ยิ่งไปกว่านั้นออกซิเจนจากอนุมูลชนิดอื่นจะเกิดขึ้นด้วย เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล อนุมูลออกซิเจนที่เป็นหลักคือ·OH, O_2, และ H_2O_2 สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศจะถูกสลายโดยหลุมอิเล็กตรอนโดยตรงหรือการออกซิเดชันด้วยอนุมูลออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ โดยจะเกิดขึ้นบนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน แบคทีเรียก็จะถูกฆ่าด้วยกลไกเดียวกัน

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือ ผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกผลิตให้ใช้งานได้หลายรูปแบบ ได้แก่ อนุภาคระดับนาโนที่แขวนลอยอยู่ในรูปสเปรย์หรือสี การใช้งานในรูปฟิล์มบางเคลือบอยู่บนวัสดุฐานต่างๆ เช่น พลาสติก เซรามิก แก้ว เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม วัสดุพรุน เส้นใย ลูกบอลเซรามิก และอื่นๆ ซึ่งสามารถใช้งานได้สะดวกขึ้น

ระบบของ TiO_2/SnO_2 จากการศึกษาของ Yang และคณะ (2002) พบว่า ระบบของ TiO_2/SnO_2 เป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีเนื่องจากมี High quantum yield ที่สูง ทำให้มีความแตกต่างของแถบการนำของ TiO_2 และ SnO_2 ส่งผลให้มีการแยกของ Photoinduce e^-–hole pair และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะไปป้องกันการรวมตัวกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนทำให้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่จุดเริ่มในปี 1970 จนถึงปัจจุบันจำนวนสารปนเปื้อนมากกว่า 1,000 ชนิด ได้ถูกนำมาทดสอบและพบว่าสามารถใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสในการกำจัดสารเหล่านั้นได้อย่างดี ทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่มของฟีนอล ยาฆ่าแมลง สี สารในกลุ่มของ BTEX (เบนซินโทลูอีน เอธิลเบนซิล และไซลีน) ซึ่งมาจากการปนเปื้อนของน้ำมัน ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีน เช่น ไตรคลอโรเอธิลีน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น และสารอนินทรีย์ในกลุ่มโลหะหนัก

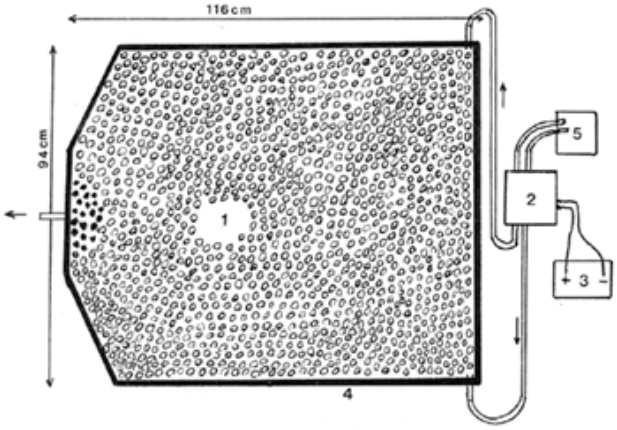
การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่ได้นำ *E.coli* มาทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติก เพราะ *E.coli* เป็นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุการระบาดของโรคอาหารเป็นพิษในหลายประเทศทั่วโลก ผู้ติดเชื้อจะมีอาการท้องเสีย ในช่วงแรกๆ ของการศึกษา ไม่มีการเจือสารใดๆ ลงไป ทำให้ประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกไม่ค่อยดี ต่อมา Sun และคณะ (2003) ได้ศึกษาการฆ่าเชื้อ *E.coli* ในน้ำโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วย Fe^{3+} โดยเติมอนุภาคไทเนียมไดออกไซด์ลงไปในน้ำโดยตรงและเพิ่มแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 30 นาที ความเข้มข้นของเชื้อ *E.coli* เริ่มต้นที่ 10^8 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ใช้หลอดยูวีกระตุ้นกำลัง 11 วัตต์ ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร โดยมีชุดทดสอบ แสดงดังรูปในที่ 18



รูปที่ 18 ชุดทดสอบของ Sun และคณะ (2003)

Paleologou และคณะ (2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่มีเฟสของอะนาเทส:รูไทล์ 75:25 ขนาดอนุภาค 21 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา 50 ตารางเมตรต่อกรัม ทดสอบภายใต้หลอดยูวีกำลัง 9 วัตต์ ร่วมกับการใช้คลอรีน รังสียูวีซีกำลัง 11 วัตต์ และ Ultrasound irradiation พบว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ร่วมกับหลอดยูวีกำลัง 9 วัตต์ ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ดีที่สุด ใช้เวลา 20 นาที สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ 75 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับหลอดไฟยูวีในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ก็ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า จึงมีแนวคิดในการใช้แสงจากดวงอาทิตย์ในการศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกเพื่อลดการใช้พลังงานโดย Subrahmanyum และคณะ (2008) ได้ศึกษาการใช้แสงจากดวงอาทิตย์แทนหลอดยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อฆ่าเชื้อ *E.coli* ใน

น้ำ โดยเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนหินภูเขาไฟ โดยนำหินภูเขาไฟจุ่มแช่ในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 และนำไปอบด้วยความร้อน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์โดยมีชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 19

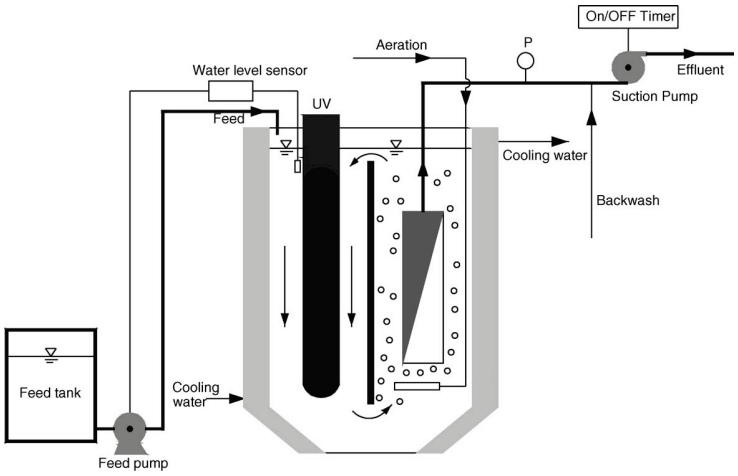


รูปที่ 19 ชุดทดสอบที่ใช้หินภูเขาไฟเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Subrahmanyum et al., 2008)

นอกจาก *E.coli* แล้วยังมีการศึกษาเชื้อโรคชนิดอื่นๆ อีก เช่น Lonnen และคณะ (2005) ได้ศึกษาการฆ่าเชื้อโรคหลายชนิด เช่น Bacterial, Fungal และ Protozoan ชนิดต่างๆ โดยใช้วิธี SPC–DIS coating ผลการทดลอง พบว่า การใช้แสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ดีกว่าการใช้แสงอาทิตย์อย่างเดียวถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงจากอาทิตย์และการใช้แสงอาทิตย์อย่างเดียวจะให้ประสิทธิภาพต่ำในการสลายพวก Protozoa

มีการศึกษาการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารโฟโตแคตะลิสต์เพื่อสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรืออากาศ เช่น Kim และคณะ (2006) ได้ศึกษาการใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรลิซิส แล้วใช้แอลกอฮอล์และน้ำเป็นตัวทำละลาย เพื่อทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทดสอบใช้สารละลายเมทิลีนบลู ปริมาตร 1,200 มิลลิลิตร ต่ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม แล้วกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดยูวี วัดความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV–Vis (UV–Visible spectrophotometer) จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นมีผลทำให้ขนาดอนุภาคของอะนาเทสและรูไทล์เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิเผา 400

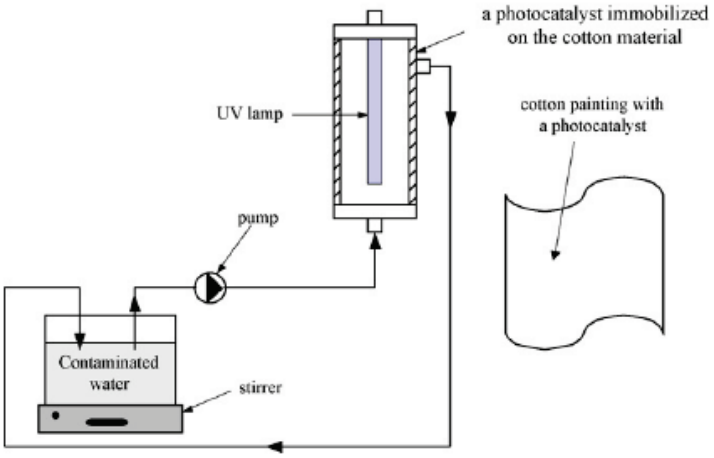
องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา 113 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด ส่วน Nakano และคณะ (2004) ได้ศึกษาการย่อยสลาย DNP (Dinitrophenol) ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนซิลิกา การศึกษาทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและขนาดโรงประลอง พบว่า สามารถย่อยสลาย DNP ให้เป็นสารประกอบชนิดอื่นและสารประกอบต่างๆ ก็ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำทั้งหมดโดยใช้เวลา 100 นาที แต่จะมีเหล็กมาเคลือบทำให้เสื่อมสภาพลง ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยแช่กรด 1 สัปดาห์ ส่วน Fua และคณะ (2006) ก็มีการศึกษาการย่อยสลายกรดฟัลวิคโดยมีชุดทดสอบเป็นเมมเบรนและอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ภายในเมมเบรน โดยมีหลอดยูวีกำลัง 11 วัตต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฟัลวิค 11.95 TOC มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร โดยที่พีเอชของสารละลายต่ำๆ ให้ประสิทธิภาพดีกว่าที่พีเอชสูงๆ ชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 20



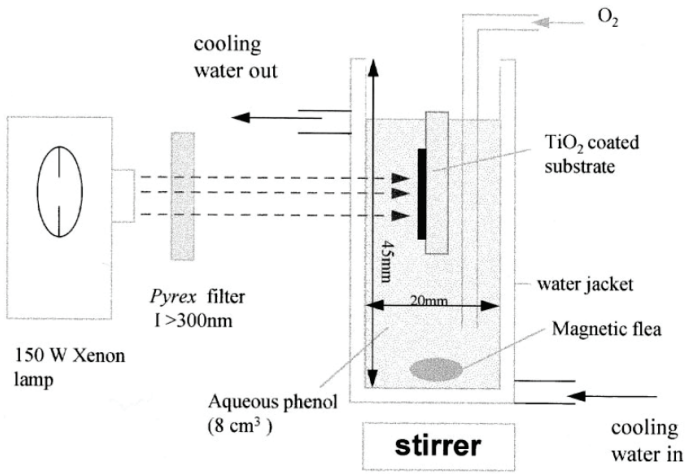
รูปที่ 20 ชุดทดสอบ Fua และคณะ (2006)

ในการบำบัดน้ำเสียเราสามารถใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ละลายลงในน้ำได้โดยตรง แต่ในการบำบัดน้ำดื่ม ควรเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุต่างๆ เพื่อไม่ให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เจือปนอยู่ในน้ำ จึงมีการศึกษาโดยการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนวัสดุต่างๆ เช่น พอลิเมอร์ โลหะ แก้ว และเส้นใยแก้ว เป็นต้น สำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์และเชื้อโรคชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องหลายๆ รอบ ทำให้ไม่ต้องกำจัดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ออกในทีหลังและยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา Zhang และคณะ (2006) ได้ศึกษาการประยุกต์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบน

PVA fiber ด้วยวิธีโซล–เจล ผลการทดลอง พบว่า ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยึดเกาะพอลิเมอร์ได้ดี ผลการศึกษาความคงทนของฟิล์มโดยนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้งานหลายๆ ครั้ง พบว่า หลังจากครั้งที่ 7 เป็นต้นไปประสิทธิภาพยังอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบกับเมทิลีนบลู นอกจากนี้ Tryba และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนผ้าฝ้ายเจือด้วยเหล็ก โดยมีชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 21 ส่วน Byrne และคณะ (1998) ก็ทำการศึกษาการสลายฟีนอลในน้ำ โดยเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบน Stainless steel 304, Ti–4V–6Al, Titanium foil และเคลือบลงบนแก้ว โดยวิธี Electrophoretic coating และ Spray coating พบว่า วิธี Electrophoretic coating จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด แต่จะเกิดรอยแตกร้าวบนชิ้นงาน ชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 22



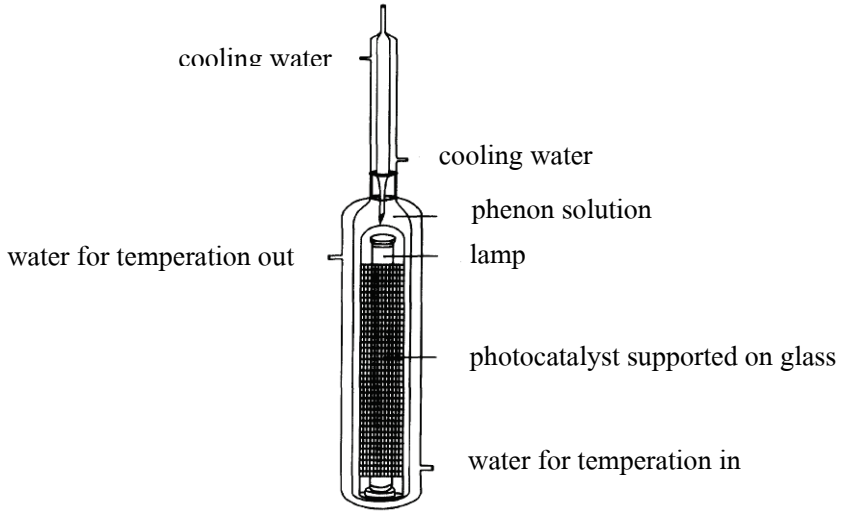
รูปที่ 21 ชุดทดสอบโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนผ้าฝ้าย (Tryba et al., 2008)



รูปที่ 22 ชุดทดสอบของ Byrne และคณะ (1998)

การใช้พอลิเมอร์จะมีจุดด้อย คือ ไม่สามารถเผาที่อุณหภูมิสูงได้ จึงมีการศึกษาโดยการใช้เส้นใยแก้ว ซึ่งเส้นใยแก้วสามารถเผาได้ที่อุณหภูมิสูง โดย Kuo และคณะ (2007) ได้ศึกษาโดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาเคลือบลงบนเส้นใยแก้วเพื่อแยกก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากอากาศ โดยเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของโซล–เจล และเพิ่มอนุภาคทองคำระดับนาโนลงไปด้วย แล้วเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จากการศึกษา พบว่า สามารถสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมดภายในเวลา 15 นาที นอกจากนี้ Yu และคณะ (2006) ก็ได้ศึกษาประสิทธิภาพไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว เพื่อสลายก๊าซไนตริกออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยนำเส้นใยแก้วจุ่มในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส จากการศึกษา พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพในการสลายก๊าซไนตริกออกไซด์ดีกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

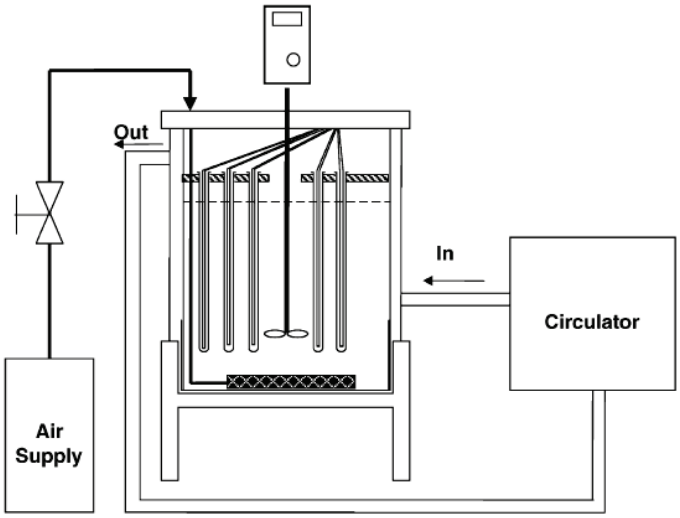
นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล–เจล เคลือบด้วยวิธีจุ่มเคลือบเพื่อย่อยสลายสารต่างๆ เช่น Bla□ková และคณะ (1998) ได้ศึกษาการย่อยสลายฟีนอลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยแพลทินัม โดยมีชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 23 นอกจากนี้ก็ยังมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนเส้นใยแก้วไปศึกษาการย่อยสลายสารโทลูอีนอีกด้วย (Piscopo et al., 2000; Chungsiriporn et al., 2008; You et al., 2003)



รูปที่ 23 ชุดทดสอบของ Bla□ková และคณะ (1998)

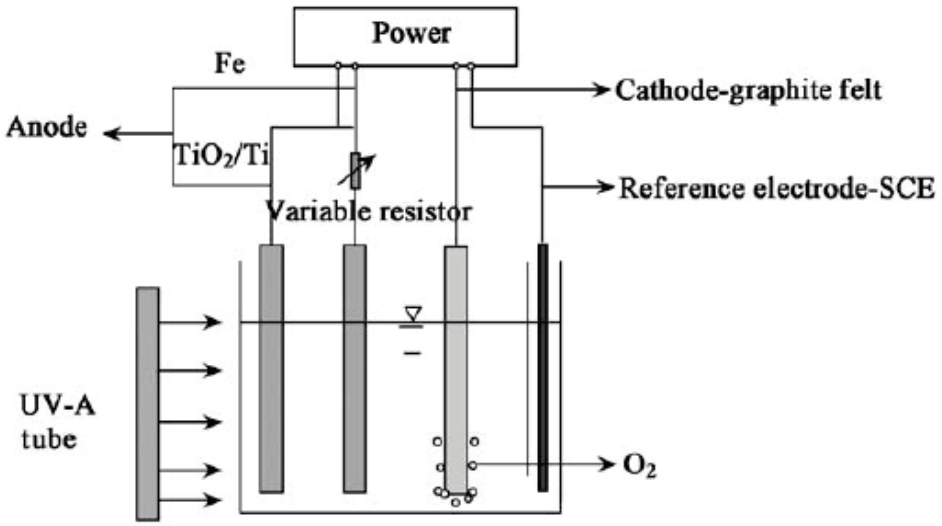
Jang และคณะ(2005) ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์ม TiO_2/Fe^{3+} โดย วิธีโซล–เจล เคลือบบนหลอดแก้วเพื่อศึกษาการย่อยสลาย DDT โดยทำการเคลือบทั้งหมด 3 ชั้น ความหนาสูงสุดของฟิล์ม

อยู่ที่ 2.94 ไมโครเมตร โดยอบที่ 200 องศาเซลเซียส ด้วยหม้อนึ่งความดัน ซึ่งเจือด้วย Fe^{3+} โดยนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แช่ในสารละลายที่มีไอออนของ Fe^{3+} และนำไปอบอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณ Fe^{3+} ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ $3.7x10^{-4}$ มิลลิกรัมต่อตารางมิลลิเมตร สามารถย่อยสลาย DDT ได้ 95 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 20 นาที การเตรียมสารละลายที่พีเอชสูงๆ จะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลาย DDT การวิเคราะห์หาปริมาณ DDT สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC–MS, HP6890) ชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 24



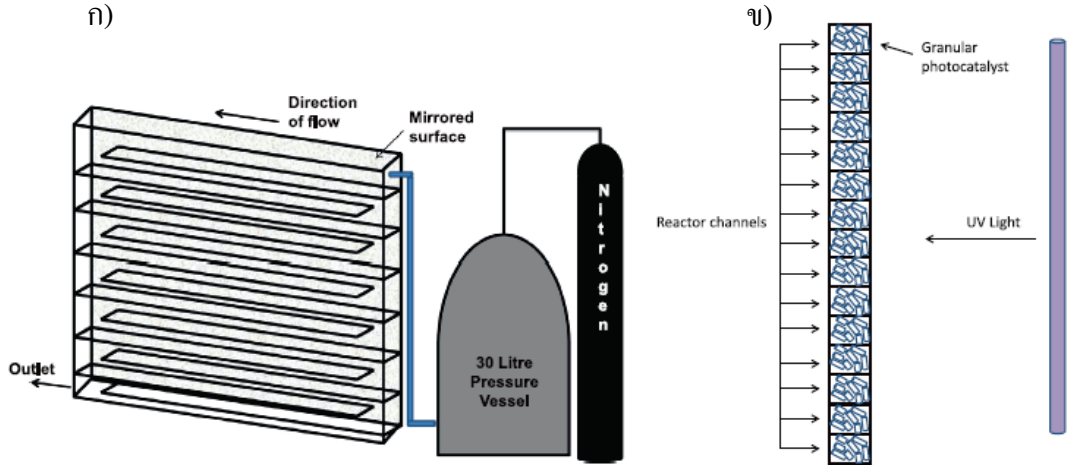
รูปที่ 24 ชุดทดสอบของ Jang และคณะ (2005)

Xiu และคณะ (2007) ได้ศึกษาการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (2,4–dichlorophenol, 2,4–DCP) โดยใช้ฟิล์ม TiO_2/Ti–Fe–graphite ที่เตรียมด้วยวิธี Photoelectrocatalytic (PEC) ซึ่งฟิล์มดังกล่าวสามารถย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลได้ 93 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 60 นาที ภาวะที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการย่อยสลาย คือ ที่พีเอช 3–9 การวิเคราะห์หาปริมาณ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลโดยใช้เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 25 นอกจากนี้ยังมีการเติมสารต่างๆ ลงไปในฟิล์ม ได้แก่ EDTA, PEI, TEA และ IPA ผลปรากฏว่า PEI>EDTA>TEA ~IPA (Sorpone et al., 2000) และมีการศึกษาการเติมไคโตซาน เส้นใยถ่านกัมมันต์และไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนเมมแบรน ซึ่งวิเคราะห์หาปริมาณ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลด้วยเครื่อง UV–Vis ที่ความยาวคลื่น 284 นาโนเมตร (Liu et al., 2010)



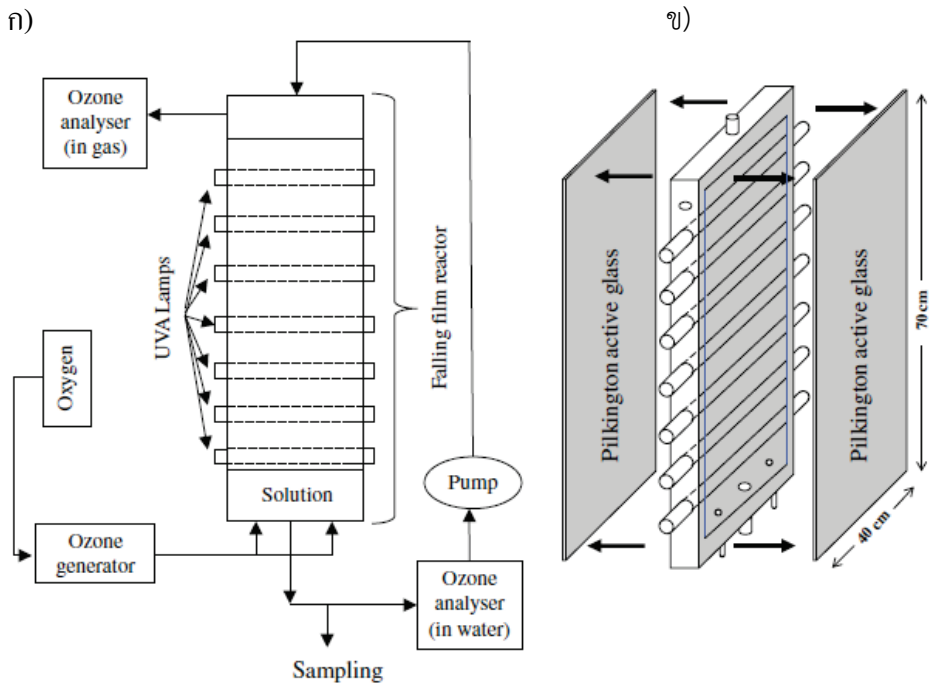
รูปที่ 25 ชุดทดสอบของ Xiu และคณะ (2005)

Mahalakshmi และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 และ ZnO ในการย่อยสลายคาร์โบฟูราน โดยปริมาณคาร์โบฟูรานเริ่มต้น 50–250 มิลลิกรัมต่อลิตร กรองด้วยเมมเบรน 0.2 ไมโครเมตร ปริมาณอนุภาค TiO_2 และ ZnO 100 มิลลิกรัม หลอดยูวีกำลัง 8 วัตต์ วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบฟูรานด้วยเครื่อง UV–Vis ที่ความยาวคลื่น 210 และ 275 นาโนเมตร จากการศึกษา พบว่า อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายคาร์โบฟูรานดีกว่า ZnO



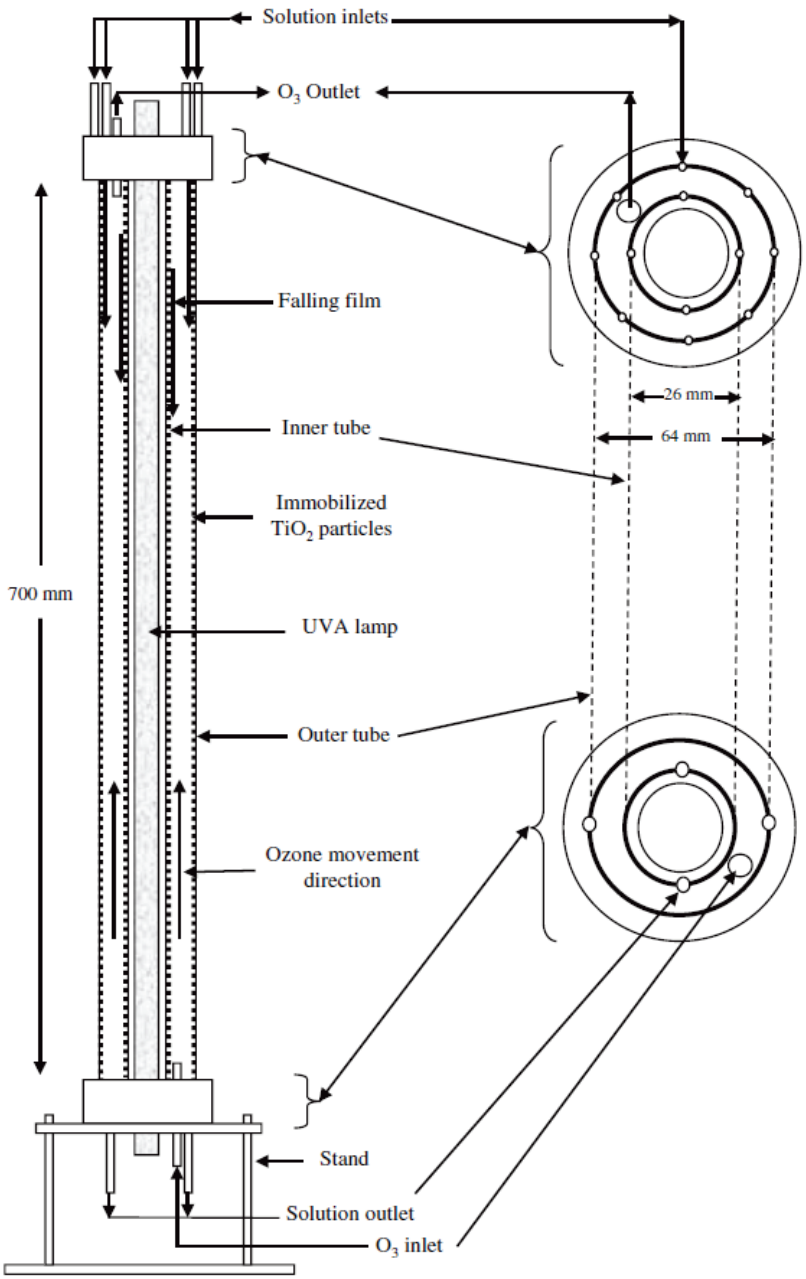
รูปที่ 26 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Pestana และคณะ (2014) (ก) ภาพจากด้านหน้า และ (ข) ภาพจากด้านข้าง

จากรูปที่ 26 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ของ Pestana และคณะ (2014) ซึ่งออกแบบมาเพื่อกำจัดสาร GSM (Geosmin) และ 2–MIB (2–methylisoborneol)โดยสารสองชนิดนี้ส่งผลต่อกลิ่นและรสชาติของน้ำ โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นกล่องที่ทำจาก Plexiglas ซึ่งวัสดุชนิดนี้แสงยูวีสามารถผ่านได้มากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาตรทั้งหมด 21x6x1.3 ลูกบาศก์เมตร จากรูปที่ 26ก ภายในกล่องดังกล่าวมีแผ่น Plexiglas ที่เรียงตัวเป็นชั้นๆ โดยจะดันน้ำให้ไหลจากถังปริมาตร 30 ลิตร ที่มีการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังด้วยอัตราการไหลที่ 2 ลิตรต่อนาที เข้าสู่ชั้นบนสุดและผ่านแต่ละชั้นจนมาถึงชั้นล่างสุด จากรูปที่ 26ข แต่ละชั้นจะบรรจุเม็ดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความยาวอยู่ในช่วง 8 – 15 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 41 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด 22 กิโลกรัม ด้านข้างมีหลอดยูวีบีกำลัง 100 วัตต์ จำนวน 12 หลอด ซึ่งห่างจากเครื่องปฏิกรณ์ 13 มิลลิเมตร การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์โดยการเตรียม GSM และ 2–MIB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 นาโนกรัมต่อลิตร ทดสอบผ่านเครื่องปฏิกรณ์เพียงครั้งเดียว พบว่า สามารถย่อยสลาย GSM และ 2–MIB ได้ 80 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 27 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Mehrjouei และคณะ (2014) (ก) ภาพรายละเอียด 2 มิติ และ (ข) ภาพโครงสร้างแบบ 3 มิติ

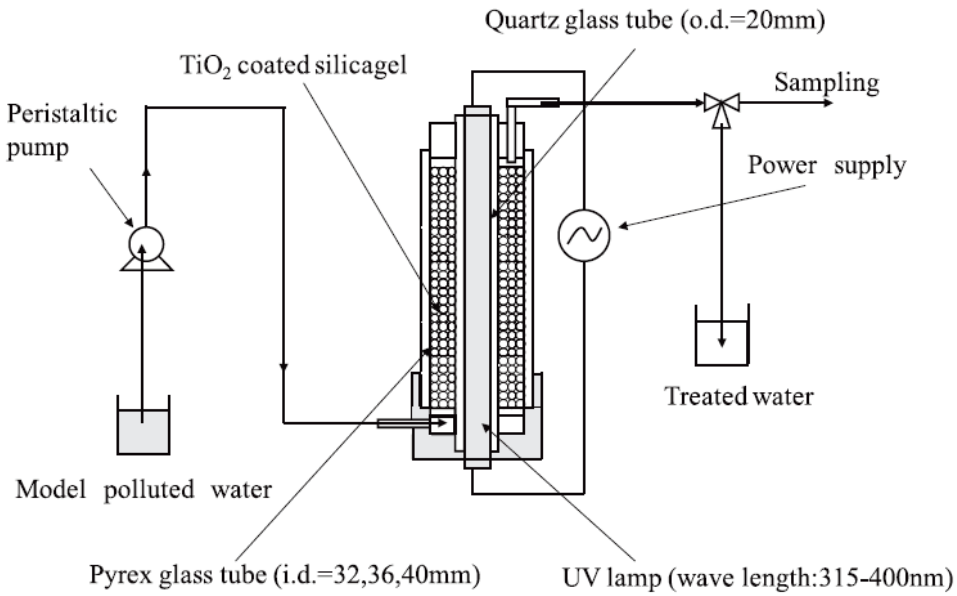
Mehrjouei และคณะ (2014) ได้สร้างเครื่องปฏิกรณ์สำหรับย่อยสลาย TBA (Tert–butyl alcohol) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำหอมและเครื่องสำอาง โดยเครื่องปฏิกรณ์แสดงในรูปที่ 27ก ซึ่งประกอบด้วยหลอดยูวีเอกำลัง 15 วัตต์ จำนวน 7 หลอด สอดอยู่ในกล่องที่มีแผ่น PAG (Pilkington Active Glass) ด้านข้างสองแผ่น ดังรูปที่ 27ข กระจก PGA เป็นกระจกที่มีการเคลือบสารไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วและมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาประมาณ 0.5 ตารางเมตร เครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวมีปริมาตรทั้งหมด 0.01 ลูกบาศก์เมตร มีการปล่อยก๊าซโอโซนเข้าไปในระบบจากด้านล่าง ด้วยอัตราไหล 10 ลิตรต่อชั่วโมง การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์โดยการเตรียมสาร TBA ในน้ำ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร แล้วดันเข้าสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ให้ไหลสัมผัสกับฟิล์ม PAG ด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที และไหลกลับเข้าสู่ถังพักอีกครั้งหนึ่ง ผลการศึกษาดังกล่าว พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถย่อยสลายสาร TBA ได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 10 นาที และย่อยสลายได้เกือบหมดภายในเวลา 15 นาที



รูปที่ 28 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Mehrjouei และคณะ (2014)

Mehrjouei และคณะ (2014) ได้สร้างเครื่องปฏิกรณ์เพื่อประยุกต์ในการบำบัดน้ำ แสดงดังรูปที่ 28 ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวมีหลอดยูวีเอกำลัง 30 วัตต์ อยู่ตรงกลางภายในและมีผนังเป็นทรงกระบอกทั้งภายในแกนกลางและภายนอก ทำการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุ 2 ชนิด คือ BSG (Borosilicate glass) กับ PMMA (Polymethylmethacrylate) ซึ่งเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ไว้ที่ผิวภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาตรรวมทั้งหมด 1.8 ลิตรและมี

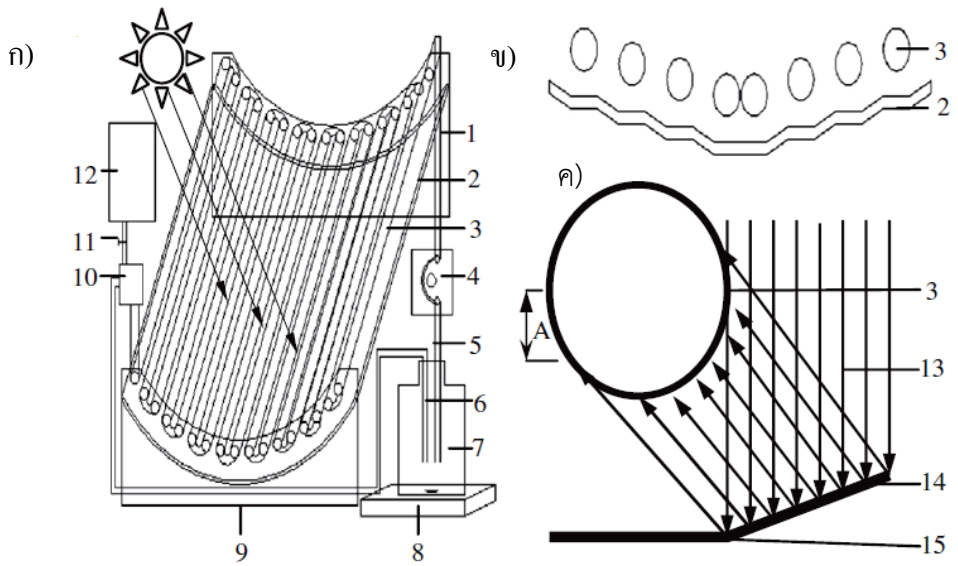
พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา 200 ตารางเซนติเมตร ทำการปล่อยก๊าซโอโซนเข้าจากด้านล่างและออกทางด้านบนด้วยอัตราการไหลที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์โดยการเตรียมกรดออกซาลิกในน้ำที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ดันเข้าสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ แล้วไหลสัมผัสกับฟิล์มด้วยอัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที และไหลกลับเข้าสู่ถังพักอีกครั้งหนึ่ง ผลการศึกษา พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบน BSG สามารถย่อยสลายกรดออกซาลิกได้หมด ภายในเวลา 60 นาที ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบน PMMA สามารถย่อยสลายสากรดออกซาลิกได้หมดภายในเวลา 100 นาที



รูปที่ 29 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Ida และคณะ (2014)

Ida และคณะ (2014) ได้สร้างเครื่องปฏิกรณ์ (แสดงดังรูปที่ 29) เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวมีหลอดยูวีเอกำลัง 6 วัตต์ อยู่ตรงกลางท่อที่ทำจากแก้วควอตซ์ ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร รอบนอกมีท่อที่ทำจากแก้วควอตซ์สำหรับใส่เม็ดซิลิกาที่มีการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2/SiO_2) ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน คือ 32, 36 และ 42 มิลลิเมตร ยาว 140 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร เม็ดซิลิกาที่เคลือบสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1–1.7 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา 192 ตารางเมตรต่อกรัม ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์กับสาร

P–nitro phenol (PNP) และ 2,4–dinitrophenol (DNP) ในน้ำ โดยเตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลในการทดสอบ 0.63–18.22 มิลลิลิตรต่อนาที สารละลายถูกดันผ่านเครื่องปฏิกรณ์จากด้านล่างสู่ด้านบน ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์จะคงที่หลังจากการทดสอบครั้งที่ 5 เป็นต้นไป อัตราการไหลที่ช้าจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง

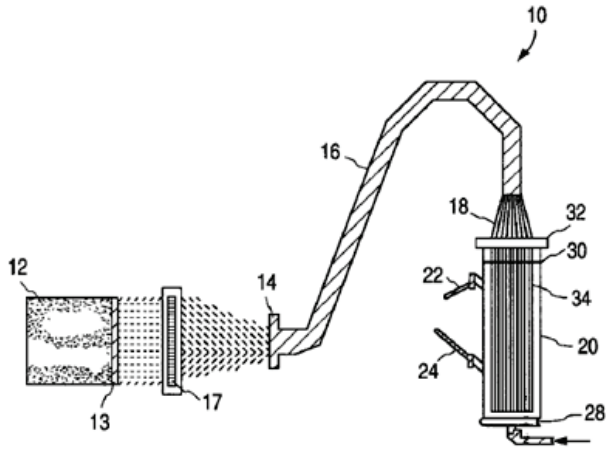


รูปที่ 30 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ของ Liu และคณะ (2013) (ก) รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ (ข) ภาพตัดขวางและ (ค) ท่อและทิศทางของแสง

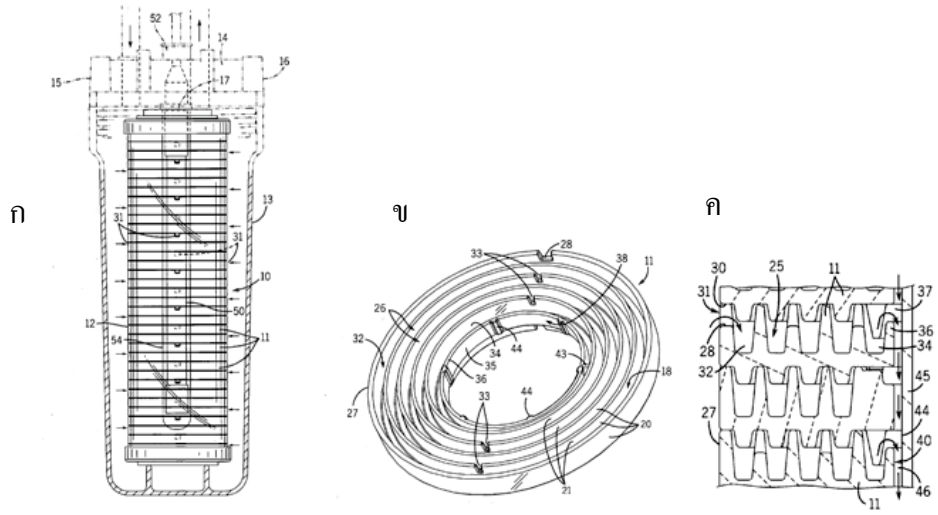
Liu และคณะ (2013) ได้สร้างเครื่องปฏิกรณ์สำหรับบำบัดน้ำเสียและผลิตไฮโดรเจน แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 30ก โดยเครื่องปฏิกรณ์มีส่วนประกอบดังนี้ 1) ขาตั้งข้างบน 2) ตัวสะท้อนแสง 3) ท่อแก้ว 4) ปั๊มน้ำ 5) ทางน้ำออก 6) ทางน้ำเข้า 7) ถังบรรจุน้ำ 8) เครื่องกวนแม่เหล็ก 9) ขาตั้งด้านล่าง 10) อุปกรณ์จับไฮโดรเจน 11) สวิตซ์ 12) ถังเก็บไฮโดรเจน 13) แสงอาทิตย์ 14) พื้นผิวสะท้อนเอียง และ15) พื้นสะท้อนในแนวราบ ภายในท่อแก้วหมายเลข 3 จะเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน มีทั้งหมด 10 หลอด ยาว 18 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ปริมาตรรวม 250 มิลลิลิตร โดยน้ำจะถูกดันด้วยปั๊มจากถังเก็บเข้าสู่หลอดแก้วแต่ละหลอดจนครบแล้วกลับมาในถังเก็บอีกครั้ง หลอดแก้วมีการวางตัวในแนวโค้ง (รูปที่ 30ข) เพื่อรับแสงแดดและมีตัวแผ่นสะท้อนอยู่ด้านล่างที่ทำมาจากอลูมิเนียมฟอยล์ แสงจะเดินทางกระทบกับอลูมิเนียมฟอยล์ แล้วสะท้อนมายังท่อแก้ว (รูปที่ 30ค) โดยเครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถย่อย

สลายเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ได้ 99.5 เปอร์เซ็นต์ และสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 7,866.7 ไมโครโมลไฮโดรเจนต่อลิตร ภายในเวลา 72 ชั่วโมง

เครื่องปฏิกรณ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำที่มีการจดสิทธิบัตร ได้แก่ สิทธิบัตรของ Peill และคณะ(2009) ซึ่งได้ออกแบบชุดทดสอบโดยใช้แก้วควอตซ์ ที่บรรจุเส้นใยแก้วนำแสงไว้ภายในแก้วควอตซ์และเส้นใยแก้วนำแสงมีการเคลือบด้วยสารละลายที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 และนำแก้วควอตซ์ไปเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 500 องศาเซลเซียส ทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ด้วย 4–คลอโรฟีนอล ชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 31 จากรูปดังกล่าว หมายเลข 12 เป็นแหล่งกำเนิดแสง หมายเลข 13 เป็นตัวกรองแสง หมายเลข 17 เลนส์ควอตซ์ หมายเลข 14 ปากท่อที่บรรจุเส้นใยแก้วนำแสง หมายเลข 16 ท่อบรรจุเส้นใยแก้วนำแสง หมายเลข 18 มัดเส้นใยแก้วนำแสง หมายเลข 32 ตัวรวมเส้นใยแก้วนำแสง หมายเลข 22 และ 24 ทางเข้าของแก๊ส หมายเลข 34 เส้นใยแก้วนำแสง หมายเลข 20 หลอดแก้วที่บรรจุเส้นใยแก้วนำแสง และหมายเลข 28 ตัวยึดแก้ว จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถย่อยสลาย 4–คลอโรฟีนอลได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนชุดทดสอบของ Hatch และคณะ(2006) ประกอบด้วยจานที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 32 รูปที่ 32ก เป็นลักษณะชุดทดสอบที่มีหลอดยูวีอยู่ตรงกลาง รูปที่ 32ข ลักษณะจานไทเทเนียมที่มีร่องสำหรับไหลของน้ำ และรูปที่ 32ค แสดงภาคตัดขวางของจานไทเทเนียมที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 31 ชุดทดสอบ Peill และคณะ (2009)

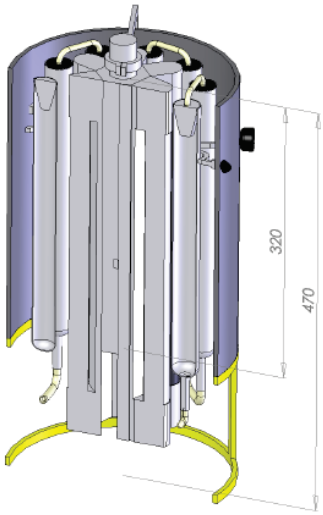


รูปที่ 32 ชุดทดสอบของ Hatch และคณะ (2006)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ เชื้อโรค และยาปราบศัตรูพืชได้ แต่เมื่อนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาทดสอบกับสารต่างๆ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ เมื่อมีการเจือสารต่างๆ เข้าไปพบว่า ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงขึ้น มีการนำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มาทดสอบการย่อยสารต่างๆ เช่น ชุดทดสอบของ Fua และคณะ(2006) Delaisun และคณะ (2003) แต่การใช้ฟิล์มแทนอนุภาค ก็สามารถลดปัญหาการปนเปื้อนของอนุภาคที่จะหลุดมาในน้ำได้ เช่น ชุดทดสอบของ Jang และคณะ (2006) Xiu และคณะ (2007) Hatch และคณะ (2006) Subrahhmany และคณะ (2008) และ Byrne และคณะ (1998) แต่ฟิล์มที่เตรียมขึ้นจะต้องมีพื้นผิวในการทำปฏิกิริยามากด้วยและแสงสามารถส่งผ่านได้ เช่น ชุดทดสอบของ Peil และคณะ (2009) Tryba และคณะ (2008) แต่การยึดเกาะของอนุภาคไม่แน่นพอเพราะฟิล์มถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุฐานที่ใช้จะต้องทนอุณหภูมิสูงได้เพื่อที่จะสังเคราะห์ให้เกิดเฟสอะนาเทสและฟิล์มที่เผาที่อุณหภูมิสูงจะเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมากกว่า เช่น ชุดทดสอบของ Blazkova และคณะ (1998) แต่ไม่มีการเจือสารและปริมาณเส้นใยแก้วน้อยเกินไป ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจนและดีบุก แล้วนำไปเคลือบบนเส้นใยแก้วที่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามากและแสงสามารถส่งผ่านได้

จากการศึกษาการฆ่าเชื้อ *E.coli* และการย่อยสลายกรดฮิวมิค (พีรวัส คงสง, 2554) ด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วโดยมีการเจือไนโตรเจนและดีบุกที่บรรจุอยู่ภายในหลอดแก้ว และมีหลอดยูวีอยู่ภายในแกนกลางของชุดปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 33 นำชุดปฏิกรณ์ไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* และสลายกรดฮิวมิคในน้ำ โดยทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำ

ที่ 22.03, 54.16 และ 325.81 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ 22.03 และ 54.16 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* และย่อยสลายกรดฮิวมิคได้ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่อัตราการไหลดังกล่าวยังต่ำอยู่ ซึ่งสามารถผลิตน้ำได้เพียง 78 ลิตรต่อวัน เท่านั้น แต่ในท้องตลาดเครื่องกรองน้ำสามารถผลิตน้ำได้ 1,000–6,000 ลิตรต่อวัน และในเชิงอุตสาหกรรมสามารถผลิตน้ำได้ 6,000–400,000 ลิตรต่อวัน



รูปที่ 33 ชุดทดสอบของพีรวัส คงสง (2554)

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำดื่มให้สะอาดและเพิ่มอัตราการผลิตให้มากพอ การศึกษาวิจัยโดยการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบเส้นใยแก้ว โดยเจือด้วยดีบุกและไนโตรเจน แล้วนำเส้นใยแก้วที่เคลือบไปทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus* และศึกษาการย่อยสลายกรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล และไกลโฟเสต และสร้างเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่มีฟิล์มไทเนียมไดออกไซด์เจือดีบุกร่วมกับไนโตรเจนและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องที่สร้างขึ้น และศึกษาการดูดซับไนเตรตและคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ แล้วนำถ่านกัมมันต์เพิ่มเข้าไปในระบบของเครื่องบำบัดน้ำดื่มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารเคมีให้มากยิ่งขึ้น

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มโฟโตแคตะไลติกนาโนฟิล์มบนเส้นใยแก้วเพื่อฆ่าเชื้อโรคและย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มหรือน้ำที่นำมาทำน้ำดื่ม เช่น จากน้ำประปา หรือน้ำบาดาล หรือ อื่นๆ

2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมสารเคลือบ กระบวนการเคลือบและการใช้งาน

3. เพื่อออกแบบเครื่องทำความสะอาดน้ำดื่มที่ใช้ในครัวเรือนหรือระดับ Pilot

4. ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทำความสะอาดน้ำดื่มให้บริสุทธิ์

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย

2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือดีบุกและไนโตรเจนด้วยวิธีการโซล–เจล แล้วนำโซลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปเคลือบลงบนเส้นใยแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบและอบให้แห้งเพื่อเตรียมเป็นผง แล้วนำผงที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำอนุภาคไทเนียมไดออกไซด์และเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิคต่างๆ ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยนำเส้นใยแก้วที่ผ่านการเคลือบและเผาแล้วไปทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลูและสารเคมีต่างๆ ได้แก่ กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอลและไกลโฟเสตและทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus* ภายใต้แสงสียูวี ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์สำหรับบำบัดน้ำดื่ม แล้วทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาการดูดซับไนเตรตและคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์และนำถ่านกัมมันต์เพิ่มเข้าไปในระบบของเครื่องบำบัดน้ำดื่มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารเคมีต่างๆ

การสังเคราะห์สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของฟิล์มเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณและแหล่งของสารเจือที่ต่างกัน เพื่อปรับปรุงให้ได้สมบัติโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีขึ้น และนำฟิล์มที่ได้บรรจุในเครื่องบำบัดน้ำดื่มที่สร้างขึ้น แล้วทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการย่อยสารเคมีและฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในน้ำดื่ม หลังจากนั้นก็ปรับปรุงเครื่องบำบัดน้ำดื่มให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการเพิ่มถ่านกัมมันต์เข้าไปในระบบ

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

2.2.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี โซล–เจล

ก) การเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)(T) โดยใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) (99.95% บริษัท Fluka Sigma–Aldrich) เริ่มต้นด้วยการผสม TTIP 8.9 มิลลิลิตร กับเอทานอล 143 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 800 รอบต่อ

นาที จนครบเวลา 30 นาที และหยดกรดเกลือความเข้มข้น 2 โมลาร์ ลงไปจนกระทั่งพีเอช เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายต่อไปที่อุณหภูมิห้องต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำโซลที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สัดส่วนโดยโมลของ TTIP:C_2H_5OH คือ 1:82 (Li et al., 2002) นำโซลที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาตัวอย่างภายใต้ภาวะบรรยากาศด้วยเตา LINDBERG/BLUE อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 34

ข) การเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือซิลิกา ($TiO_2/5SiO_2$) โดยใช้ TTIP 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอล 143 มิลลิลิตร จากนั้นเติม TEOS (Tetraethyl orthosilicate) (98% บริษัท Fluka Sigma–Aldrich) กวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 800 รอบต่อนาที จนครบ 30 นาที แล้วปรับพีเอชด้วยกรดเกลือความเข้มข้น 2 โมลาร์ จนกระทั่งพีเอชเท่ากับ 3.5 กวนสารละลายต่อไปที่อุณหภูมิห้องจนครบเวลา 1 ชั่วโมง นำโซลที่ได้ไปไว้ในตู้เย็น สัดส่วนโดยโมลของ TTIP:C_2H_5OH คือ 1:82 (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบ $TiO_2/5SiO_2$ ในกรณีนี้ใช้ปริมาณของ TEOS ที่ 5 เปอร์เซนต์โมล นำโซลที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาตัวอย่างภายใต้ภาวะบรรยากาศด้วยเตา LINDBERG/BLUE อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาค $TiO_2/5SiO_2$ ขั้นตอนสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 35

ค) การเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจน ($TiO_2/3SnO_2/N$ (TSN))

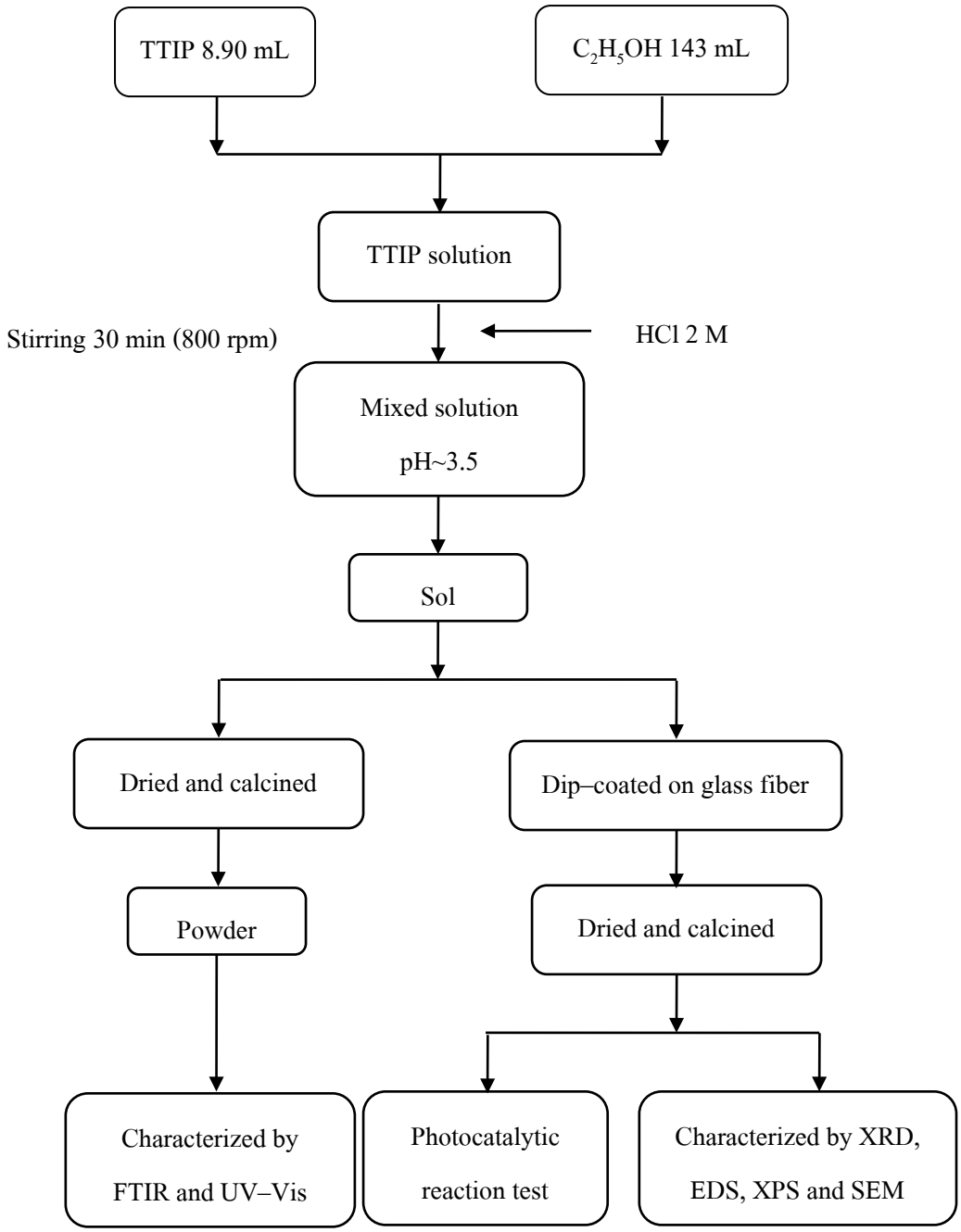
เริ่มต้นโดยใช้ TTIP 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอล ปริมาตร 143 มิลลิลิตร เติมแอมโมเนียมคาร์บอเนต ($(NH_4)_2(CO_3)$) (10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซนต์โมล) และกรดแอซิติก 10 มิลลิลิตร กรณีไม่เติม $(NH_4)_2(CO_3)$ (TS) กวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 800 รอบต่อนาที จนแอมโมเนียมคาร์บอเนตละลายหมด หลังจากนั้นเติม 3 เปอร์เซนต์โมล Tin (IV) chloride pentahydrate ($SnCl_4.5H_2O$) (98% บริษัท Fluka Sigma–Aldrich) กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที จนครบเวลา 30 นาที และปรับพีเอชด้วยการหยดกรดเกลือความเข้มข้น 2 โมลาร์ จนกระทั่งพีเอชเท่ากับ 3.5 กวนที่อุณหภูมิห้องต่อไปจนครบ 1 ชั่วโมง นำโซลที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สัดส่วนโดยโมลของ TTIP:C_2H_5OH คือ 1:82 (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบ $TiO_2/3SnO_2/N$ นำโซลที่ได้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเผาตัวอย่างภายใต้ภาวะบรรยากาศด้วยเตา LINDBERG/BLUE อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาค $TiO_2/3SnO_2/N$ ขั้นตอนสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 36

ง) การเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือ PVP ($TiO_2/3SnO_2$/PVP (TSP))

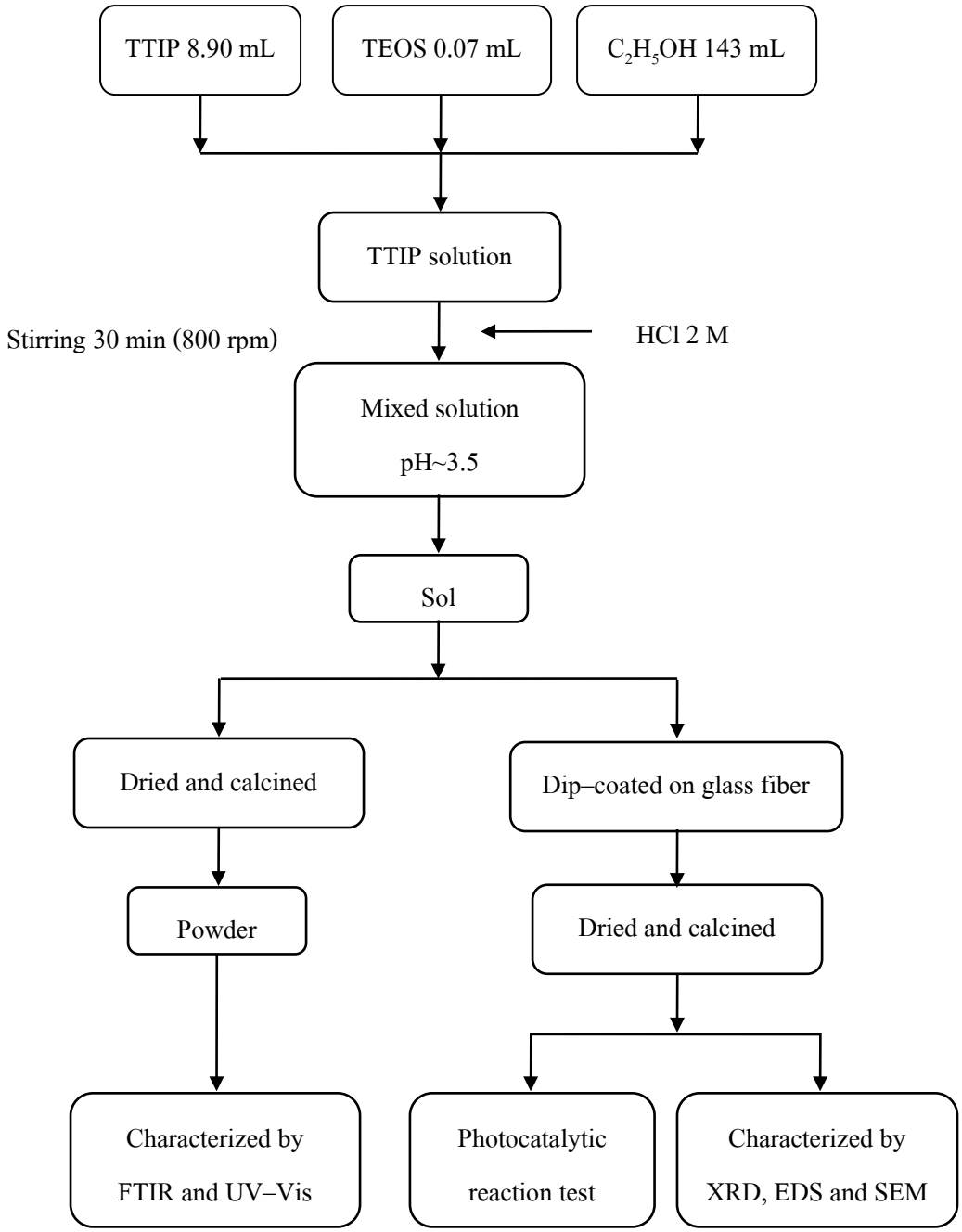
โดยใช้ TTIP 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติม 3 เปอร์เซนต์โมล ของ Tin (IV) chloride pentahydrate ($SnCl_4.5H_2O$, 98% บริษัท Fluka Sigma–Aldrich) และ PVP (Polyvinylpyrrolidone, K90 M_r 360,000 บริษัท Fluka Chemika) กวนด้วยความเร็วรอบที่ 800 รอบต่อนาที จนครบเวลา 30 นาที และปรับพีเอชด้วยการหยดกรดเกลือความเข้มข้น 2 โมลาร์ จนกระทั่งพีเอช เท่ากับ 3.5 กวนที่อุณหภูมิห้องจนครบเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำโซลที่เตรียมได้เก็บไว้ในตู้เย็น สัดส่วนโดยโมลของ TTIP:C_2H_5OH คือ 1:82 (Li et al., 2002) จะได้สารเคลือบ $TiO_2/3SnO_2$/PVP ทำการแปรผันปริมาณ PVP ที่ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซนต์โมล นำโซลไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาตัวอย่างภายใต้ภาวะบรรยากาศด้วยเตา LINDBERG/BLUE อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาค $TiO_2/3SnO_2$/PVP ขั้นตอนสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 37

2.2.2 การเคลือบฟิล์มบาง

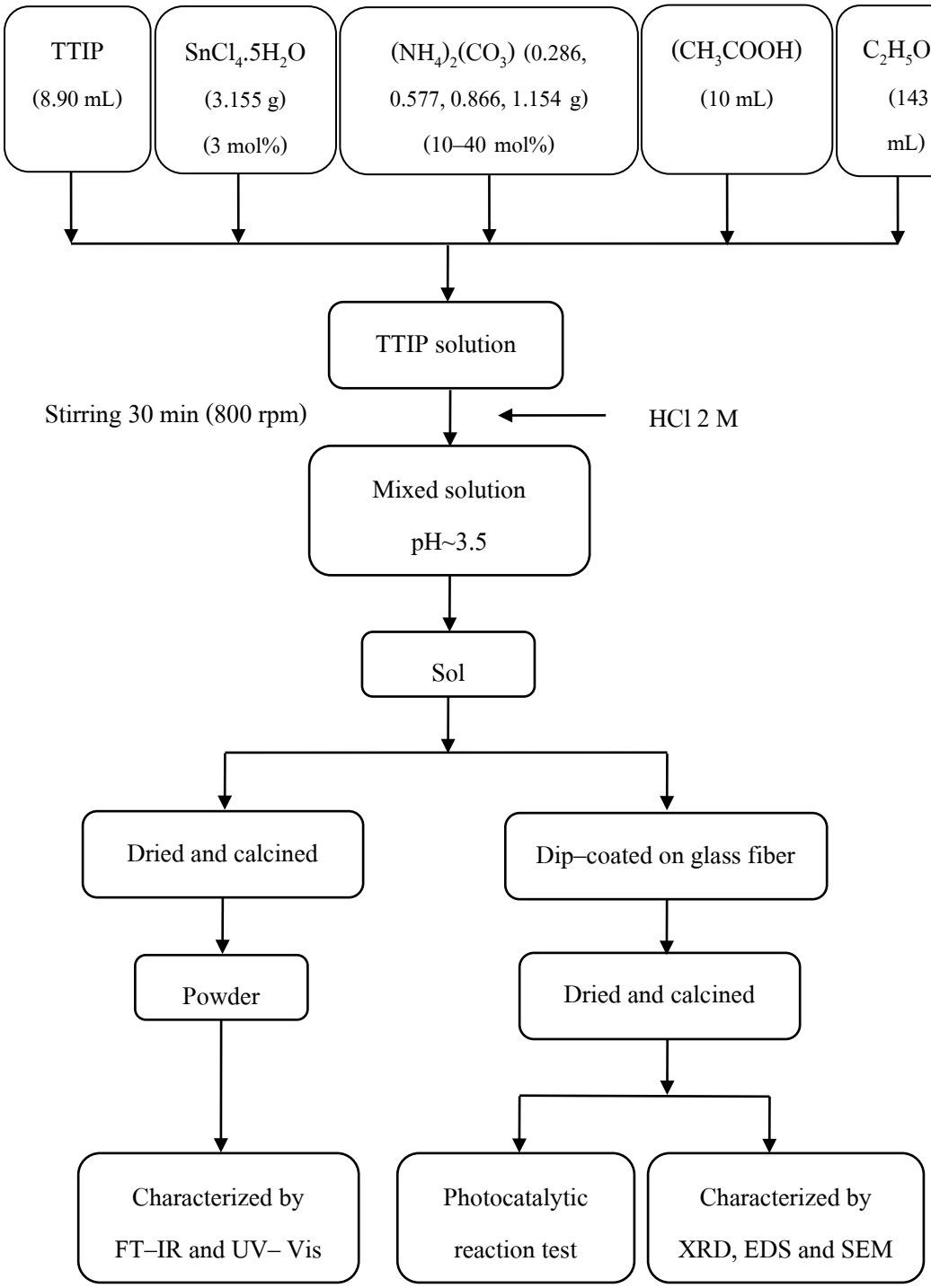
สารเคลือบที่อยู่ในภาวะโซลหลังจากสังเคราะห์เสร็จแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เคลือบฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้เส้นใยแก้วชนิด E–glass เป็นวัสดุฐาน ก่อนทำการเคลือบต้องทำความสะอาดเส้นใยแก้ว โดยนำเส้นใยแก้วไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไขมันที่เคลือบอยู่บนผิวของเส้นใยแก้ว และล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วทำการเคลือบเส้นใยแก้วด้วยสารเคลือบที่เตรียมไว้สูตรต่างๆ โดยในชั้นแรกทำการเคลือบด้วยสูตร $TiO_2/5SiO_2$ เพื่อช่วยยึดติดของชั้นฟิล์มที่ต้องการ ยกเว้นฟิล์มสูตร TiO_2 ที่เคลือบด้วยสารเคลือบชนิดเดียวกันทั้งสองชั้น ต่อมาทำการเคลือบเส้นใยแก้วอีกครั้งด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ ที่ต้องการ การเคลือบฟิล์มในชั้นที่สองไม่ควรรอให้ฟิล์มในชั้นแรกแห้งมากจนเกินไปเพราะจะทำให้ฟิล์มมีการแยกชั้นกัน นำฟิล์มที่เคลือบแล้วไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วล้างฟิล์มด้วยเครื่องอัลตราโซนิคในน้ำกลั่น เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดส่วนเกินให้หลุดออกไป แล้วอบอีกครั้งให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



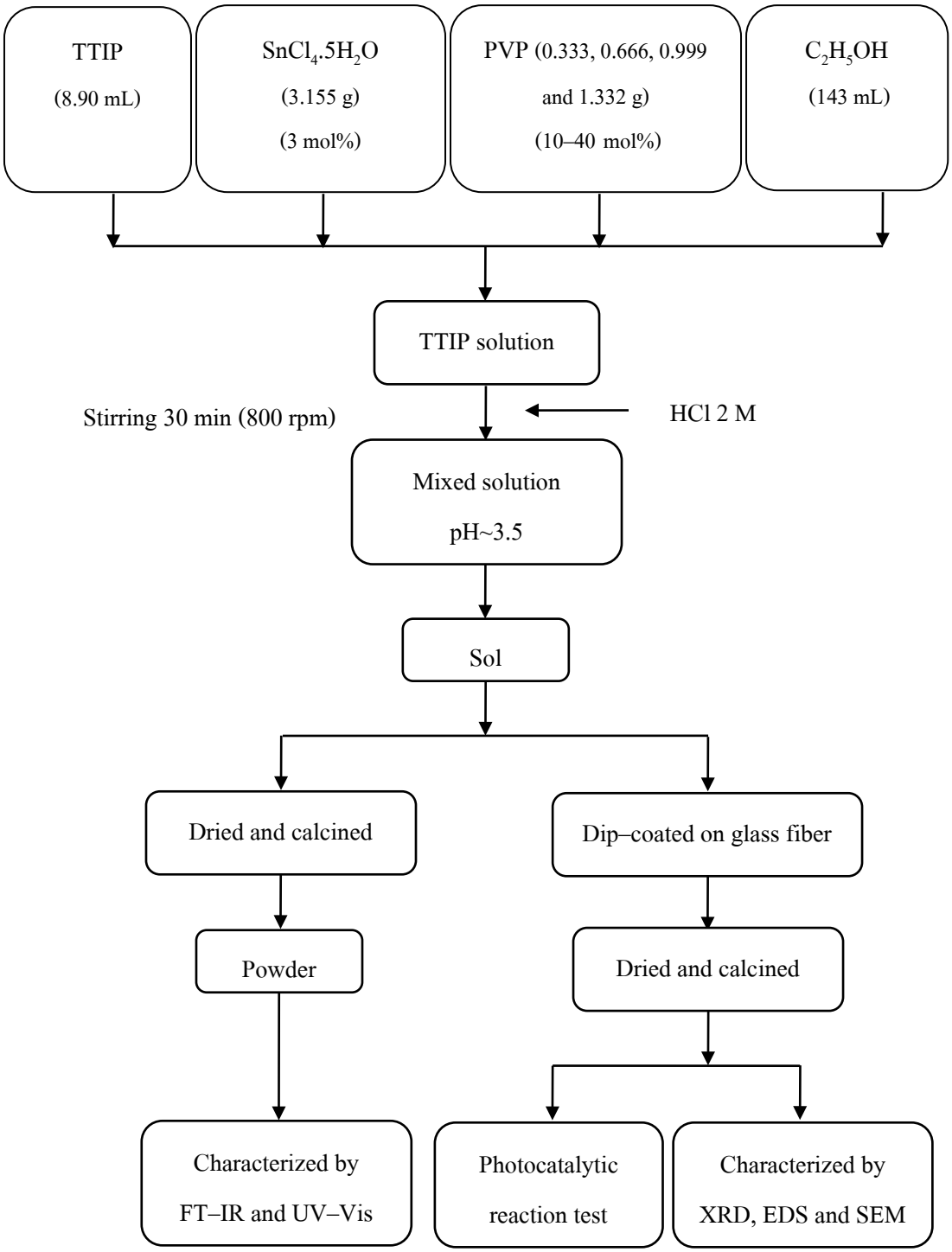
รูปที่ 34 การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2 ด้วยวิธีโซล–เจล



รูปที่ 35 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/5SiO_2$ ด้วยวิธีโซล–เจล



รูปที่ 36 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/3SnO_2/N$ ด้วยวิธีโซล–เจล

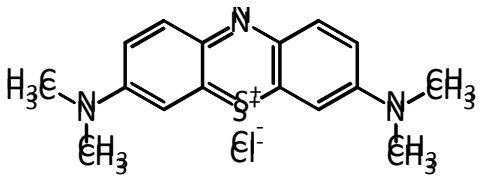


รูปที่ 37 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/3SnO_2/PVP$ ด้วยวิธีโซล–เจล

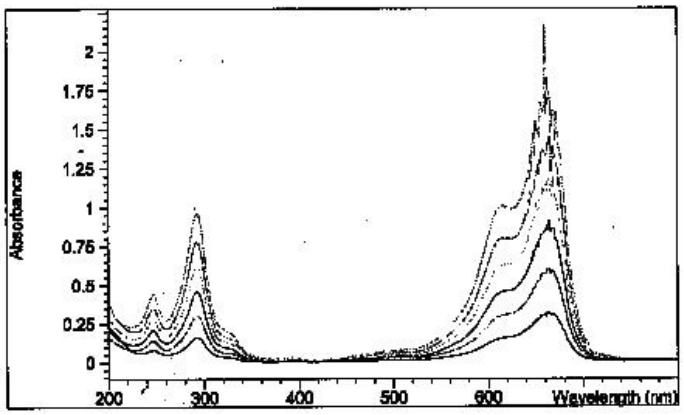
2.2.3 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

ก) การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสร้างกราฟเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสาร โดยเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 38 โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.2×10^{-5}–1.0×10^{-5} โมลาร์ วัดการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV–Vis ในช่วงความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าการดูดกลืนมากที่สุดในการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารละลายเมทิลีนบลู แสดงในรูปที่ 39

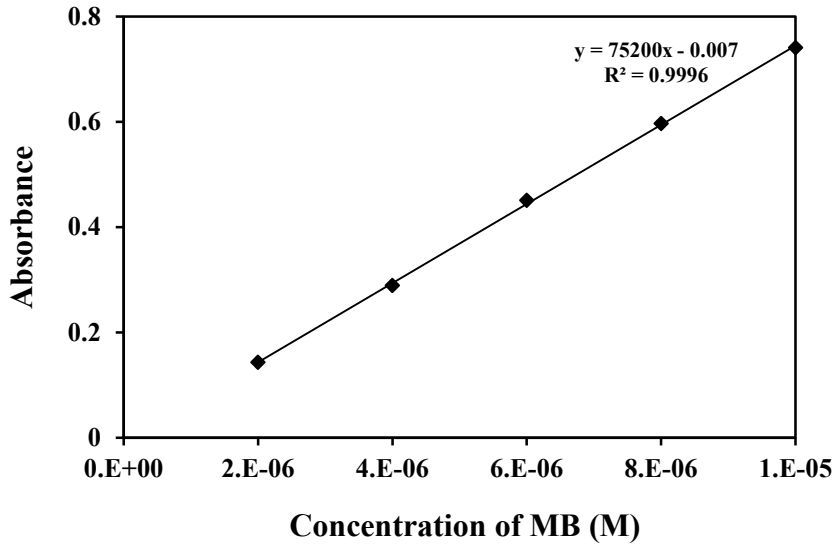


รูปที่ 38 โครงสร้างของเมทิลีนบลู



รูปที่ 39 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.5×10^{-5}–3.0×10^{-5} โมลาร์

กราฟมาตรฐานของสารเมทิลีนบลูในช่วง 0.2×10^{-5} – 1.0×10^{-5} โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 40 ซึ่งเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารกับค่าการดูดกลืน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9996 เพื่อนำสมการมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทดสอบตัวอย่างที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู 0.2×10^{-5}–1.0×10^{-5} โมลาร์ กับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

ข) ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลู

นำชิ้นงานซึ่งอยู่ในรูปของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ มาทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลู ในการทดสอบใช้เส้นใยแก้วที่เคลือบแล้ว 2 กรัม ต่อสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วและสารละลายเมทิลีนบลูใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีกำลัง 50 วัตต์ ซึ่งมีความเข้มแสง 3.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง แล้ววัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

การคำนวณเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (%Degradation) โดยสมการที่ (2.1)

$$\%\text{Degradation} = \frac{\left(C_0 - C\right)}{C_0} \times 100\ \% \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาทดสอบ

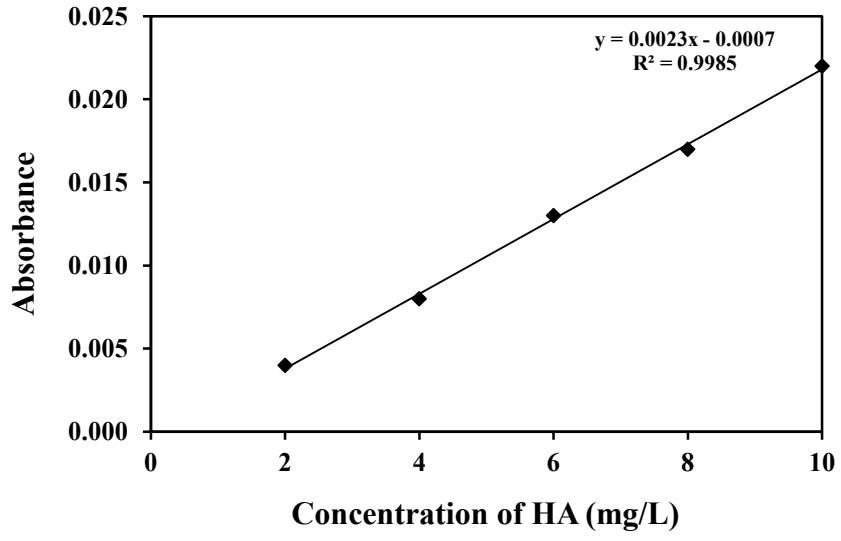
2.2.4 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮิวมิค (Humic acid)

1. เตรียมสารละลายกรดฮิวมิค (99%, Fluka Sigma–Aldrich) มีลักษณะผงสีน้ำตาล ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำกรดฮิวมิคที่ชั่งแล้วมากวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง นำสารที่ติดอยู่ที่กระดาษกรองไปอบในตู้อบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที คำนวณปริมาณของกรดฮิวมิคที่สามารถละลายน้ำได้จากผลต่างของปริมาณสารเริ่มต้นกับปริมาณสารที่ตกค้าง

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ผล โดยเตรียมสารละลายกรดฮิวมิค ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. นำสารละลายกรดฮิวมิคแต่ละความเข้มข้นมาวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่อง UV–Vis ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยใช้ Blank เป็นน้ำกลั่น พล๊อตค่าการดูดกลืนของกรดฮิวมิคกับความเข้มข้น กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮิวมิค 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 41 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)= 0.9985 นำสมการที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทดสอบตัวอย่างที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิค 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

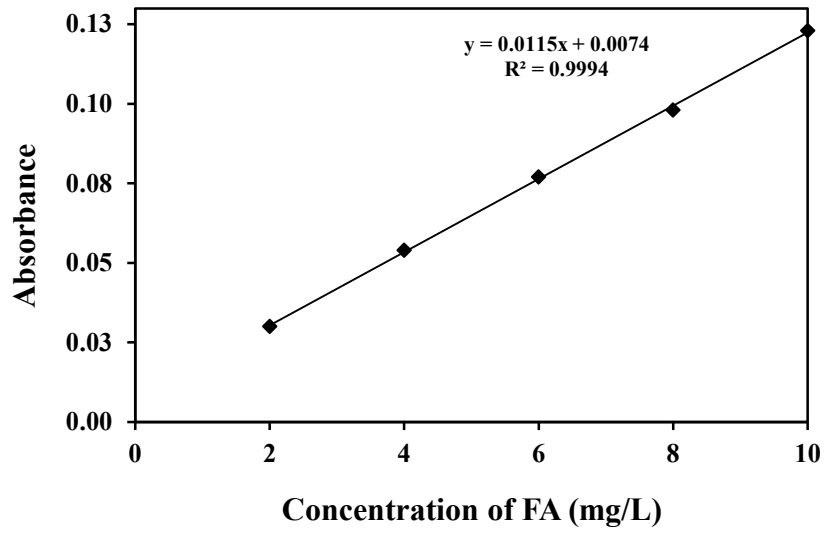
4. นำชิ้นงานที่อยู่ในรูปของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ไปทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิค ในการทดสอบใช้เส้นใยแก้วที่เคลือบแล้ว 2 กรัม ต่อสารละลายกรดฮิวมิคความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วและสารละลายกรดฮิวมิคใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีกำลัง 50 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาการลดลงของสารละลายกรดฮิวมิคเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของกรด ฮิวมิคโดยใช้สมการที่ (2.1)

2.2.5 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฟัลวิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดฟัลวิค (Fulvic acid)

1. เตรียมสารละลายกรดฟัลวิค (70%, Omnia) ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. นำสารละลายของกรดฟัลวิคแต่ละความเข้มข้นมาวัดด้วยเครื่อง UV–Vis ที่ความยาวคลื่น 299 นาโนเมตร โดยใช้ Blank เป็นน้ำกลั่น พล๊อตค่าการดูดกลืนของกรดฟัลวิคกับความเข้มข้น กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฟัลวิค 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 42 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9994 นำสมการที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกรดฟัลวิคที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวีที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฟัลวิค 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

3. ชิ้นงานที่นำมาทดสอบอยู่ในรูปของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฟัลวิค โดยใช้เส้นใยแก้วที่เคลือบแล้ว 2 กรัม ต่อสารละลายกรดฟัลวิค ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วและสารละลายกรดฟัลวิคใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีกำลัง 50 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของกรดฟัลวิคที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟัลวิคเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายกรดฟัลวิคโดยใช้สมการที่ (2.1)

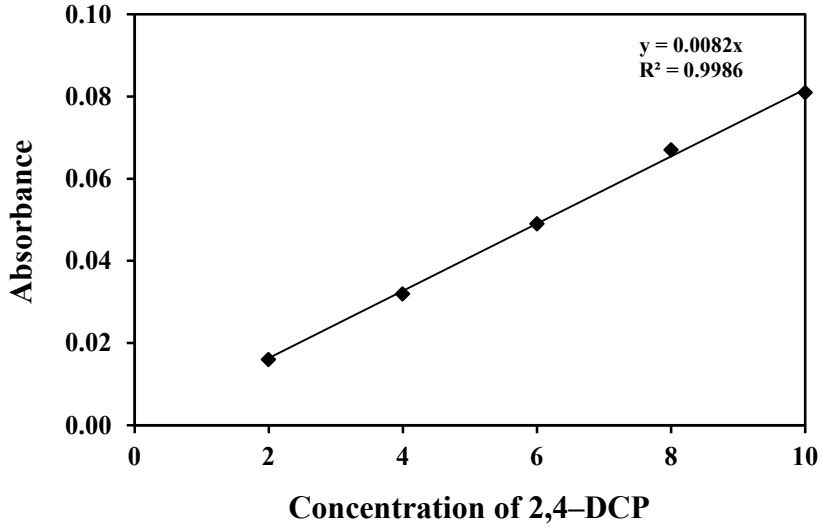
2.2.6 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์หาปริมาณ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (2,4–Dichlorophenol)

1. เตรียมสารละลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (99%, Fluka Sigma–Aldrich) ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. นำสารละลายของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล มาวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่อง UV–Vis ในแต่ละความเข้มข้น ที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร โดยใช้ Blank เป็นน้ำกลั่น พล็อตค่าการดูดกลืนของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล กับค่าความเข้มข้น กราฟมาตรฐานของสารละลาย 2,4–

ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 43 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9986 นำสมการที่ได้มาคำนวณค่าความเข้มข้นของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวีที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

3. ชิ้นงานที่นำมาทดสอบอยู่ในรูปของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล โดยนำเส้นใยแก้วที่เคลือบแล้ว 2 กรัม กับสารละลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และสารละลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลใส่ในบีกเกอร์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีกำลัง 50 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) ทดสอบเป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง แล้ววัดความเข้มข้นของสาร 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารละลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลโดยใช้สมการที่ (2.1)

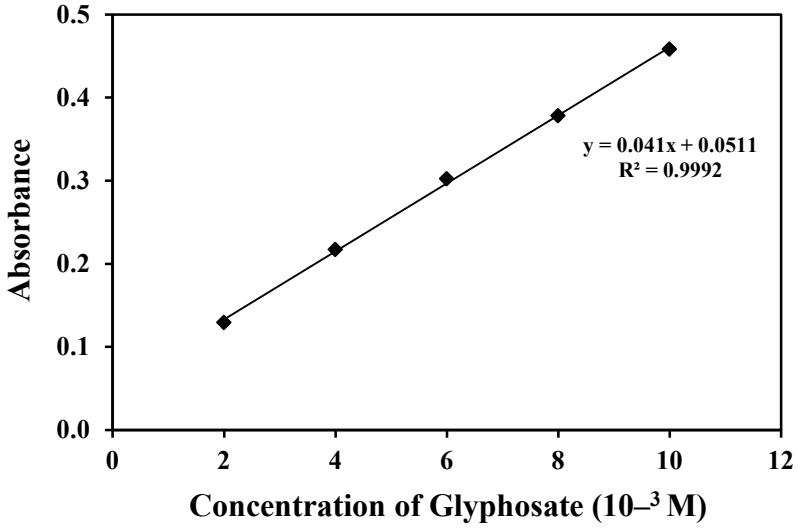
2.2.7 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายไกลโฟเสตของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์หาปริมาณไกลโฟเสต (Glyphosate)

ศึกษาการย่อยสลายไกลโฟเสตของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี Colorimetric method (Shifu, 2007) เนื่องจากผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายไกลโฟเสตด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะเป็นฟอสเฟต ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของไกลโฟเสตที่ย่อยสลายไปได้ด้วยการหาปริมาณของฟอสเฟตในสารละลาย ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. เตรียมสารละลายไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) (98% Fluka Sigma–Aldrich) ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.2×10^{-4}–1.0×10^{-4} โมลาร์ ด้วยน้ำกลั่น

2. นำสารละลายของไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแต่ละความเข้มข้นมาเติมน้ำยาเคมี (ชุดทดสอบฟอสเฟตจากหน่วยนวัตกรรมเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล) สารละลายฟอสเฟตจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบความเข้มของสี (Colorimetric method) แล้วนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่อง UV–Vis ที่ความยาวคลื่น 701 นาโนเมตร พล๊อตค่าการดูดกลืนกับความเข้มข้นของฟอสเฟตและสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายฟอสเฟตในช่วงความเข้มข้น 0.2×10^{-4}–1.0×10^{-4} โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 44 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9994 นำสมการที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทดลองที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไกลโฟเสต $0.2\text{x}10^{-4}$–$1.0\text{x}10^{-4}$ โมลาร์กับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

3. ชิ้นงานที่นำมาทดสอบอยู่ในรูปของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายไกลโฟเสต โดยนำเส้นใยแก้วที่เคลือบแล้ว 2 กรัม ต่อสารละลายไกลโฟเสตความเข้มข้น 1.0×10^{-4} โมลาร์ (16.9 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วและสารละลายไกลโฟเสตใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีกำลัง 50 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 3.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) ทดสอบที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของไกลโฟเสตจากปริมาณฟอสเฟตที่เพิ่มมากขึ้น นำสมการที่ได้ไปคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไกลโฟเสตโดยใช้สมการที่ (2.2)

$$\%\text{Degradation} = \frac{P_t}{P_0} \text{X } 100\% \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.2)$$

เมื่อ P_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (1.0×10^{-4} โมลาร์)

P_t คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟต ณ เวลาทดสอบ

2.2.8 กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus*

จากผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู จึงนำสูตรสารเคลือบ TiO_2, $TiO_2/3SnO_2$, $TiO_2/3SnO_2/20N$ และ $TiO_2/3SnO_2/40PVP$ มาทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus*

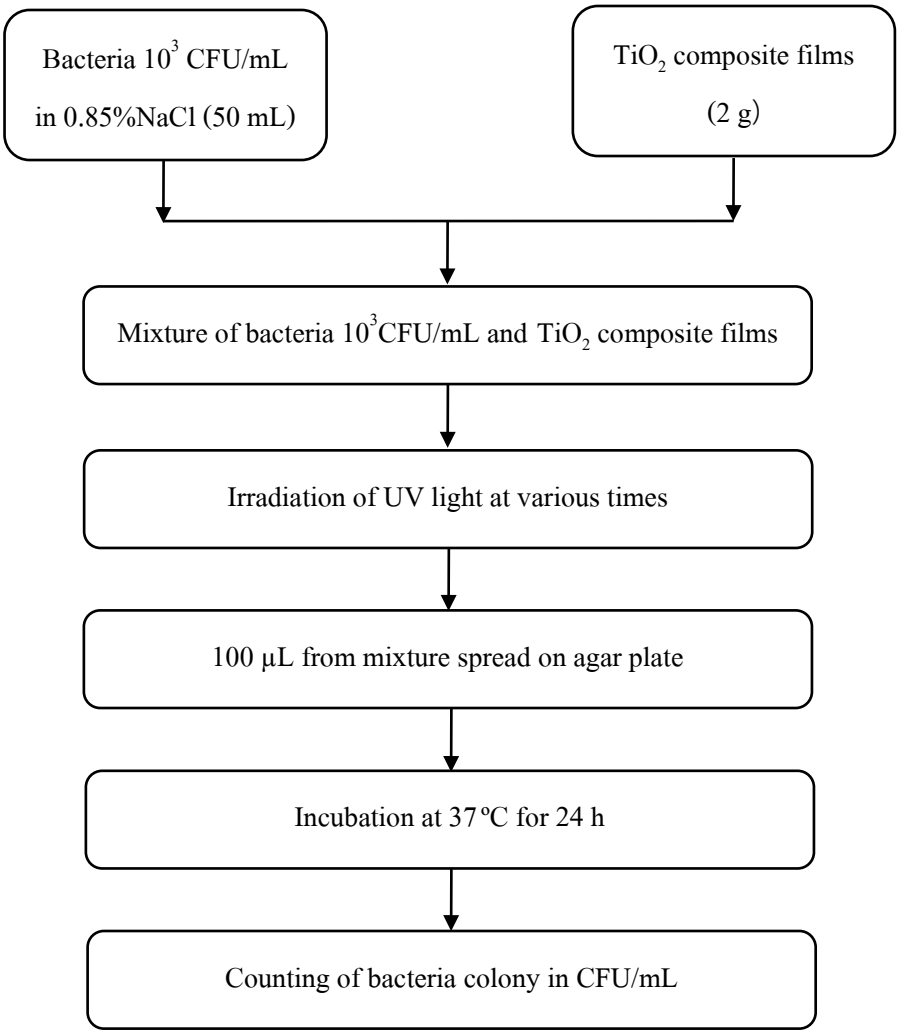
เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบคือ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus* โดยเริ่มต้นจากนำเชื้อ (ได้การอนุเคราะห์จากภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์) ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลว (Tryticase soy broth) 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน 0.85% โซเดียมคลอไรด์ (9 มิลลิลิตร) ในน้ำกลั่น โดยใช้วิธี Serial dilution method แล้วนำเชื้อปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ไปหยดลงบนอาหารแข็ง สำหรับเชื้อ *E.coli* และ *S.typhi* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ อาหารที่นำมาใช้ คือ Macconkey agar ส่วนเชื้อ *S.aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก อาหารที่นำมาใช้ คือ Nutrient agar โดยใช้เทคนิค Spread plate แล้วเจือจางจำนวนเชื้อเพื่อให้จำนวนเชื้ออยู่ในช่วง 30–300 โคโลนี หลังจากที่รู้ความเข้มข้นของเชื้อตั้งต้นแล้ว ก็นำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้มีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร แล้วนำเชื้อแบคทีเรียที่เตรียมได้ไปทดสอบการฆ่าเชื้อกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ในการทดสอบนี้ใช้เส้นใยแก้วที่เคลือบแล้วปริมาณ 2 กรัม

ทดสอบกับน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างและเชื้อแบคทีเรียเติมลงในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีกำลัง 50 วัตต์ ซึ่งความเข้มแสง 3.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรโดยความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) เมื่อเวลาผ่านไปก็ดูดเชื้อที่ผ่านการรับแสงที่เวลาต่างๆ โดยใช้นำตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนอาหารแข็ง แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 45 หลังจากนั้นทำการบันทึกผลโดยการถ่ายรูปและนับจำนวนเชื้อที่เหลือ สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย (% Disinfection) โดยใช้สมการที่ (2.3)

$$\%\ \text{Disinfection} = \frac{N}{N_0} x100\% \qquad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร

N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบ โคโลนีต่อมิลลิลิตร



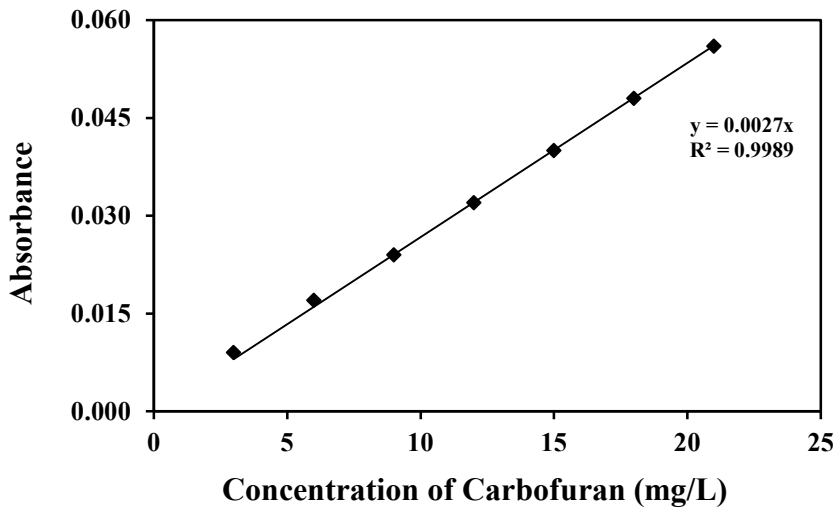
รูปที่ 45 ขั้นตอนการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

2.2.9 การทดสอบการดูดซับคาร์โบฟูราน ด้วยถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์โบฟูราน (Carbofuran)

1. เตรียมสารละลายคาร์โบฟูราน (98%, Fluka Sigma–Aldrich) ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 3–21 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. นำสารละลายของคาร์โบฟูรานในแต่ละความเข้มข้นมาวัดด้วยเครื่อง UV–Vis ทดสอบที่ความยาวคลื่น 285 นาโนเมตร โดยใช้ Blank เป็นน้ำกลั่น พล๊อตค่าการดูดกลืนของคาร์โบฟูรานกับความเข้มข้น กราฟมาตรฐานของคาร์โบฟูราน 3–21 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 46 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9989 นำสมการที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูราน 3–21 มิลลิกรัมต่อลิตรค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

3. การทดสอบการดูดซับสารละลายคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ (Granular about 1.5 mm ,Loba Chemie, Iodine absorption =750–800 mg/g) โดยนำถ่านกัมมันต์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปทดสอบการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 2, 4, 6, 8 และ 10 กรัม ต่อสารละลาย คาร์โบฟูรานความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำถ่านกัมมันต์และสารละลาย คาร์โบฟูรานใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของคาร์โบฟูราน ที่เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาการลดลงของ

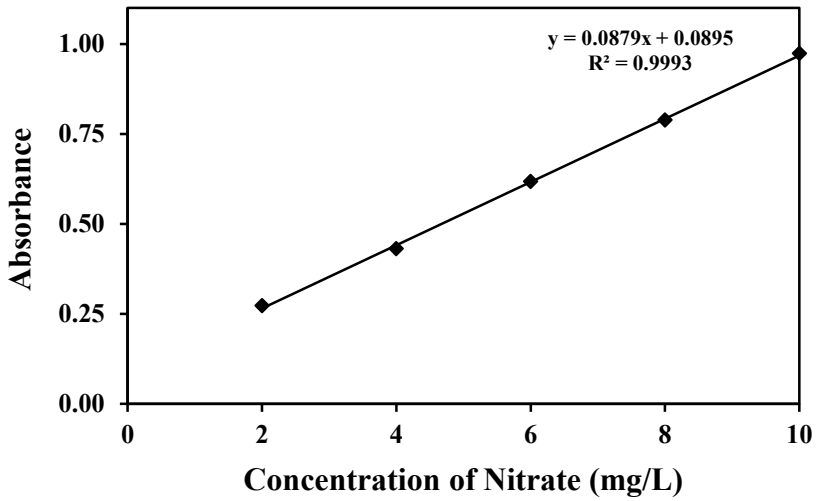
ความเข้มข้นของสารละลายคาร์โบฟูรานเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นก็ทดสอบการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างกันของคาร์โบฟูราน คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และทดสอบโดยบรรจุถ่านกัมมันต์ไว้ในหลอดอะคริลิคปริมาณ 100 กรัม ต่อหลอด ซึ่งทดสอบจำนวน 1, 2, 3 และ 4 หลอด ที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที สมารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายคาร์โบฟูรานโดยได้ใช้สมการที่ (2.1)

2.2.10 การทดสอบการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรต (Nitrate)

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) (99% Ajax Finechem) ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. นำสารละลายของโพแทสเซียมไนเตรตแต่ละความเข้มข้นมาเติมน้ำยาเคมี (ชุดทดสอบไนเตรทจากภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) สารละลายไนเตรตก็จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบความเข้มของสี แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง UV–Vis ที่ความยาวคลื่น 542 นาโนเมตร พล็อตค่าการดูดกลืนกับความเข้มข้นของไนเตรตและสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไนเตรตในช่วง 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 47 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9993 นำสมการที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดลองที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไนเตรต 2–10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่าการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง UV–Vis

3. การทดสอบการดูดซับสารละลายไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ (Granular about 1.5 mm ,Loba Chemie) โดยนำถ่านกัมมันต์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทดสอบโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 2, 4, 6, 8 และ 10 กรัม ต่อสารละลายไนเตรตความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำถ่านกัมมันต์และสารละลายไนเตรตใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำน้ำตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณความเข้มข้น ของไนเตรตเป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่อง UV–Vis เพื่อศึกษาการลดลงของสารละลายไนเตรตเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นก็ทดสอบการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างกันของไนเตรต คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และทดสอบโดยบรรจุถ่านกัมมันต์ไว้ในหลอดอะคริลิคปริมาณ 100 กรัม ต่อหลอด ซึ่งทดสอบจำนวน 1, 2, 3 และ 4 หลอด ที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไนเตรตได้โดยใช้สมการที่ (2.1)

2.3 การตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์ม

1) XRD (X–ray diffractometry)

วิเคราะห์ XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกและคำนวณหาขนาดผลึกของสารเคลือบที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้สมการของ Scherer ดังสมการที่ (2.4)

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad \text{……. (2.4)}$$

เมื่อ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (CuK_{α} = 0.15406 นาโนเมตร)

β คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)

θ คือ มุมสะท้อน (เรเดียน)

2) SEM (Scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบจะมีความละเอียดสูง สามารถเห็นรายละเอียดบนพื้นผิวของวัตถุที่มีขนาด 2–5 นาโนเมตร เครื่อง SEM บางรุ่นอาจมีกำลังขยายถึง 120,000 เท่า ภาพที่ได้จากการถ่ายจะมีความชัดลึกสูง มีมิติ ภาพที่ได้จึงมีความชัดเจนมากกว่าภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาที่ให้ภาพเป็นแบบ 2 มิติ และมีกำลังขยายเพียง 1,000 เท่า ในงานวิจัยนี้ใช้ SEM FEI Quanta 400 และ JEOL JSM–5200 สำหรับตรวจดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มและลักษณะของเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบ

3) UV–Vis DRS (UV–Visible diffuse reflectance spectroscopy)

UV–Vis DRS (UV–2401, Shimadzu, Japan) ถูกใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้และคำนวณแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาค TiO, $TiO_2/3SnO_2$, $TiO_2/3SnO_2/N$ และ$TiO_2/3SnO_2/PVP$ ซึ่งแปรผันปริมาณ N และ PVP 10–40 เปอร์เซนต์โมล โดยใช้ $BaSO_4$ เป็นตัวอ้างอิงแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อสะดวกในการวัดแถบช่องว่างพลังงาน และคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ E_g คือ แถบช่องว่างแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)

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

c คือ ความเร็วของแสง (3×10^{8} เมตรต่อวินาที)

λ คือ ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)

4) XPS (X–ray photoelectron spectroscopy)

เทคนิค XPS ใช้วิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่สามารถให้ข้อมูลสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุ เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมีและสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น XPS ใช้วิเคราะห์วัสดุได้มากมายหลายชนิด ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โลหะผสม พอลิเมอร์ เซรามิก และสารเคลือบ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง XPS รุ่น AXIS Ultra DLD สำหรับการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ โดยศึกษาจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง

5) FTIR (Fourier transformed infrared spectrophotometer)

เครื่อง FTIR ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง โดยการเปรียบเทียบจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่างที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งพีคที่เกิดขึ้น ถ้าหากเป็นตำแหน่งที่ตรงกันแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน สำหรับในงานวิจัยใช้เครื่อง FTIR รุ่น Bruker Equinox 55 โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) 400–4,000 cm^{-1} เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้

6) UV–Vis (Ultraviolet–visible spectrophotometer)

เครื่อง UV–Vis ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด จากการสแกนที่ช่วงความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร เพื่อหาตำแหน่งความยาวคลื่นที่แปรผันตรงกับความเข้มข้นของสาร และสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลาย หลังจากนั้นก็วัดความเข้มข้นของสารเคมีที่ต้องการจะทดสอบ

7) AFM (Atomic force microscopy)

AFM (Multi–Mode scanning probes Veeco NanoScope IV) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของสารเคลือบและคำนวณหาพื้นที่ผิวของฟิล์มด้วยเครื่อง AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (Atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกมาในลักษณะของภาพพื้นผิว

2.4 การออกแบบและการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำดื่ม

หลังจากที่มีการศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนเส้นใยแก้วแล้ว หลังจากนั้นก็ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม SolidWorks2013 เมื่อออกแบบเสร็จแล้วก็สร้างเครื่องปฏิกรณ์ขึ้นมา และบรรจุเส้นใยแก้วที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์และทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ แล้วเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยถ่านกัมมันต์และศึกษาประสิทธิภาพหลังจากเพิ่มถ่านกัมมันต์เข้าไปในระบบ

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

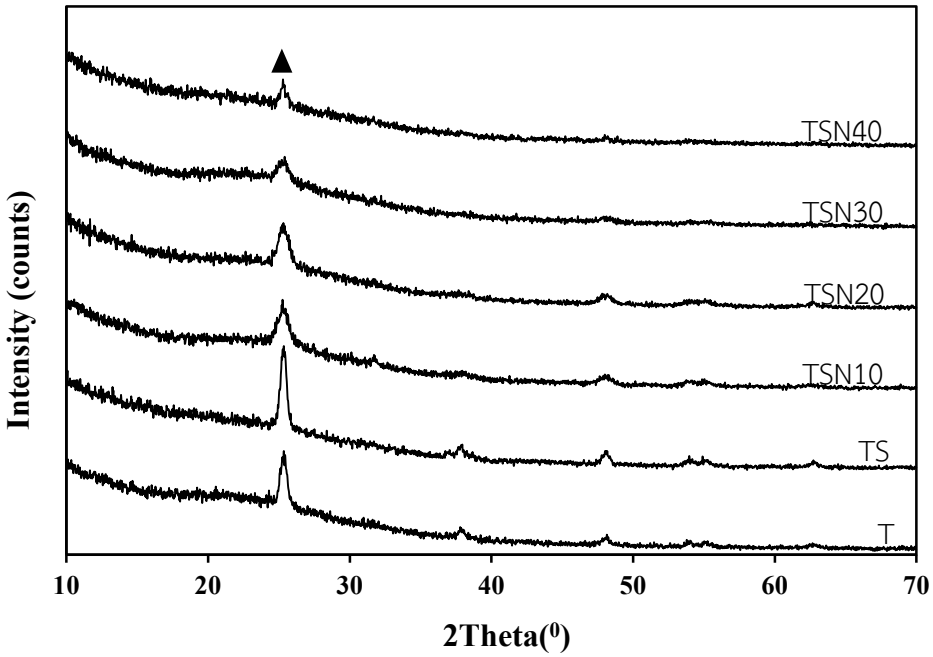
ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุกและไนโตรเจนบนเส้นใยแก้วด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้และศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus* และย่อยสลายกรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอลและไกลโฟเสต และศึกษาการดูดซับไนเตรตและคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ แล้วออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีฟิล์มไทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยดีบุกร่วมกับไนโตรเจนและถ่านกัมมันต์ แล้วทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นด้วยการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำโดยมีผลการศึกษาดังนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD

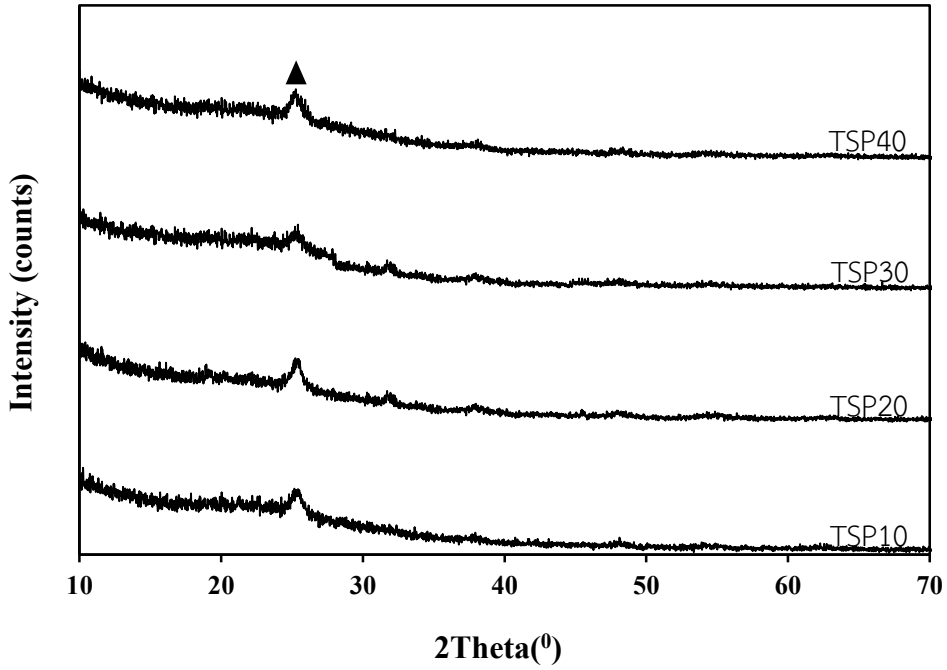
จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว ซึ่งเจือด้วยดีบุก ดีบุกร่วมกับไนโตรเจน (แหล่งของไนโตรเจน คือ แอมโมเนียมคาร์บอเนต) (รูปที่ 48) และดีบุกร่วมกับ PVP (รูปที่ 49) โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า เกิดเฉพาะเฟสอะนาเทสเท่านั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 48 พบว่า การเจือด้วยดีบุกเพียงอย่างเดียว พีคที่เกิดขึ้นจะสูงและแคบ แสดงว่าเฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นมีความเป็นผลึกสูง แต่เมื่อเจือไนโตรเจนเพิ่มเข้าไป พบว่า พีคที่เกิดขึ้นจะต่ำและมีฐานที่กว้าง เมื่อเปรียบเทียบกัน พบว่า การเจือด้วยไนโตรเจนทำให้ความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดผลึกที่เล็กทำให้การจัดเรียงไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อเผาทำให้การจัดเรียงตัวอะตอมใหม่ ทำให้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 49 พบว่า การเจือด้วย PVP พีคที่เกิดขึ้นคล้ายกับการเจือด้วยไนโตรเจนแต่มีพีคที่ต่ำกว่า เมื่อเจือด้วย PVP ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่า พีคที่เกิดขึ้นจะต่ำและมีฐานที่กว้างมากกว่าการเจือที่ปริมาณน้อย ซึ่งส่งผลต่อขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส

จากตารางที่ 9 เมื่อพิจารณาขนาดผลึกที่คำนวณจากพีคที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สมการของ Sherrer พบว่า ฟิล์มที่ไม่มีการเจือและฟิล์มที่เจือด้วยดีบุกมีขนาดผลึกเท่ากับ 17.2 นาโนเมตร ส่วนฟิล์มที่เจือด้วยไนโตรเจนมีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสอยู่ในช่วง 9.8–

23.0 นาโนเมตร ซึ่งการเจือไนโตรเจนสามารถทำให้ผลึกขนาดเล็กลงได้เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเจือและฟิล์มที่เจือด้วยดีบุก โดยปริมาณไนโตรเจนที่เหมาะสม คือ 20 เปอร์เซ็นต์โมล โดยมีขนาดผลึกเพียง 9.8 นาโนเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนเป็น 40 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่า ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นเป็น 23.0 นาโนเมตร เนื่องจากเมื่อเจือด้วยไนโตรเจนในปริมาณมากๆ ทำให้แลตทิซเกิดการบิดเบี้ยว ส่งผลให้เกิดความเค้นขึ้นภายในโครงสร้างผลึกทำให้มีขนาดผลึกใหญ่ขึ้น ตามเหตุผลที่ Chen และคณะ (2008) ได้กล่าวไว้ ส่วนการเจือด้วย PVP พบว่า มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสอยู่ในช่วง 8.4–12.9 นาโนเมตร (ตารางที่ 9) เมื่อเพิ่มปริมาณ PVP ให้สูงขึ้น พบว่า ขนาดผลึกก็ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งปริมาณ PVP ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสเล็กที่สุดเพียง 8.4 นาโนเมตรเท่านั้น



รูปที่ 48 XRD patterns ของฟิล์ม TSN เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 49 XRD patterns ของฟิล์ม TSP เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 9 ขนาดผลึกที่คำนวณโดยใช้สมการของ Scherer ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ

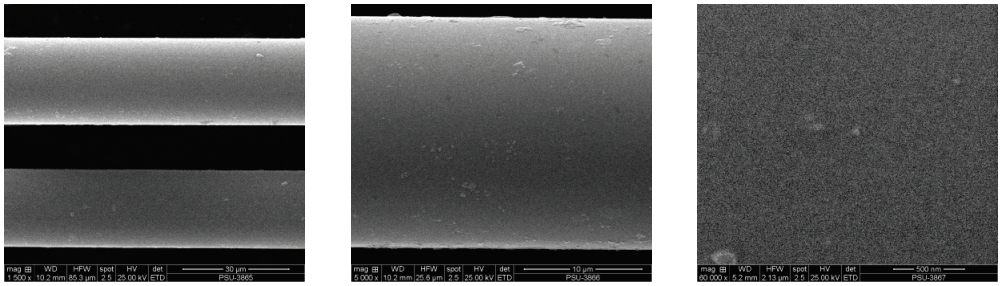
ชนิดของฟิล์ม	**ขนาดผลึก (nm)**
T	17.2
TS	17.2
TSN10	13.8
TSN20	9.8
TSN30	13.8
TSN40	23.0
TSP10	12.9
TSP20	10.3
TSP30	8.4
TSP40	8.6

3.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM

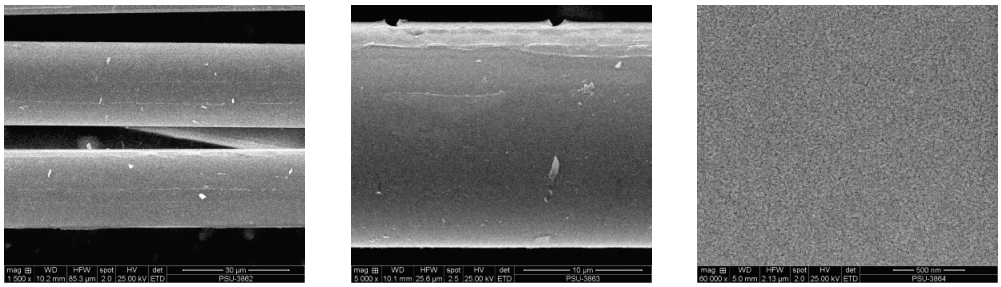
ผลการวิเคราะห์ลักษณะผิวของเส้นใยแก้วและฟิล์มสูตรต่างๆ ที่เคลือบบนเส้นใยแก้ว (รูปที่ 50ก–ฒ) โดยใช้กำลังขยายที่ต่างกัน คือ 1,500, 5,000 และ 60,000 เท่า ตามลำดับ รูปที่ 50 ก–ค แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยแก้วที่ไม่มีการเคลือบ ซึ่งพื้นผิวจะมีลักษณะเรียบ ส่วนรูปที่ 50 ช–ฌ เป็นฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุก จากรูปจะเห็นว่าพื้นผิวจะมีอนุภาคเล็กๆ ทำให้ผิวไม่เรียบ เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยมีขนาดเกรนประมาณ 60–80 นาโนเมตร ส่วนรูปอื่นๆ จะเป็นฟิล์มสูตร T (รูปที่ 50ง–ฉ), TSN20 (รูปที่ 50ญ–ฏ) และ TSP40 (รูปที่ 50ฐ–ฒ) ซึ่งมีพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดผลึกที่เล็กทำให้พื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเจือและฟิล์มที่มีการเจือด้วยดีบุก เมื่อถ่ายดูโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม TSN20 ที่กำลังขยายต่างๆ (แสดงดังรูปที่ 51ก–ค) จะเห็นฟิล์มกับเส้นใยแก้วได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 51ค ซึ่งสามารถวัดความหนาของฟิล์มได้ประมาณ 400–500 นาโนเมตร

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่กระจายอยู่บนเส้นใยแก้วและเส้นใยแก้วที่มีการเคลือบสูตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 52 จากการวิเคราะห์ พบว่า มีพีคของธาตุต่างๆ ที่กระจายอยู่บนเส้นใยแก้วที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเจอธาตุ Ti ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากรังสีเอ็กเรย์ทะลุผ่านไปยังวัสดุฐาน จากผลการทดสอบดังกล่าว พบว่า วัสดุฐานประกอบไปด้วยธาตุ Si, C, O, Al และ Ca นอกจากนี้ยังพบธาตุ N เป็นพีคต่ำๆ อยู่ด้วยในฟิล์ม TSN20 และ TSP40 เมื่อนำพีคที่ได้ไปคำนวณในเชิงปริมาณ (แสดงในตารางที่ 10) พบว่า ปริมาณธาตุ Ti พบมากที่สุด 4.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากฟิล์ม TSP40 รองลงมา คือ ฟิล์มสูตร TSN20 พบว่า มีปริมาณธาตุ Ti 4.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนฟิล์มที่มีปริมาณธาตุ Ti น้อยที่สุด คือ TS ส่วนปริมาณธาตุ N ที่พบจากฟิล์ม TSN20 และ TSP40 คือ 1.15 และ 0.68 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

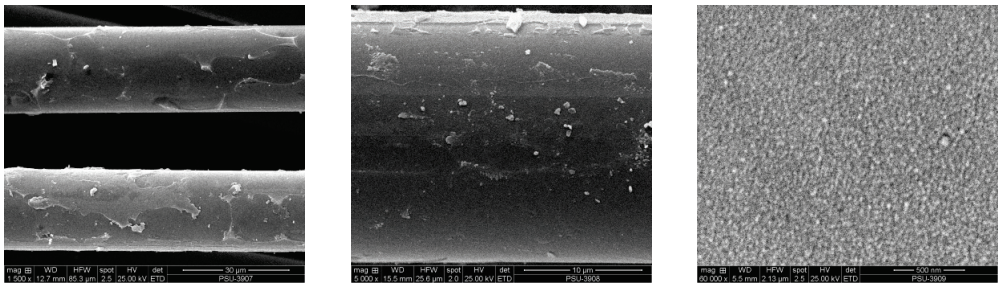
(ก) GF 1,500X (ข) GF 5,000X (ค) GF 60,000X



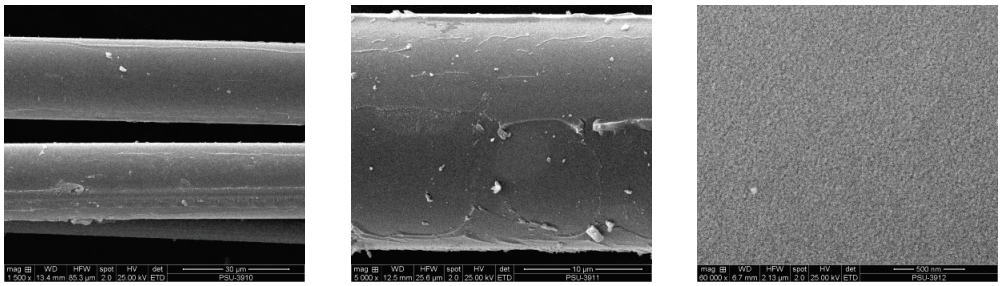
(ง) T 1,500X (จ) T 5,000X (ฉ) T 60,000X



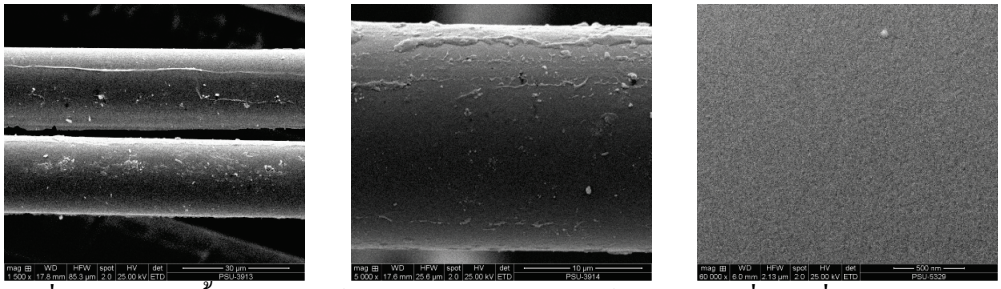
(ช) TS 1,500X (ซ) TS 5,000X (ฌ) TS 60,000X



(ญ) TSN20 1,500X (ฎ) TSN20 5,000X (ฏ) TSN20 60,000X

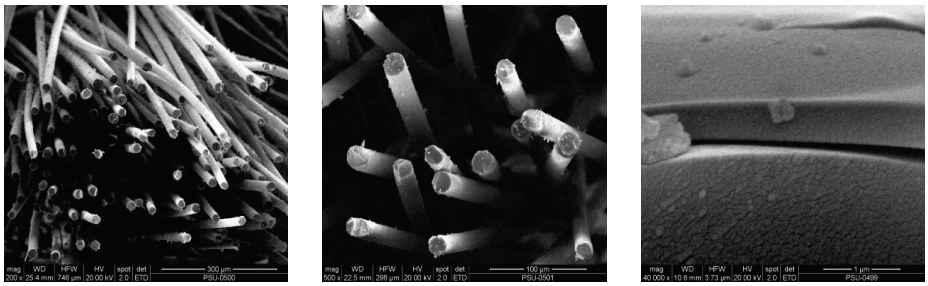


(ฐ) TSP40 1,500X (ฑ) TSP40 5,000X (ฒ) TSP40 60,000X

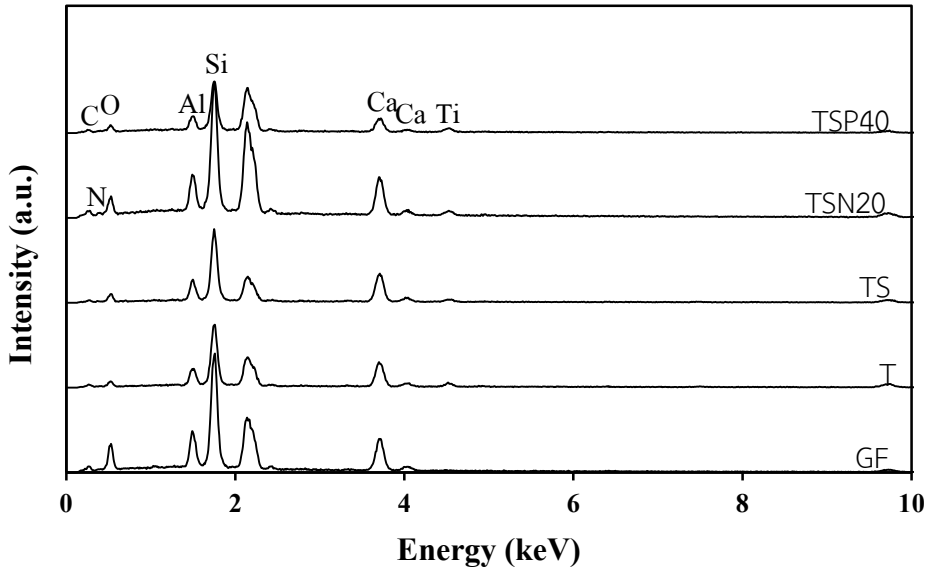


รูปที่ 50 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

(ก) (ข) (ค)



รูปที่ 51 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตร TSN20 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) 200 เท่า (ข) 500 เท่า และ (ค) 40,000 เท่า



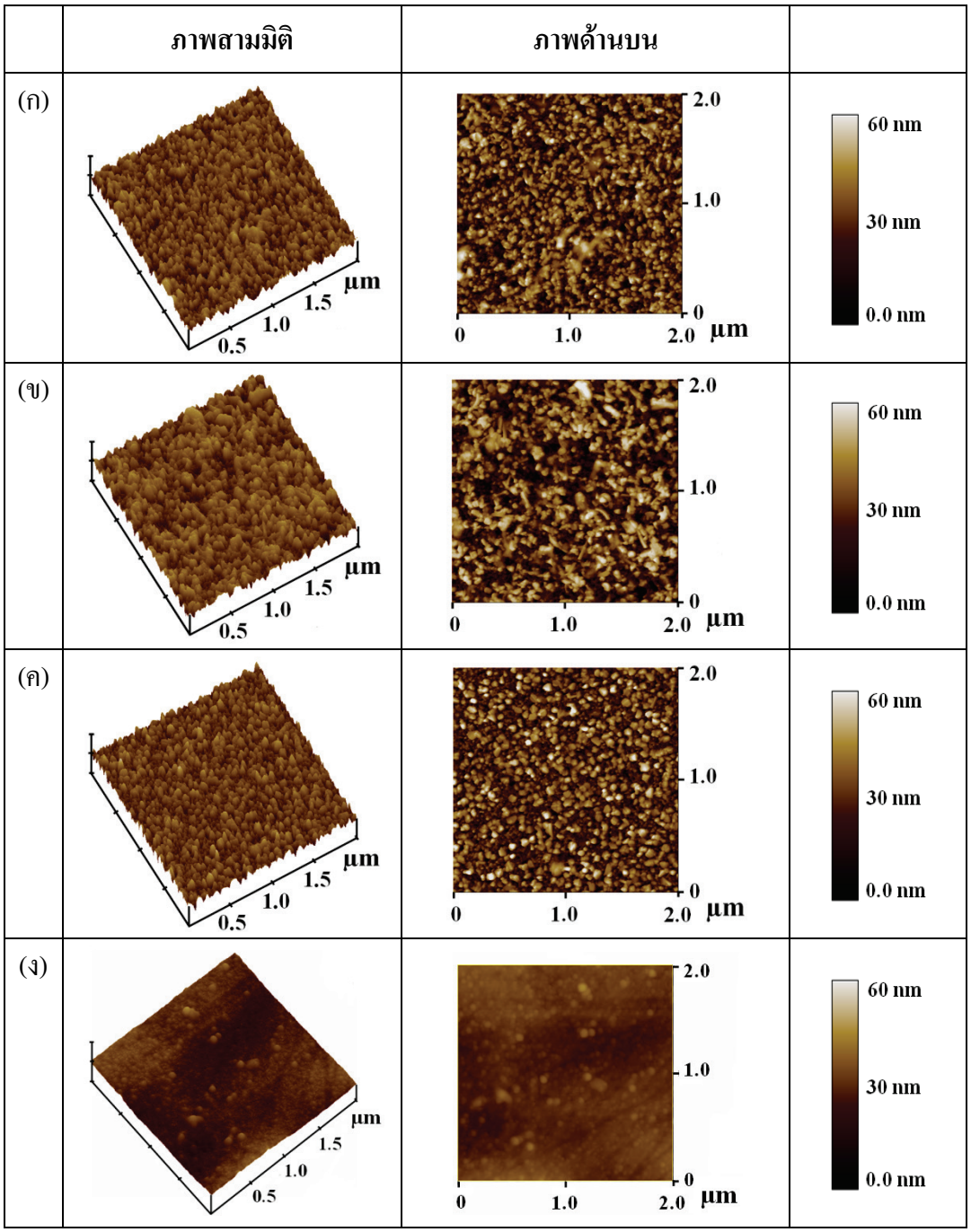
รูปที่ 52 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่กระจายอยู่บนฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	ปริมาณธาตุ (wt%)						
	Ti	O	C	Al	Si	Ca	N
Glass fibers	–	22.77	8.26	13.21	34.97	20.79	–
T	3.59	19.59	11.70	8.96	34.75	21.41	–
TS	3.28	18.32	10.20	9.22	35.27	23.71	–
TSN20	4.27	15.90	8.97	8.63	34.48	26.59	1.15
TSP40	4.32	15.11	9.65	8.40	35.46	26.38	0.68

3.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค AFM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุก ดีบุกร่วมกับไนโตรเจนและดีบุกร่วมกับ PVP (รูปที่ 53) โดยใช้เครื่อง AFM จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ โดยมีค่าความขรุขระอยู่ในช่วง 2–10 นาโนเมตร (ตารางที่ 11) ซึ่งฟิล์มสูตร TS จะมีค่าความขรุขระมากที่สุด รองลงมา คือ ฟิล์มสูตร T เนื่องจากฟิล์มทั้งสองสูตรนี้มีขนาดผลึกที่ใหญ่ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบ (จากตารางที่ 9) แต่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มสองสูตรนี้ จากรูปที่ 53ก และ 53ข พบว่า ฟิล์มสูตร TS มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM (รูปที่ 50ฌ) ทำให้ฟิล์มดังกล่าวมีค่าความขรุขระมากกว่าฟิล์มสูตร T ส่วนฟิล์มสูตร TSN20 และ TSP40 (รูปที่ 53ก และ 53ข) มีค่าความขรุขระที่น้อย เนื่องจากมีขนาดผลึกที่เล็ก (จากตารางที่ 9) และมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบทำให้มีค่าความขรุขระน้อย ส่วนฟิล์มสูตร TSP40 มีค่าความขรุขระน้อยที่สุดเพียง 2.17 นาโนเมตร เนื่องจากฟิล์มมีขนาดผลึกที่เล็กที่สุด (8.6 นาโนเมตร) เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วย AFM (ตารางที่ 11) พบว่า ฟิล์มสูตร TSN20 มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ถึงแม้ว่าฟิล์มสูตรดังกล่าวจะมีความขรุขระที่น้อยกว่าฟิล์มสูตร T และ TS ก็ตาม แต่ฟิล์มสูตร TSN20 มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามาก ส่งผลให้มีพื้นผิวที่มากกว่า ซึ่งการมีพื้นผิวที่มากก็จะส่งผลดีในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์



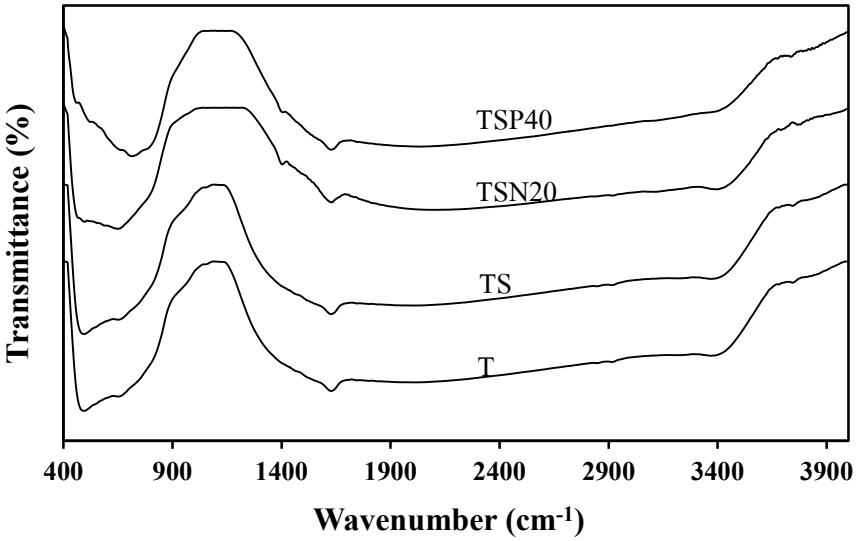
รูปที่ 53 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) T (ข) TS (ค) TSN20 และ (ง) TSP40

ตารางที่ 11 ความขรุขระและพื้นผิวของของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่

ชนิดของฟิล์ม	ความขรุขระของชั้นฟิล์ม (nm)	พื้นที่ผิว (μm^2)
T	9.14	5.71
TS	10.52	5.33
TSN20	8.34	5.97
TSP40	2.17	4.01

3.4 ผลการวิเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR โดยการทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงและวัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แล้วแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า IR spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะ โมเลกุลของสสารจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของ Functional groups ในโมเลกุลนั้นๆ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล–เจล เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 54 และข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่และชนิดของการสั่น สรุปดังตารางที่ 12 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าที่เลขคลื่น 2900–3600 cm^{-1} จะมีกลุ่มของ O–H stretching โดยเป็นพันธะไฮโดรเจนที่มีลักษณะพีคที่กว้าง ที่เลขคลื่น 1630–1640 cm^{-1} จะเป็นพีคของ O–H bending ของน้ำในโครงสร้างผลึก ที่เลขคลื่น 1400 cm^{-1} จะเป็นพีคของ N–H bending และที่ตำแหน่งพีค 500–700 cm^{-1} จะเป็นพีคของ Ti–O stretching จากรูปที่ 54 จะแสดงพีคของไนโตรเจน ซึ่งมาจากอนุภาคสูตร TSN20 และ TSP40 จากผลการวิเคราะห์ FTIR ก็สามารถยืนยันพันธะที่เกิดขึ้นในอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้



รูปที่ 54 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของอนุภาคสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

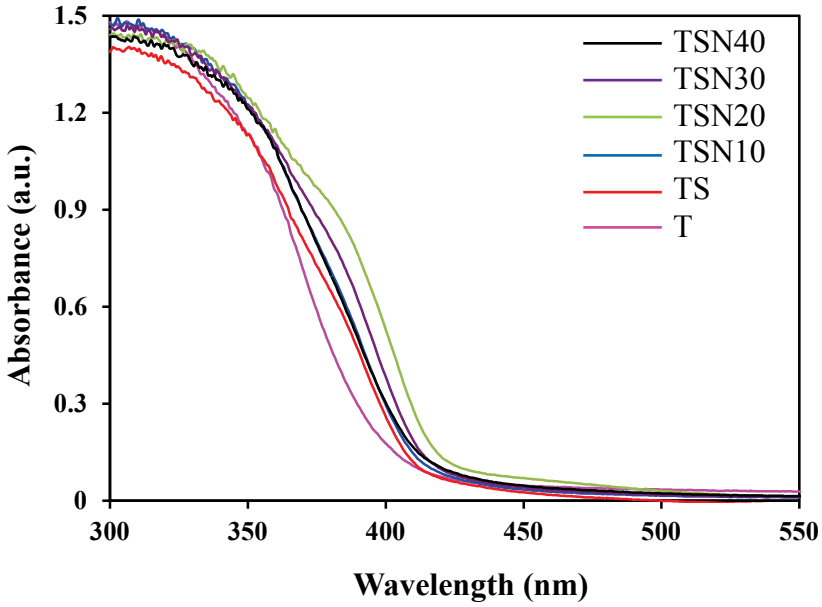
ตารางที่ 12 ความถี่และชนิดของการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิค FTIR ของอนุภาคไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของสาร	Wave no. (cm^{-1})	Vibrational mode	ข้อมูลอ้างอิง
T	493.96–646.33	TiO_2 stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1627.1	O–H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3369.05	O–H stretching	Senthilnathan et a.,l (2010)
TS	657.74	TiO_2 stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1631.57	O–H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3367.66	O–H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TSN20	650.46	TiO_2 stretching	Senthilnathan et al., (2010)
	1403.19	N–H bending	Jiaqing et al., (2002)
	1630.56	O–H bending	Senthilnathan et al., (2010)
	3395.93	O–H stretching	Senthilnathan et al., (2010)
TSP40	712.19	TiO_2 stretching	Senthilnathan et al (2010)
	1406.22	N–H bending	Jiaqing et al., (2002)
	1626.39	O–H bending	Senthilnathan et al., (2010)

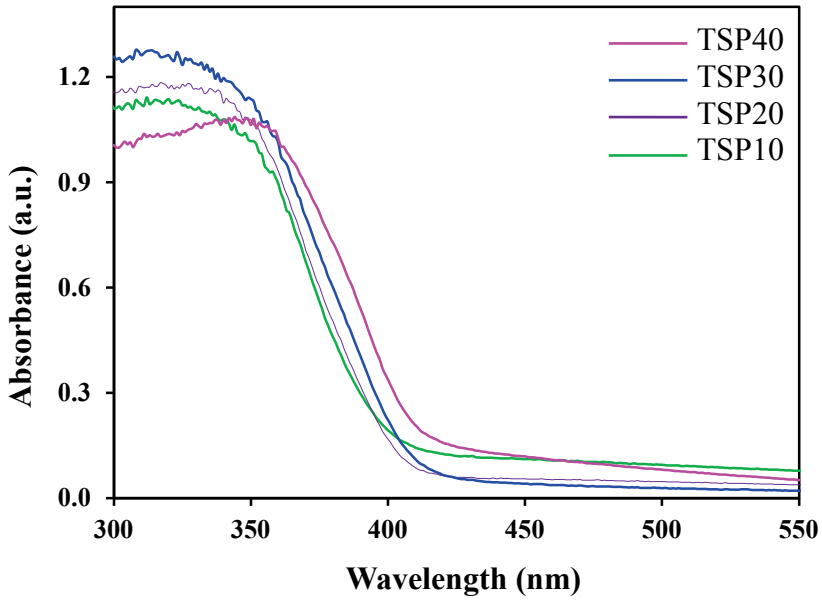
3.5 ผลการวิเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค UV–Vis DRS

UV–Vis DRS ถูกใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ โดยสามารถคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานจากค่า Photon energy $(\alpha h\nu)^2$ ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ ได้แก่ T, TS, TSN และ TSP ซึ่งแปรผันปริมาณ ไนโตรเจน และ PVP 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส รูปที่ 55 แสดงการดูดกลืนสเปกตรัมของอนุภาค T, TS และ TSN และรูปที่ 56 สำหรับอนุภาค TSP ส่วนรูปที่ 57 แสดงค่า Photon energy $(\alpha h\nu)^2$ กับค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาค T, TS และTSN และรูปที่ 58 สำหรับอนุภาค TSP เพื่อนำไปคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน โดยลากเส้นความชันสัมผัสกับการดูดกลืนสเปกตรัมของเส้นกราฟและค่า Photon energy เพื่อหาความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ ซึ่งแถบช่องว่างพลังงานที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 13 และรูปที่ 59 เป็นการเปรียบเทียบแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคสูตรต่างๆ

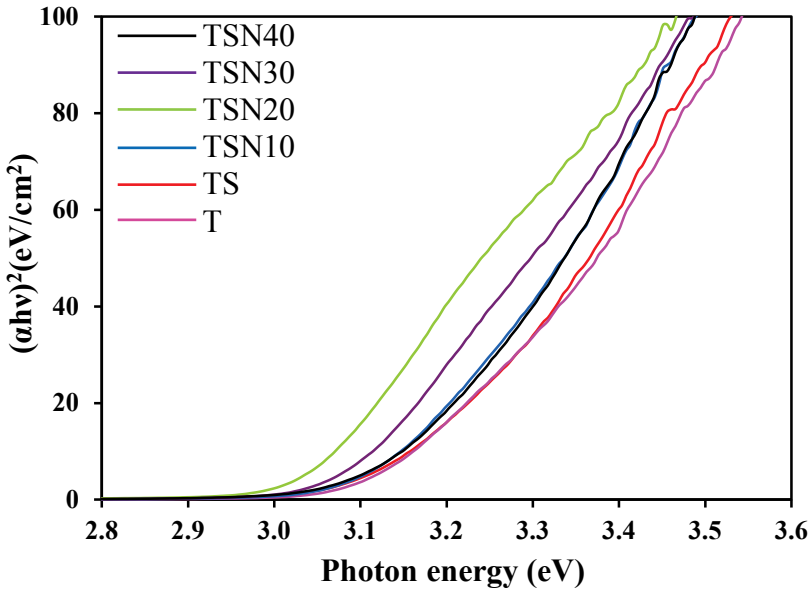
จากการวิเคราะห์อนุภาคด้วยเทคนิค UV–Vis DRS พบว่า อนุภาค T และ TS มีผลจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 413 และ 419 นาโนเมตร ตามลำดับ แถบช่องว่างพลังงานมีค่า 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับอนุภาคที่มีการเจือร่วมกันระหว่างดีบุกและไนโตรเจน 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่า จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 421–441 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 3.03–3.18 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งผลการเจือไนโตรเจนและดีบุกจะช่วยในการเลื่อนไปทางแสงที่มองได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจเนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนเข้าไปแทรกหรือแทนที่อะตอมของออกซิเจน เห็นได้จากการเลื่อนและการเพิ่มขึ้นของช่วงการดูดกลืนแสงไปยังความยาวคลื่นที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีขึ้น ส่วนการเจือด้วย PVP ร่วมกับดีบุก พบว่า จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 405–419 นาโนเมตร แถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 3.12–3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะมีการเลื่อนไปทางแสงที่มองได้ด้วยตาเปล่า เมื่อพิจารณารูปที่ 59 พบว่า การเจือไนโตรเจนที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โมล มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนก็ทำให้แถบช่องว่างพลังงานมากขึ้นด้วย ส่วนการเจือด้วยดีบุกและ PVP พบว่า การเพิ่มปริมาณของ PVP ทำให้แถบช่องว่างพลังงานลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณและรูปแบบของไนโตรเจนที่เข้าไปอยู่ในระบบซึ่งจะส่งผลต่อค่าแถบช่องว่างพลังงานได้ (ผล XPS ในรูปที่ 62–63 และตารางที่ 14)



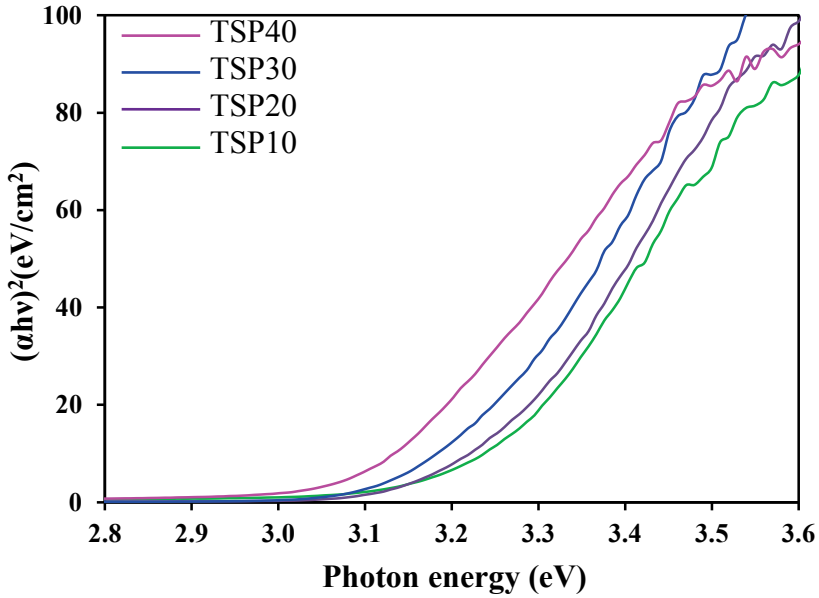
รูปที่ 55 การดูดกลืนสเปกตรัมของอนุภาคสูตร TSN เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 56 การดูดกลืนสเปกตรัมของอนุภาคสูตร TSP เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



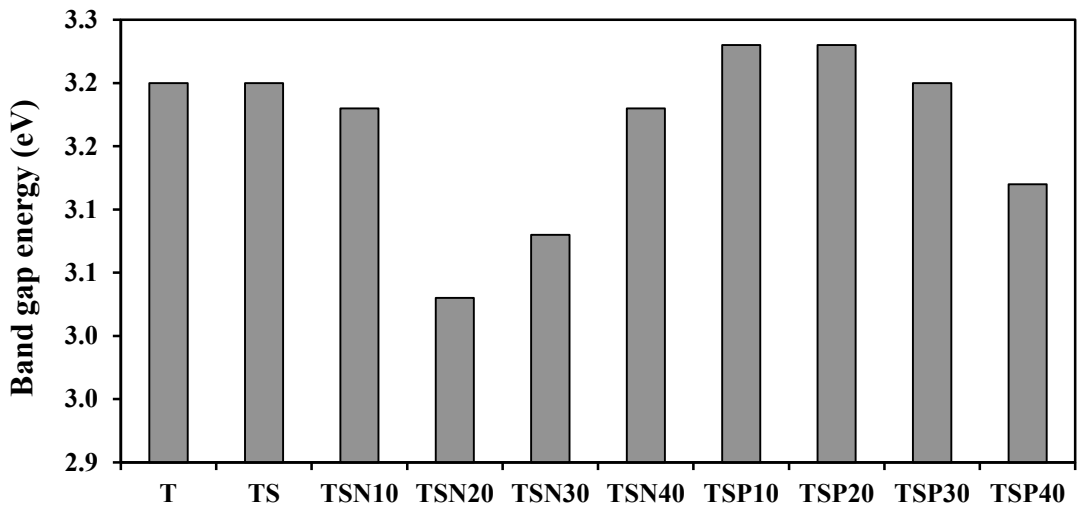
รูปที่ 57 ค่า Photon energy (αhν)2 ของอนุภาคสูตร TSN เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 58 ค่า Photon energy (αhν)2 ของอนุภาคสูตร TSP เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 13 แถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของอนุภาค	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
T	3.20
TS	3.20
TSN10	3.18
TSN20	3.03
TSN30	3.08
TSN40	3.18
TSP10	3.23
TSP20	3.23
TSP30	3.20
TSP40	3.12



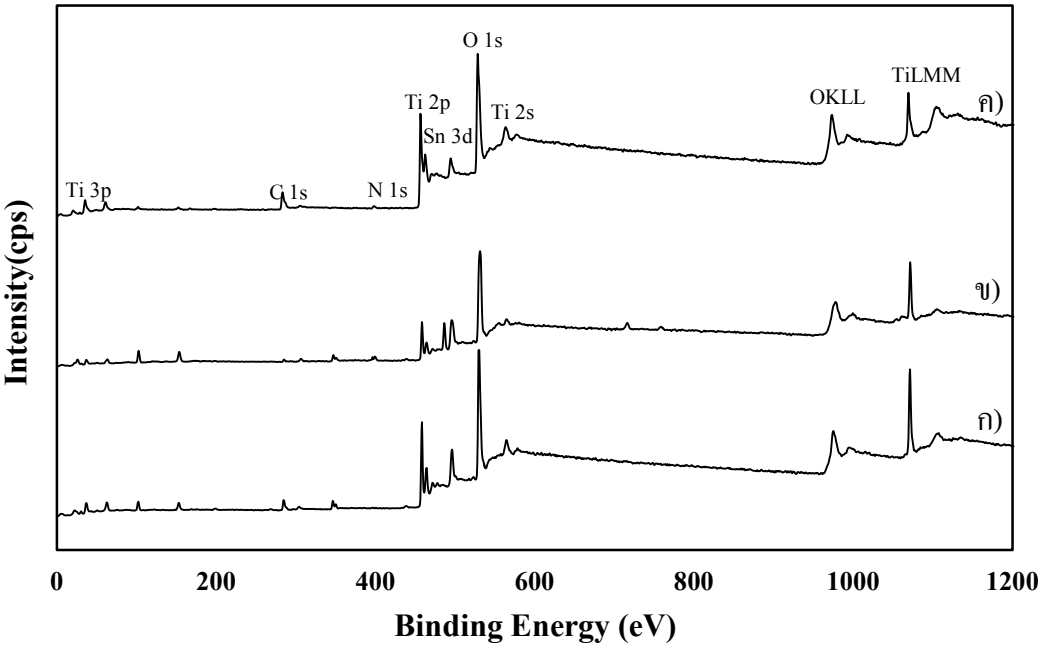
รูปที่ 59 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ600 องศาเซลเซียส

3.6 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค XPS

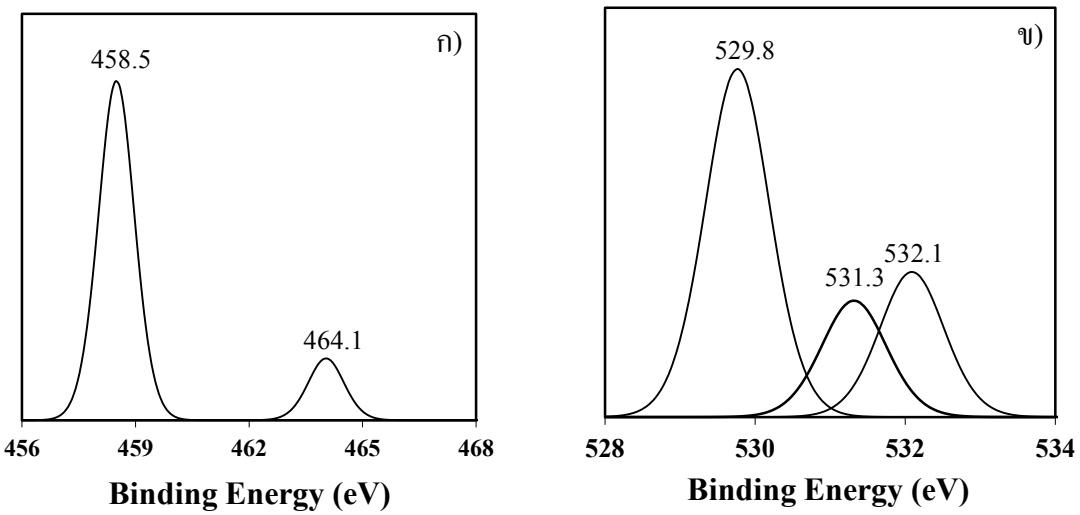
ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร T, TSN20 และ TSP40 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งจะปรากฏสเปกตรัมของธาตุ Ti, O, Sn, N และ C (รูปที่ 60) โดยฟิล์ม T จะปรากฏสเปกตรัมของธาตุ Ti และ O โดยปรากฏสเปกตรัม Ti 2p ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 458.5 และ 464.1 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 61ก) แสดงว่า Ti อยู่ในสถานะ Ti^{4+} ซึ่งฟอร์มตัวอยู่ในรูปของ TiO_2 (Zhang et al., 2010) พีค O 1s ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 529.8, 531.3 และ 532.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 529.8 อิเล็กตรอนโวลต์ จะเป็น O ในโมเลกุลของ TiO_2 (Lin et al., 2011) (รูปที่ 61ข) ส่วนฟิล์ม TSN20 ปรากฏสเปกตรัมของธาตุ Ti, O, Sn และ N โดยปรากฏพีค Ti 2p ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 458.3 และ 464.5 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 62ก) พีค O 1s ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 529.5, 531.3 และ 532.6 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 62ข) และพีค Sn 3d ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 485.3 และ 464.5 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 62ค) ซึ่งเกิดการฟอร์มตัวอยู่ในรูปของ Ti–O–Sn (Duan et al., 2012) และปรากฏพีค N 1s ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 397.0 และ 399.6 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 62ง) N 1s ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 397.0 อิเล็กตรอนโวลต์ โดย Ti จะอยู่ในสถานะ Ti^{3+} ซึ่งไนโตรเจนจะไปแทนที่อะตอมของออกซิเจนอยู่ในรูปของ TiN (Cheng et al., 2009) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกดียิ่งขึ้น และไนโตรเจนจะช่วยลดค่าแถบช่องว่างพลังงานให้แคบลง ทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบการนำได้ง่ายขึ้น และ N 1s ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 399.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ไนโตรเจนไปแทนที่อะตอมของออกซิเจนอยู่ในรูปของ O–Ti–N (Lin et al., 2011) ส่วนในรูปที่ 63 จะแสดง XPS สเปกตรัมของฟิล์ม TSP40 ซึ่งจะปรากฏสเปกตรัมของธาตุ Ti, O, Sn และ N โดยปรากฏพีคของ Ti 2p ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 458.5 และ 464.3 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 63ก) และพีค O 1s จะปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 529.8, 530.9 และ 532.1 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 63ข) ส่วนพีค Sn 3d ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 486.1 และ 464.6 อิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 63ค) ซึ่งเกิดการฟอร์มตัวของ Sn อยู่ในรูปของ Ti–O–Sn (Duan et al., 2012) และปรากฏพีค N 1s ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 400.1 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยไนโตรเจนจะฟอร์มตัวแบบแทรกอยู่ในรูปของ Ti–O–N (Zeng et al., 2014) ดังแสดงในรูปที่ 63ง เมื่อพิจารณาสถานะของไนโตรเจนในตัวอย่าง พบว่า การเจือไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคาร์บอเนตไนโตรเจนจะอยู่ในสถานะแทนที่ออกซิเจน แต่การเจือด้วย PVP อะตอมของไนโตรเจนจะเป็นแบบแทรก ซึ่งจากผลการศึกษาของ Dawson และคณะ 2014 พบว่า การเจือไนโตรเจนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตแคตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าแถบช่องว่าง

พลังงานเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยที่มีผลต่ออื่นๆ อีก เช่น ปริมาณและชนิดของสถานะของไนโตรเจนในตัวอย่างด้วย โดยอะตอมแบบแทรกของไนโตรเจนจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าอะตอมแบบแทนที่เมื่อทดสอบภายใต้แสงยูวี (Dawson et al., 2014)

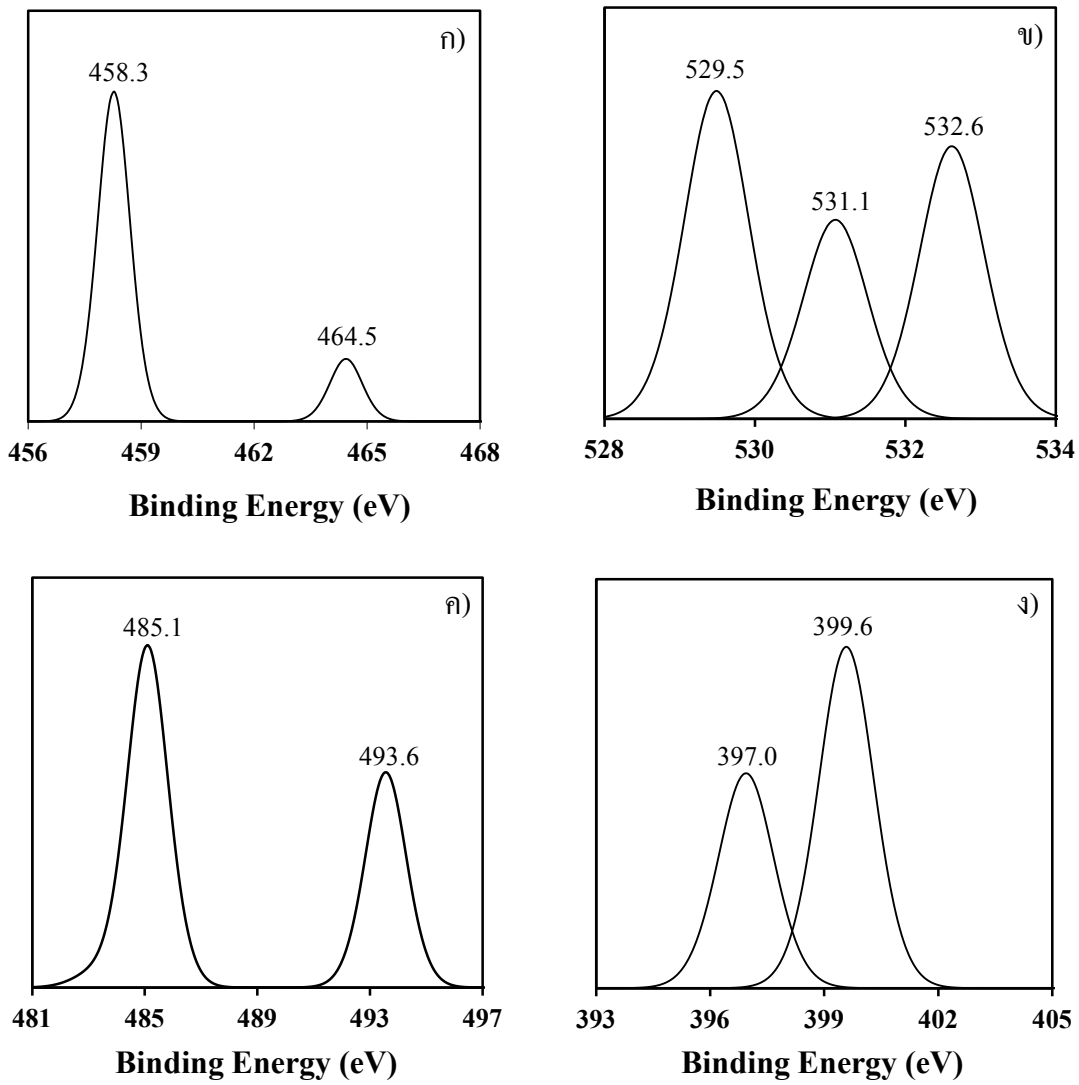
สำหรับปริมาณธาตุต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค XPS แสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่า ปริมาณธาตุของฟิล์ม T เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยธาตุ Ti, O และ C เท่ากับ 11.03, 57.11 และ 31.86 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ ปริมาณธาตุของฟิล์ม TSN20 ประกอบด้วยธาตุ Ti, O, Sn, N และ C เท่ากับ 7.25, 64.44, 2.39, 1.35 และ 24.57 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ ส่วนฟิล์ม TSP40 ประกอบด้วยธาตุ Ti, O, Sn, N และ C เท่ากับ 16.28, 63.74, 0.65, 0.55 และ 18.83 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ ซึ่งเจอธาตุคาร์บอนหลงเหลืออยู่ในระบบเนื่องจากการสลายตัวไม่หมดของโมเลกุลสารอินทรีย์จากสารตั้งต้น (Sikong et al., 2012)



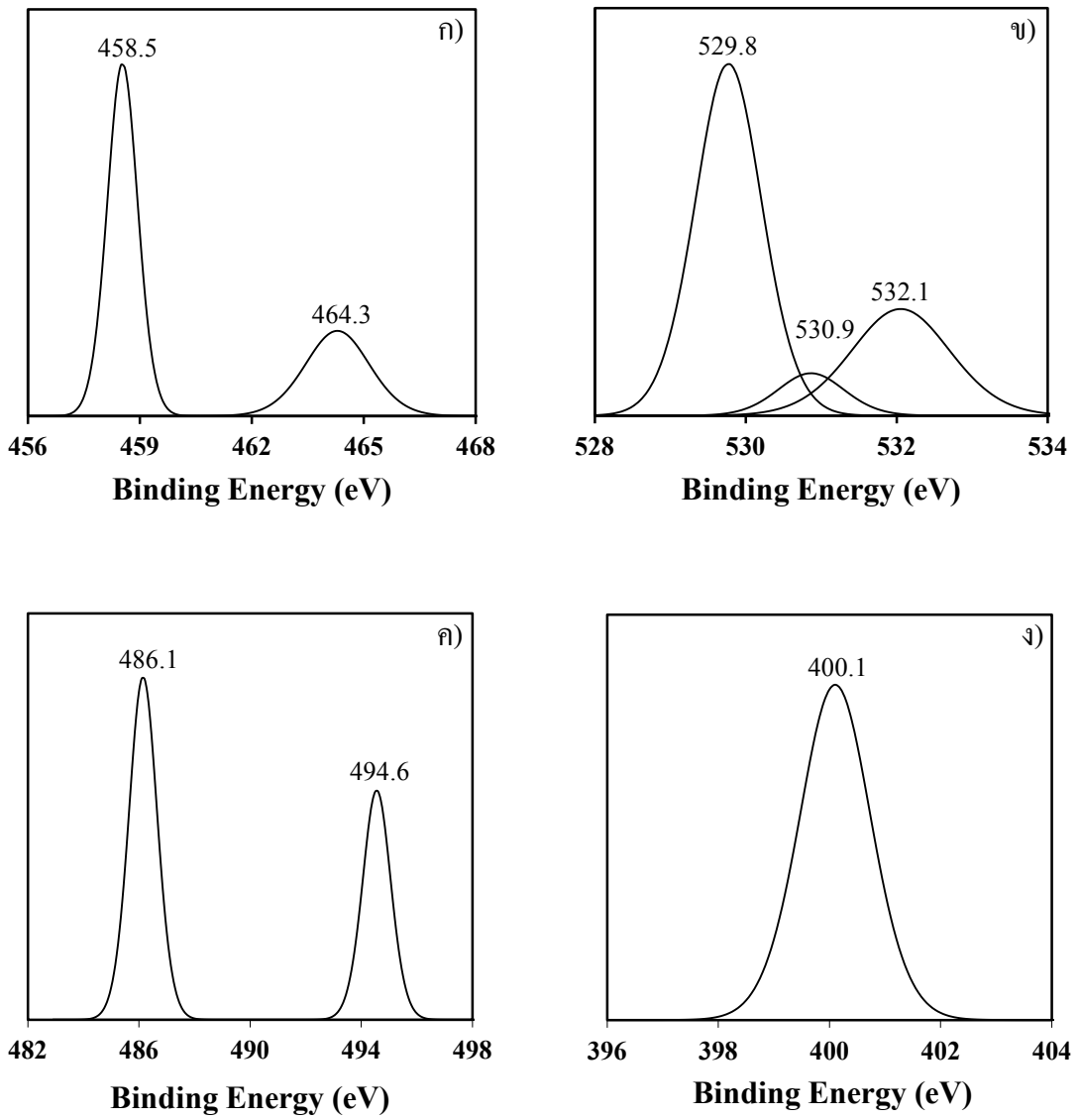
รูปที่ 60 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม (ก) T (ข) TSN20 และ (ค) TSP40 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 61 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม T เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) Ti 2p และ (ข) O 1s



รูปที่ 62 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม TSN20 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) Ti 2p (ข) O 1s (ค) Sn 3d และ (ง) N 1s



รูปที่ 63 XPS สเปกตรัมของฟิล์ม TSP40 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) Ti 2p (ข) O 1s (ค) Sn 3d และ (ง) N 1s

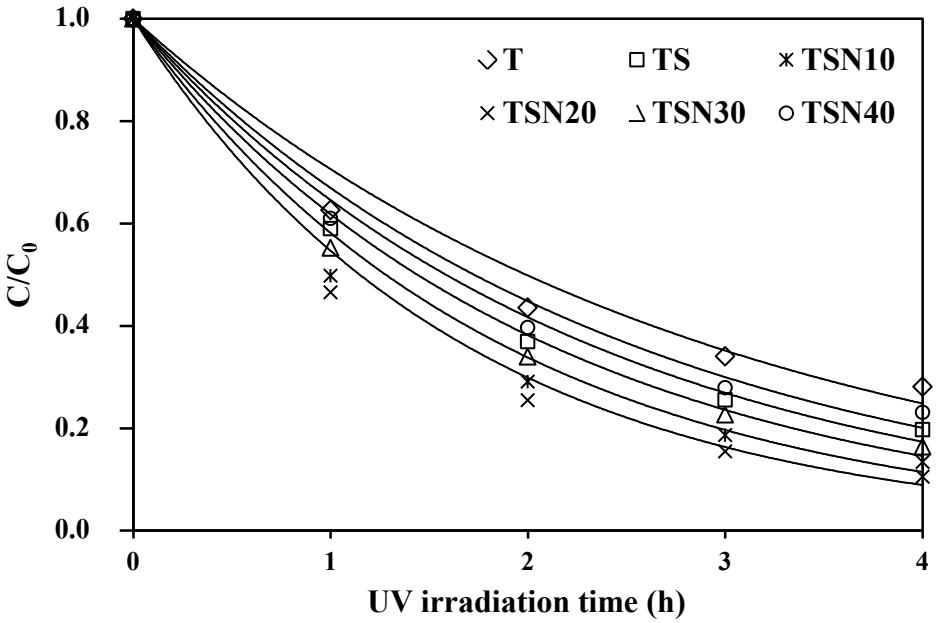
ตารางที่ 14 เปอร์เซ็นต์อะตอมที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง XPS ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

สถานะ	**ปริมาณธาตุ (at%)**		
	T	TSN20	TSP40
Ti 2p	11.03	7.25	16.28
O 1s	57.11	64.44	63.74
Sn 3d	–	2.39	0.65
N 1s	–	1.35	0.50
C 1s	31.86	24.57	18.83

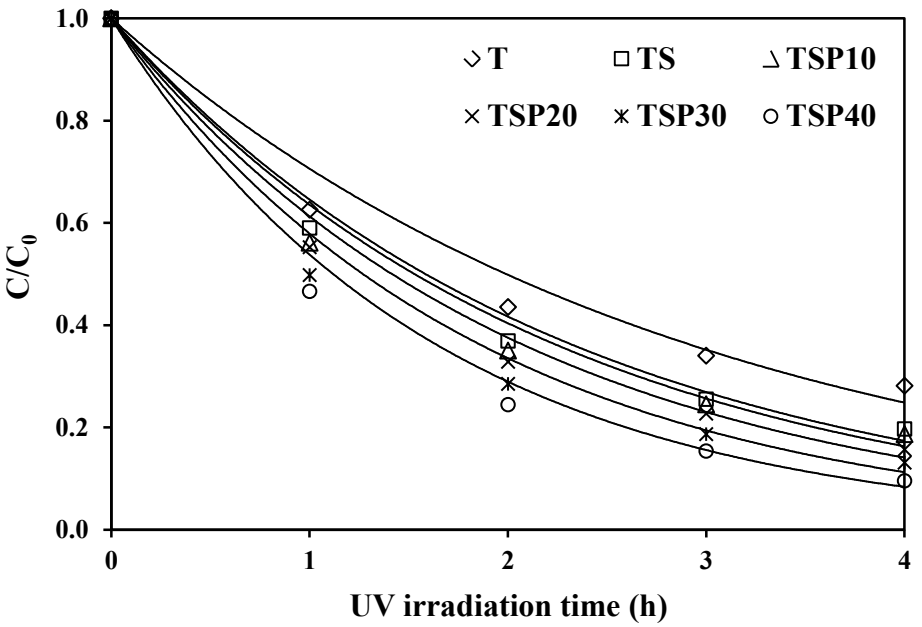
3.7 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์ม T, TS, TSN และ TSP ซึ่งแปรผันปริมาณไนโตรเจนและ PVP 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล โดยเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลแสดงดังรูปที่ 64 และ 65 ส่วนในตารางที่ 14 จะแสดงสมการความสัมพันธ์ของผลการย่อยสลายเมทิลีนบลู ส่วนรูปที่ 64 และ 65 เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ($C/C_0 = e^{-kt}$, เมื่อ k คือ ค่าคงที่การลดลง และ t คือ เวลาในการทดสอบ) และแสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารเมทิลีนบลู ณ เวลาทดสอบที่ 4 ชั่วโมง ของแต่ละสูตร เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 64 พบว่า ฟิล์มสูตร TSN20 สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 89.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากฟิล์ม TSN ที่มีการเจือไนโตรเจนที่ 20 เปอร์เซ็นต์โมล จะเกิดเฟสอะนาเทสที่มีขนาดผลึกเล็กที่สุดเมื่อเทียบสูตรอื่นๆ (TSN) โดยคำนวณขนาดผลึกได้ 9.8 นาโนเมตร (ตารางที่ 9) เมื่อฟิล์มมีขนาดอนุภาคผลึกที่เล็กก็จะส่งผลให้ฟิล์มมีพื้นที่ผิวมากขึ้นซึ่งส่งผลดีต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ และการเจือไนโตรเจนของฟิล์ม TSN ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบกว่าสูตรอื่นๆ ที่มีการเจือไนโตรเจน (TSN) (ตารางที่ 13) ซึ่งการมีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบทำให้การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบการนำได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 65 พบว่าการเจือ PVP ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลทำให้การย่อยสลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งฟิล์ม TSP40 สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 90.4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก

ฟิล์ม TSP40 มีเฟสอะนาเทสที่มีขนาดผลึกเล็ก (8.6 นาโนเมตร จากตารางที่ 9) และมีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบกว่าสูตรอื่นๆ ที่มีการเจือ PVP (TSP) (ตารางที่ 13) จากตารางที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์ม TSN และ TSP พบว่า ค่าคงที่การลดลง (k) ของฟิล์ม TSP40 จะมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าคงที่การลดลงเท่ากับ 0.620 รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20 เท่ากับ 0.604 ในรูปที่ 66 เป็นกราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่เวลาทดสอบ 4 ชั่วโมง ของฟิล์มสูตรต่างๆ ซึ่งการเจือด้วยไนโตรเจนและ PVP มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยฟิล์ม TSN มีจุดเหมาะสมที่ 20 เปอร์เซ็นต์โมล ส่วนการเจือด้วย PVP เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูสูงขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการเจือไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคาร์บอเนตกับ PVP พบว่า การเจือไนโตรเจนจาก PVP มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูดีกว่าเมื่อทดสอบภายใต้แสงยูวี เนื่องจากการเจือด้วย PVP จะมีขนาดผลึกของไทเนียมไดออกไซด์ที่เล็กกว่าการเจือไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคาร์บอเนต และสถานะไนโตรเจนจากการเจือด้วย PVP เป็นแบบแทรก จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเจือไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคาร์บอเนตที่สถานะไนโตรเจนเป็นแบบแทนที่ (Dawson et al., 2014)



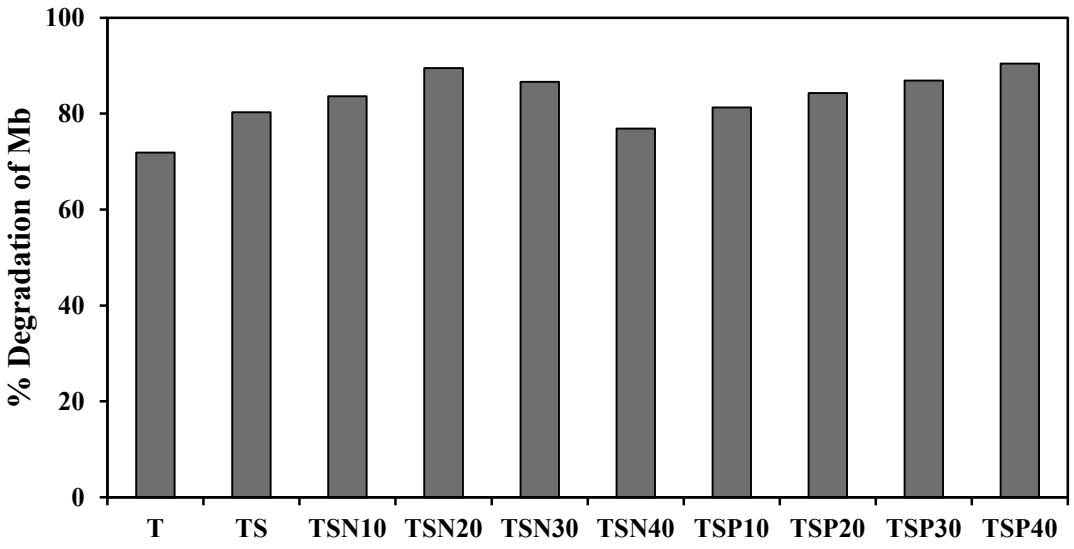
รูปที่ 64 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 65 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 15 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ

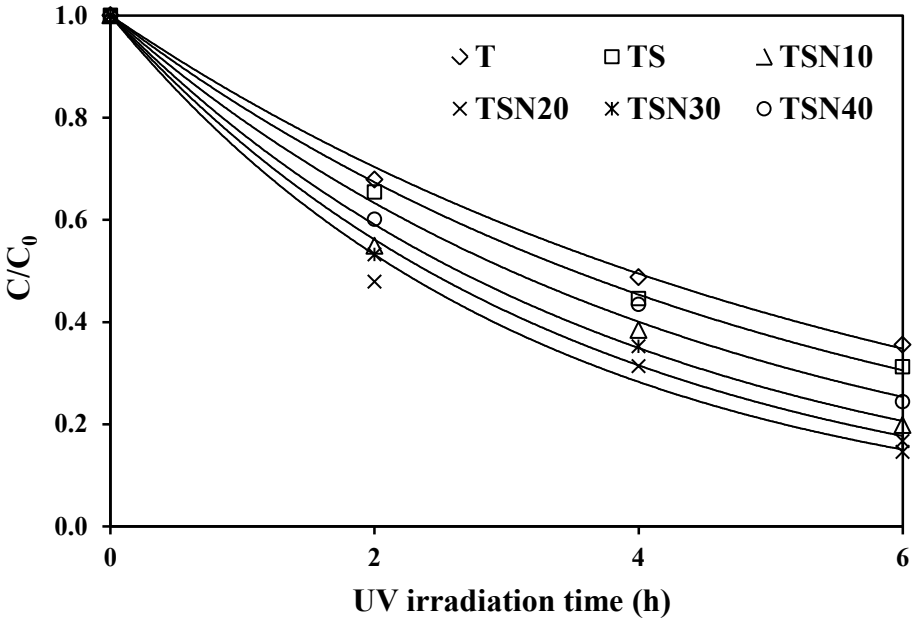
ชนิดของฟิล์ม	สมการการย่อยสลาย	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การย่อยสลาย (4 h)
T	$C/C_0=e^{-0.348t}$	0.348	0.952	71.9
TS	$C/C_0=e^{-0.438t}$	0.438	0.976	80.3
TSN10	$C/C_0=e^{-0.481t}$	0.481	0.979	83.6
TSN20	$C/C_0=e^{-0.604t}$	0.604	0.974	89.5
TSN30	$C/C_0=e^{-0.542t}$	0.542	0.971	86.6
TSN40	$C/C_0=e^{-0.401t}$	0.401	0.966	76.9
TSP10	$C/C_0=e^{-0.453t}$	0.453	0.968	81.3
TSP20	$C/C_0=e^{-0.484t}$	0.484	0.975	84.3
TSP30	$C/C_0=e^{-0.543t}$	0.543	0.969	86.9
TSP40	$C/C_0=e^{-0.620t}$	0.620	0.980	90.4



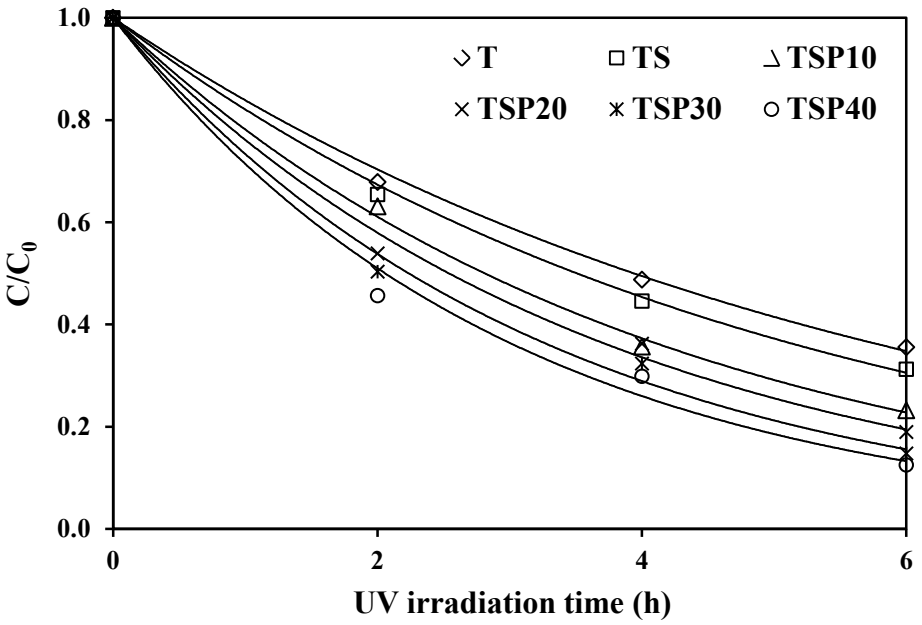
รูปที่ 66 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 4 ชั่วโมง

3.8 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฮิวมิคโดยใช้ฟิล์ม T, TS, TSN และ TSP ซึ่งแปรผันปริมาณไนโตรเจนและ PVP 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 67 และ 68 ส่วนในตารางที่ 16 จะแสดงสมการความสัมพันธ์ของผลการย่อยสลายกรดฮิวมิค ในรูปที่ 67 และ 68 เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ($C/C_0 = e^{-kt}$, เมื่อ k คือ ค่าคงที่การลดลง และ t คือ เวลาในการทดสอบ) และแสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายกรดฮิวมิค ณ เวลาทดสอบที่ 6 ชั่วโมง ของแต่ละสูตร เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 67 พบว่า ฟิล์มสูตร TSN20 สามารถย่อยสลายกรดฮิวมิคได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายกรดฮิวมิคได้ประมาณ 85.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 68 พบว่า การเจือ PVP เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การย่อยสลายกรดฮิวมิคเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งฟิล์ม TSP40 สามารถย่อยสลายกรดฮิวมิคได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายกรดฮิวมิคได้ประมาณ 87.5 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์ม TSN และ TSP พบว่า ค่าคงที่การลดลง (k) ของฟิล์ม TSP40 จะมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าคงที่การลดลงเท่ากับ 0.337 รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20 เท่ากับ 0.316 จากผลการทดสอบการย่อยสลายกรดฮิวมิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการย่อยสลายเมทิลีนบลู โดยมีแนวโน้มของผลการย่อยสลายไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 67 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฮิวมิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 68 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฮิวมิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

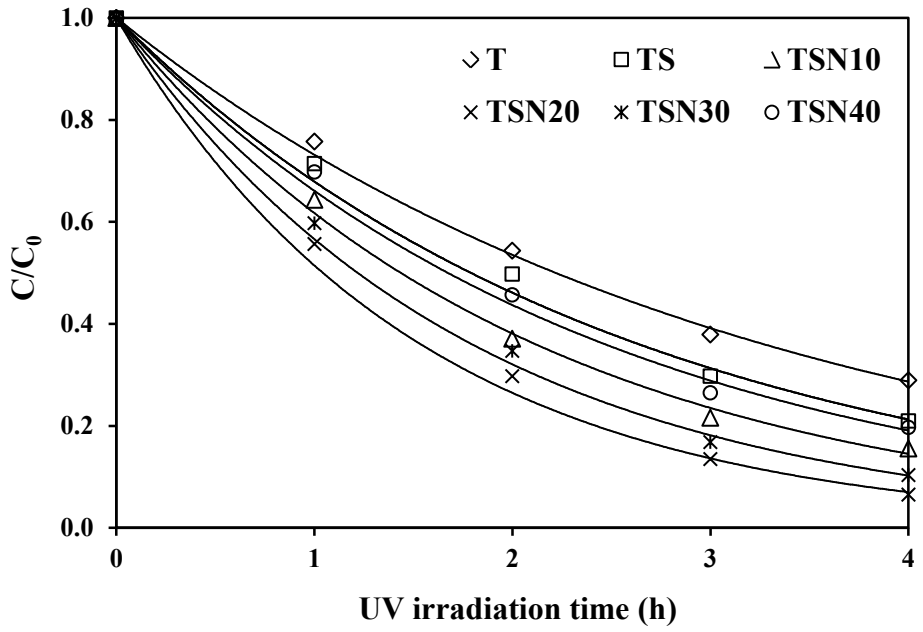
ตารางที่ 16 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายกรดฮิวมิคด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ

ชนิดของฟิล์ม	สมการการย่อยสลาย	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การย่อยสลาย (6 h)
T	$C/C_0=e^{-0.176t}$	0.176	0.997	64.4
TS	$C/C_0=e^{-0.198t}$	0.198	0.998	68.8
TSN10	$C/C_0=e^{-0.263t}$	0.263	0.988	80.2
TSN20	$C/C_0=e^{-0.316t}$	0.316	0.988	85.4
TSN30	$C/C_0=e^{-0.289t}$	0.289	0.989	83.3
TSN40	$C/C_0=e^{-0.229t}$	0.229	0.990	75.6
TSP10	$C/C_0=e^{-0.247t}$	0.247	0.997	76.8
TSP20	$C/C_0=e^{-0.273t}$	0.273	0.992	81.1
TSP30	$C/C_0=e^{-0.310t}$	0.310	0.990	85.2
TSP40	$C/C_0=e^{-0.337t}$	0.337	0.985	87.5

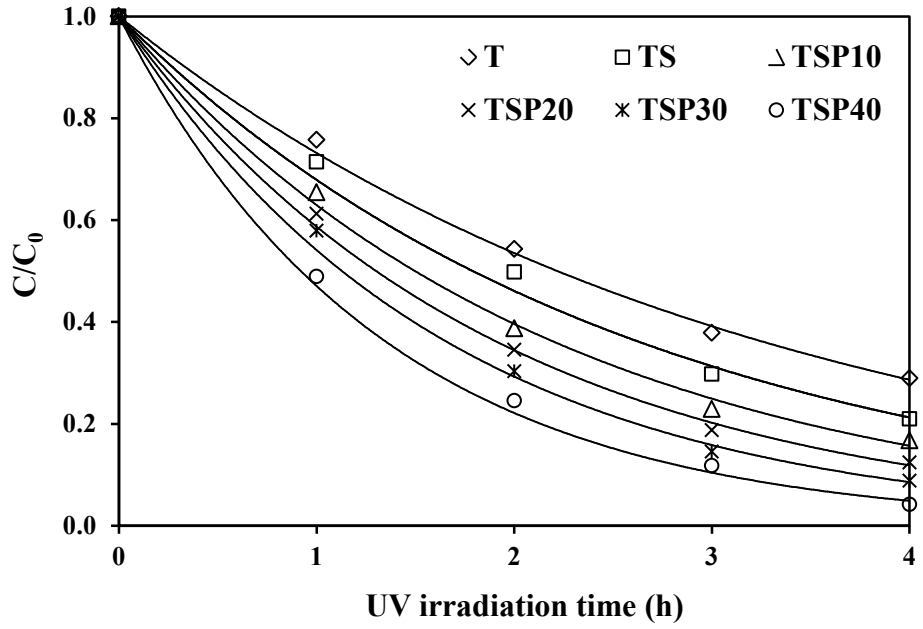
3.9 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฟัลวิคของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายกรดฟัลวิคโดยใช้ฟิล์ม T, TS, TSN และ TSP ซึ่งแปรผันปริมาณไนโตรเจนและ PVP 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 69 และ 70ส่วนในตารางที่ 17 จะแสดงสมการความสัมพันธ์ของผลการย่อยสลายกรดฟัลวิค ในรูปที่ 69 และ 70 เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ($C/C_0= e^{-kt}$, เมื่อ k คือ ค่าคงที่การลดลง และ t คือ เวลาในการทดสอบ) และแสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายกรดฟัลวิค ณ เวลาทดสอบที่ 4 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 69 พบว่า ฟิล์มสูตร TSN20 สามารถย่อยสลายกรดฟัลวิคได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 93.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 70 พบว่า การเจือ PVP เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การย่อยสลายกรดฟัลวิคเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งฟิล์ม TSP40 สามารถย่อยสลายกรดฟัลวิคได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 95.8 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์ม TSN และ TSP พบว่า ค่าคงที่การลดลง (k) ของฟิล์ม TSP40 จะมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าคงที่การลดลงเท่ากับ 0.754 รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20 เท่ากับ 0.665 จากผลการทดสอบการย่อยสลายกรดฟัลวิค

ของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการย่อยสลายเมทิลีนบลู โดยมีแนวโน้มของผลการย่อยสลายไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 69 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฟัลวิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 70 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของกรดฟัลวิคโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

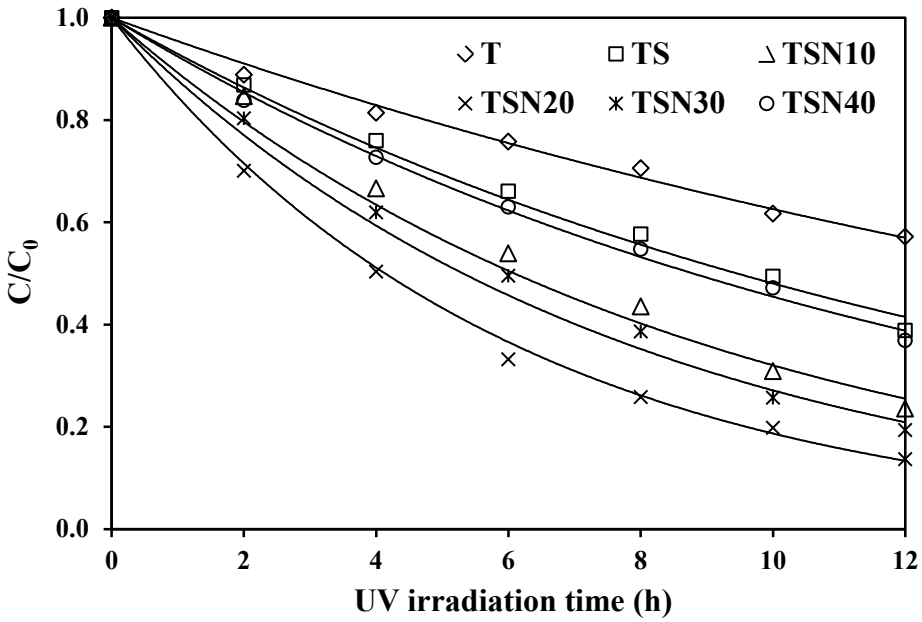
ตารางที่ 17 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายกรดฟัลวิคด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ

ชนิดของฟิล์ม	สมการการย่อยสลาย	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การย่อยสลาย (4 h)
T	$C/C_0=e^{-0.312t}$	0.312	0.997	71.1
TS	$C/C_0=e^{-0.387t}$	0.387	0.993	79.0
TSN10	$C/C_0=e^{-0.483t}$	0.483	0.994	84.5
TSN20	$C/C_0=e^{-0.665t}$	0.665	0.996	93.5
TSN30	$C/C_0=e^{-0.569t}$	0.569	0.996	89.7
TSN40	$C/C_0=e^{-0.414t}$	0.229	0.993	80.3
TSP10	$C/C_0=e^{-0.463t}$	0.463	0.993	83.2
TSP20	$C/C_0=e^{-0.533t}$	0.533	0.997	87.6
TSP30	$C/C_0=e^{-0.614t}$	0.614	0.997	91.2
TSP40	$C/C_0=e^{-0.754t}$	0.754	0.992	95.8

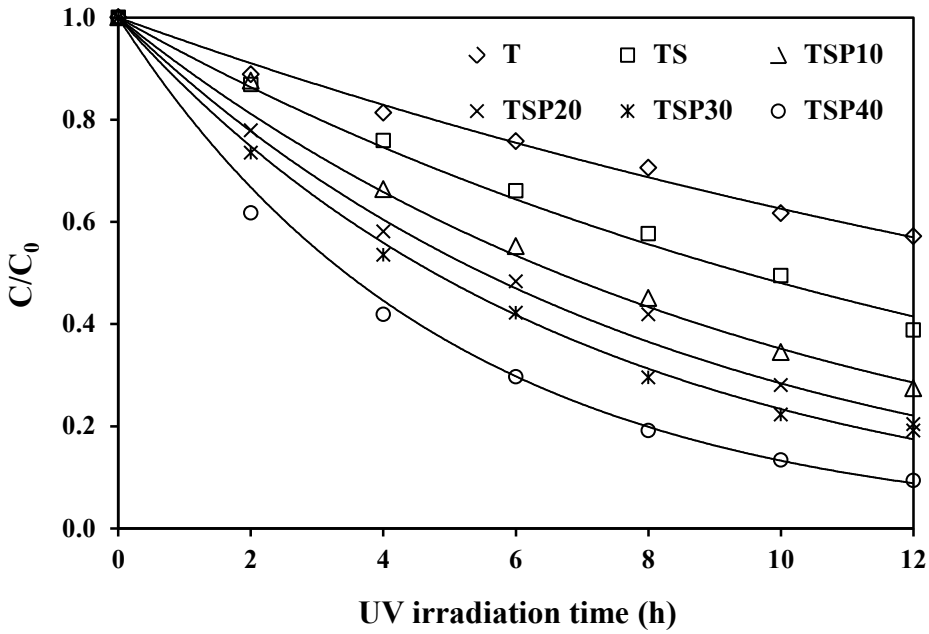
3.10 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล โดยใช้ฟิล์ม T, TS, TSN และ TSP ซึ่งแปรผันปริมาณไนโตรเจนและ PVP 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทดสอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 71 และ 72 ส่วนในตารางที่ 18 จะแสดงสมการความสัมพันธ์ของผลการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ในรูปที่ 71 และ 72 เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ($C/C_0= e^{-kt}$, เมื่อ k คือ ค่าคงที่การลดลง และ t คือ เวลาในการทดสอบ) และแสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ณ เวลาทดสอบที่ 12 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 71 พบว่า ฟิล์มสูตร TSN20 สามารถย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 86.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 72 พบว่า การเจือ PVP เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งฟิล์ม TSP40 สามารถย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 90.6 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 18 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์ม TSN และ TSP พบว่า ค่าคงที่การลดลง (k) ของฟิล์ม TSP40 จะมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าคงที่การลดลงเท่ากับ 0.202 รองลงมา คือ ฟิล์ม

TSN20 เท่ากับ 0.126 จากผลการทดสอบการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการย่อยสลายเมทิลีนบลู โดยมีแนวโน้มของผลการย่อยสลายไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 71 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/Co ของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSN ทดสอบภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 72 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 12 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

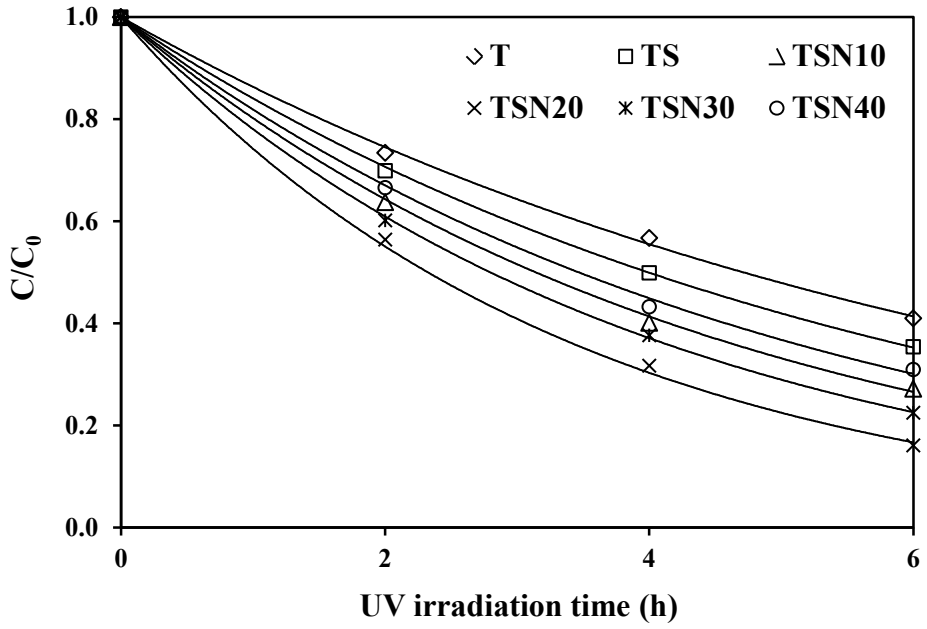
ตารางที่ 18 ตารางเปรียบเทียบการย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอลด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ

ชนิดของฟิล์ม	สมการการย่อยสลาย	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การย่อยสลาย (12 h)
T	$C/C_0=e^{-0.047t}$	0.047	0.992	42.8
TS	$C/C_0=e^{-0.073t}$	0.073	0.998	61.2
TSN10	$C/C_0=e^{-0.114t}$	0.114	0.985	76.5
TSN20	$C/C_0=e^{-0.168t}$	0.168	0.995	86.3
TSN30	$C/C_0=e^{-0.130t}$	0.130	0.987	80.6
TSN40	$C/C_0=e^{-0.079t}$	0.079	0.993	63.1
TSP10	$C/C_0=e^{-0.104t}$	0.104	0.992	72.7
TSP20	$C/C_0=e^{-0.126t}$	0.126	0.985	79.6
TSP30	$C/C_0=e^{-0.614t}$	0.145	0.993	80.9
TSP40	$C/C_0=e^{-0.754t}$	0.202	0.997	90.6

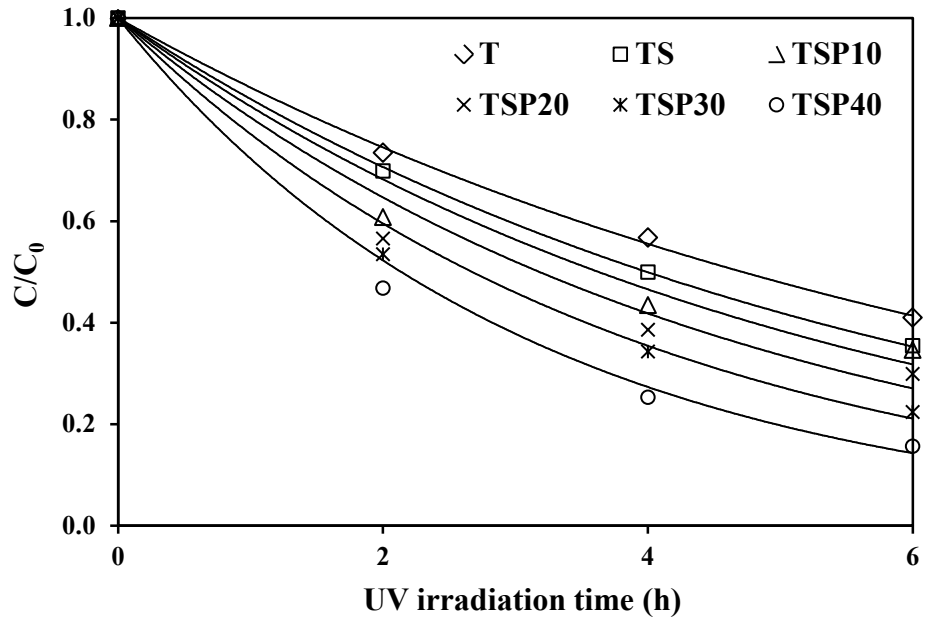
3.11 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายไกลโฟเสตของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายไกลโฟเสต โดยใช้ฟิล์ม T, TS, TSN และ TSP ซึ่งแปรผันปริมาณไนโตรเจนและ PVP 10–40 เปอร์เซ็นต์โมล เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 73 และ 74 ส่วนในตารางที่ 19 จะแสดงสมการความสัมพันธ์ของการย่อยสลายไกลโฟเสต ในรูปที่ 73 และ 74 เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ($C/C_0= e^{-kt}$, เมื่อ k คือ ค่าคงที่การลดลง และ t คือ เวลาในการทดสอบ) และแสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายไกลโฟเสต ณ เวลาทดสอบที่ 6 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 73 พบว่า ฟิล์มสูตร TSN20 สามารถย่อยสลายไกลโฟเสตได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 83.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 74 พบว่า การเจือ PVP เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การย่อยสลายไกลโฟเสตเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งฟิล์ม TSP40 สามารถย่อยสลายไกลโฟเสตได้ดีที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้ประมาณ 84.4 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 19 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์ม TSN และ TSP พบว่า ค่าคงที่การลดลง (k) ของฟิล์ม TSP40 จะมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าคงที่การลดลงเท่ากับ 0.324 รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20 เท่ากับ 0.298 จากผลการทดสอบการย่อยสลายไกลโฟ

เสตของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการย่อยสลายเมทิลีนบลู โดยมีแนวโน้มของผลการย่อยสลายไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 73 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไกลโฟเสตโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSNทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 74 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไกลโฟเสตโดยฟิล์มสูตร T, TS และ TSP ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสง เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 19 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายไกลโฟเสตด้วยฟิล์มสูตรต่างๆ

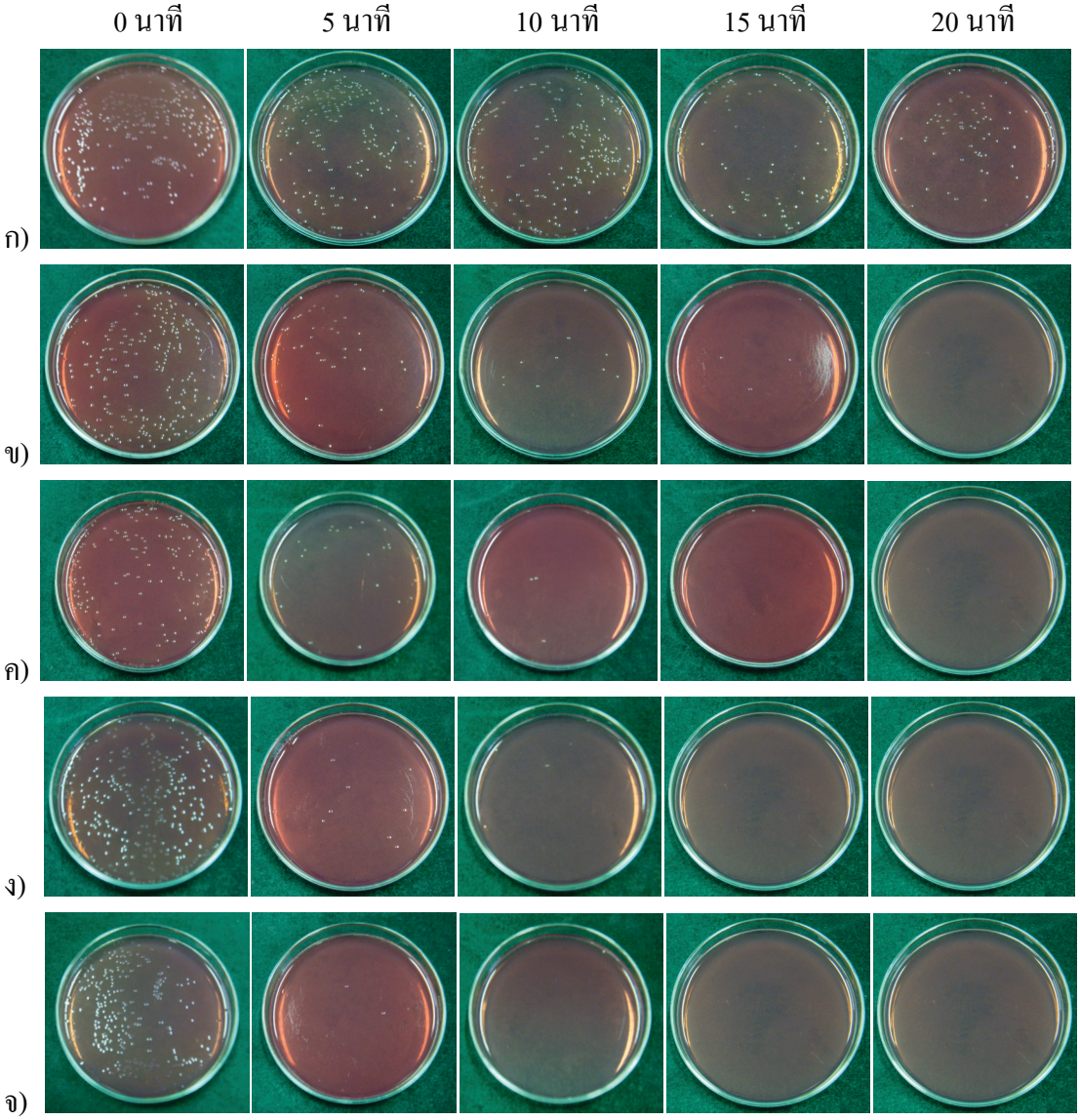
ชนิดของฟิล์ม	สมการการย่อยสลาย	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การย่อยสลาย (6 h)
T	$C/C_0=e^{-0.147t}$	0.147	0.998	59.0
TS	$C/C_0=e^{-0.174t}$	0.174	0.999	64.6
TSN10	$C/C_0=e^{-0.221t}$	0.221	0.998	72.8
TSN20	$C/C_0=e^{-0.298t}$	0.298	0.998	83.9
TSN30	$C/C_0=e^{-0.248t}$	0.248	0.999	77.5
TSN40	$C/C_0=e^{-0.200t}$	0.200	0.997	69.0
TSP10	$C/C_0=e^{-0.191t}$	0.191	0.960	65.4
TSP20	$C/C_0=e^{-0.218t}$	0.218	0.958	70.1
TSP30	$C/C_0=e^{-0.259t}$	0.259	0.987	77.7
TSP40	$C/C_0=e^{-0.324t}$	0.324	0.986	84.4

3.12 ผลการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

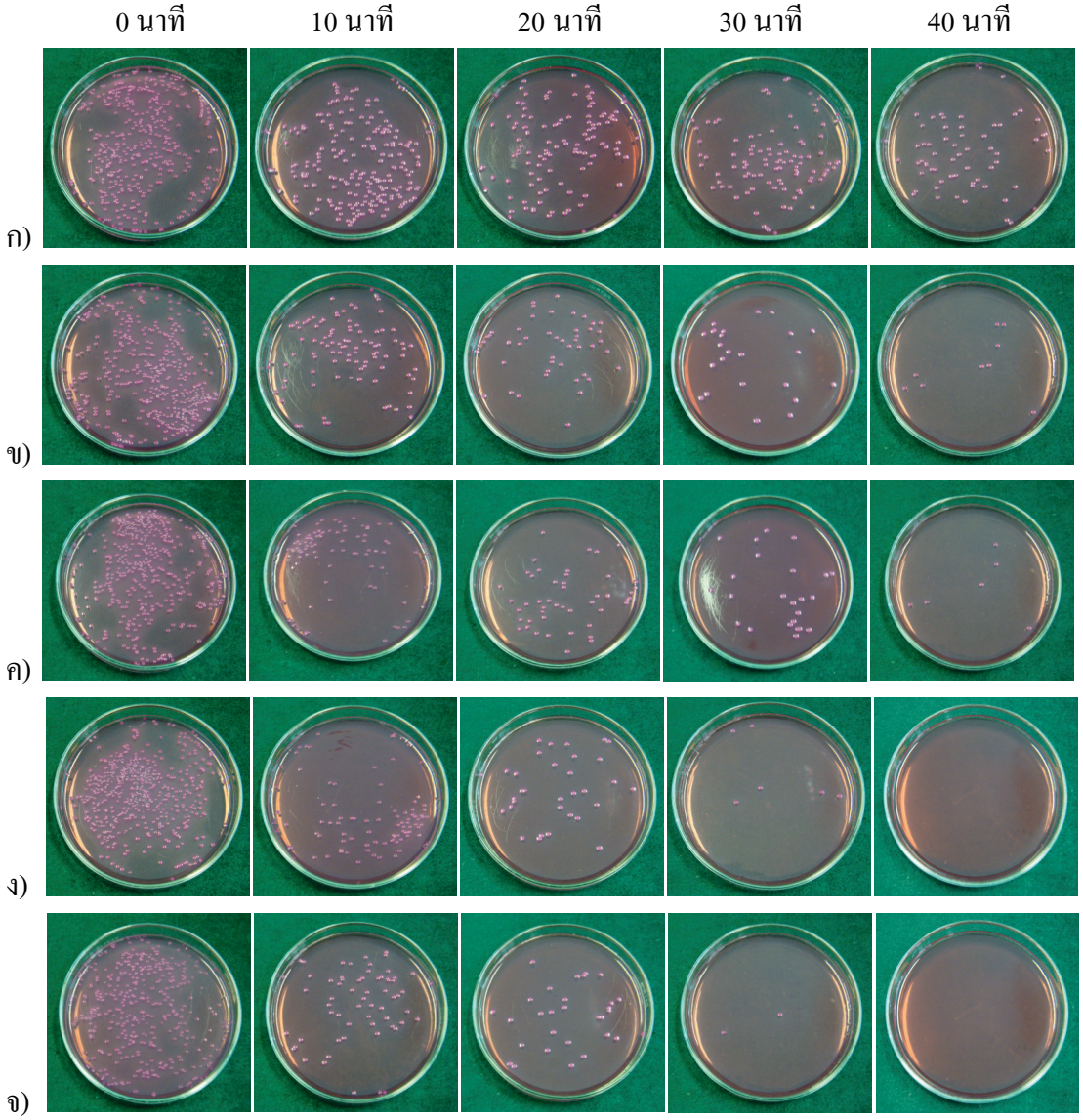
จากการผลทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สูตรต่างๆ ในการย่อยสลายสารเมทิลีนบลู กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล และไกลโฟเสต พบว่า ฟิล์มสูตรที่ดีที่สุด คือ TSP40 รองลงมา คือ TSN20 ดังนั้นจึงเลือกฟิล์มสูตรดังกล่าวมาทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย โดยเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร T, TS และ เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบเพื่อดูประสิทธิภาพในฆ่าเชื้อแบคทีเรีย คือ *S.typhi, E.coli* และ *S.aureus* ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ในการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSN40 เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ทดสอบภายใต้แสงยูวี โดยใช้เชื้อความเข้มข้นตั้งต้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร แล้วนำเชื้อที่ผ่านการทดสอบหยดบนอาหารแข็ง Macconkey (*S.typhi*, *E.coli*) และ Nutrient (*S.aureus*) ผลแสดงดังรูปที่ 75–77 โดยศึกษาการลดลงของเชื้อแบคทีเรียจากการนับจำนวนโคโลนีที่เหลือ แล้วนำผลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง N/N_0 กับเวลาในการฉายแสงยูวี เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อตั้งต้น และ N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบ จากผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *S.typhi* (รูปที่ 75), *E.coli* (รูปที่ 76) และ *S.aureus* (รูปที่ 77) ของฟิล์มสูตรต่างๆ พบว่า ฟิล์ม TSP40 สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสามได้ดีที่สุด รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20,TS ,

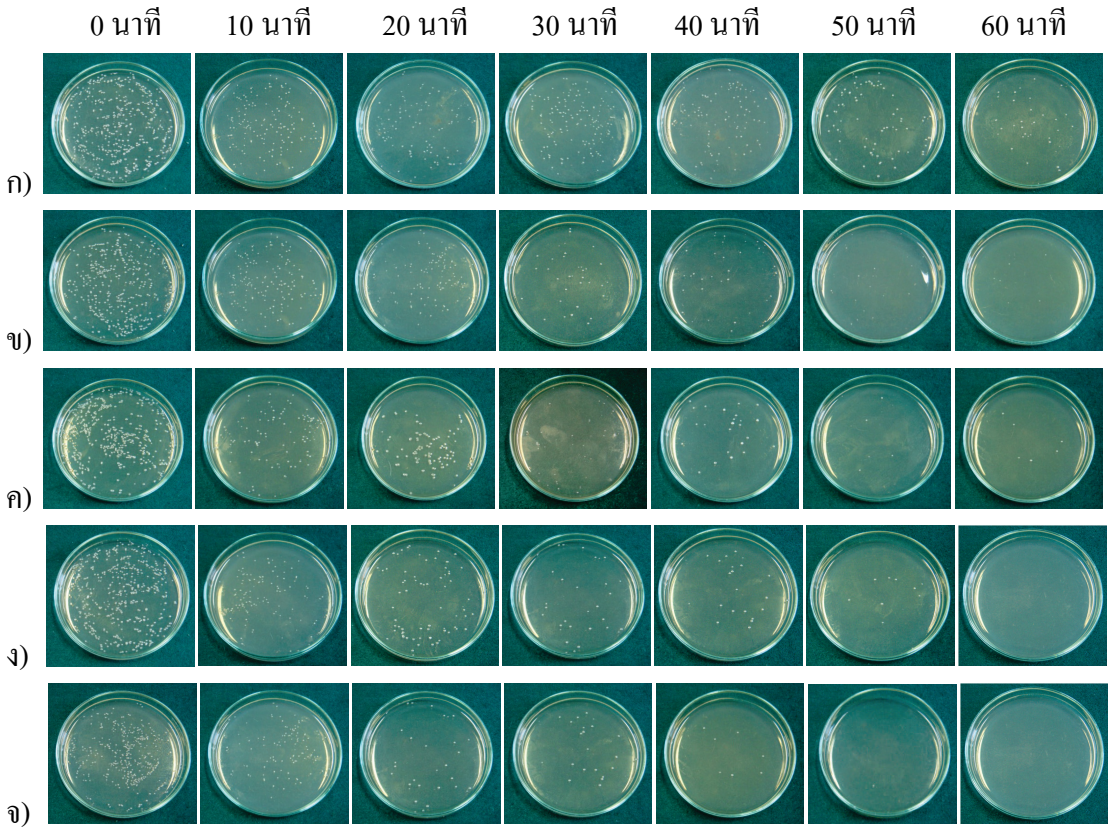
T และเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ตามลำดับ ซึ่งผลสอดคล้องกับการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูและสารเคมีต่างๆ เมื่อนำผลการทดลองในรูปที่ 78-80 ไปคำนวณประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ (รูปที่ 81-83) พบว่า ฟิล์ม TSP40 และ TSN20 สามารถฆ่าเชื้อ *S. typhi* ได้เกือบหมดภายในเวลาเพียง 10 นาที และหมดภายในเวลา 15 นาที (รูปที่ 81) ส่วนฟิล์ม T, TS และเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบสามารถฆ่าเชื้อ *S. typhi* ได้ 97.3, 99.5 และ 66.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายในเวลา 15 นาที จากผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *E.coli* พบว่า ฟิล์ม TSP40 และ TSN20 สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้เกือบหมดภายในเวลา 30 นาที และหมดภายในเวลา 40 นาที (รูปที่ 82) ส่วนฟิล์ม T, TS และเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบสามารถฆ่าเชื้อ *S.typhi* ได้ 96.2, 98.3 และ 77.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายในเวลา 40 นาที และผลการทดสอบการฆ่าเชื้อ *S.aureus* พบว่า ฟิล์ม TSP40 และ TSN20 สามารถฆ่าเชื้อ *S.aureus* ได้เกือบหมดภายในเวลา 50 นาที และหมดภายในเวลา 60 นาที (รูปที่ 83) ส่วนฟิล์ม T, TS และเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ สามารถฆ่าเชื้อ *S.typhi* ได้ 94.8, 98.0 และ 83.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายในเวลา 60 นาที ส่วนตางรางที่ 20 จะแสดงสมการความสัมพันธ์ของผลการฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิด ในรูปที่ 78–80 เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ($N/N_0=e^{-kt}$, เมื่อ k คือ ค่าคงที่การลดลง และ t คือ เวลาในการทดสอบ) เมื่อพิจารณาค่าคงที่การลดลงของฟิล์มแต่ละสูตร พบว่า ฟิล์ม TSP40 มีค่าคงที่การลดลงมากที่สุด รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20, TS, T และเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบตามลำดับ เนื่องจากฟิล์ม TSP40 มีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสที่เล็กและแถบช่องว่างพลังงานที่แคบ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ดีในกาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เมื่อพิจารณาค่าคงที่การลดลงสำหรับเชื้อ 3 ชนิด คือ *S.typhi*, *E.coli* และ *S.aureus* พบว่า เชื้อ *S.typhi* มีค่าคงที่การลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ *E.coli* และ *S.aureus* ตามลำดับ ผลการฆ่า *S.typhi*, *E.coli* และ *S.aureus* ของฟิล์ม TSP40 มีค่าคงที่การลดลงเท่ากับ 0.602, 0.149 และ 0.104 (ต่อนาที) ตามลำดับ เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) มีผนังเซลล์ที่หนาและมีความซับซ้อน ทำให้ฟิล์มชนิดต่างๆ ทำลายเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ยากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (*S.typhi*, *E.coli*) (Ramani et al., 2012) แต่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเชื้อ *S.typhi* และ *E.coli* พบว่า ฟิล์มต่างๆ สามารถฆ่าเชื้อ *S.typhi* ได้ดีกว่า *E.coli* เนื่องจาก *E.coli* มีแคปซูลบางๆ หุ้มอยู่รอบตัวทำให้เชื้อทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีกว่า เชื้อ *S.typhi* จากรูปที่ 84 เป็นการเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM ระหว่างเชื้อแบคทีเรียก่อน (รูปที่ 3.37ก–ค) และหลังการทดสอบกับฟิล์ม TSN20 (รูปที่ 84ง–ฉ) จะเห็นได้ว่าเชื้อแบคทีเรียในรูปที่ 84ก–ค มีลักษณะผนังเซลล์ที่เรียบ แต่เมื่อเชื้อแบคทีเรียสัมผัสกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระตุ้นด้วยแสงยูวีทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^{\bullet}$) และซุปเปอร์ออกซิเจน ($O_2^{-\bullet}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถทำลายผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียได้ (Sikong et al., 2010) จากรูปที่ 84ง–ฉ จะเห็นได้ว่าผนังเซลล์ถูกทำลายและมีรอยฉีกเห็นได้อย่างชัดเจน



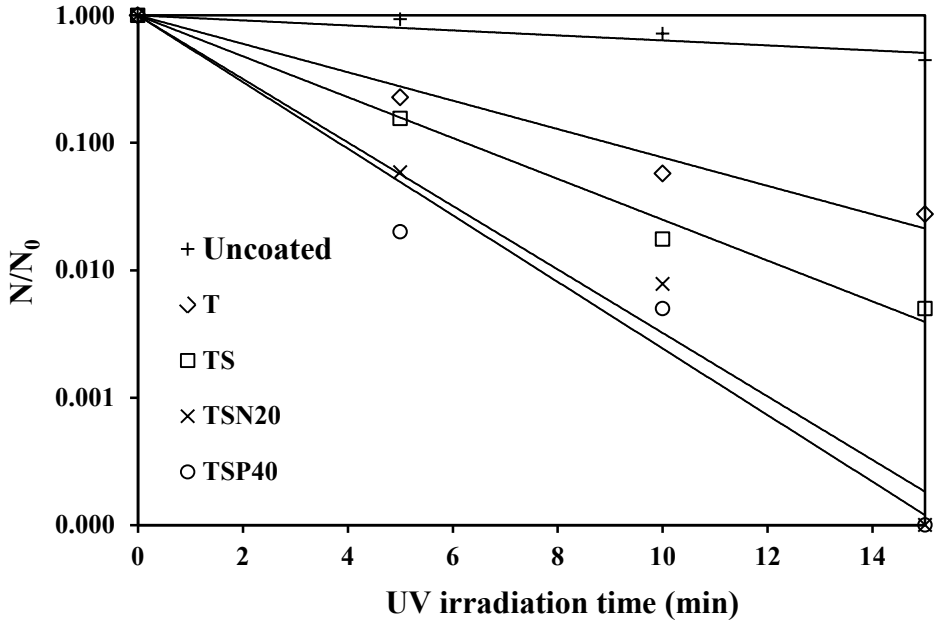
รูปที่ 75 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของฟิล์มสูตร (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) T (ค) TS (ง) TSN20 และ (จ) TSP40 ทดสอบภายในเวลา 20 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



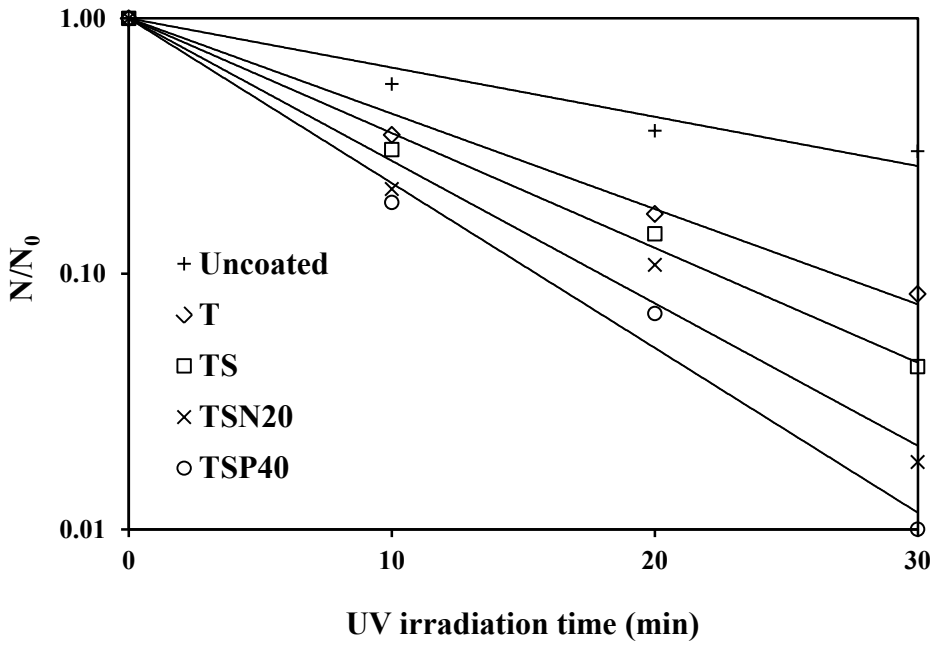
รูปที่ 76 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตร (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) T (ค) TS (ง) TSN20 และ (จ) TSP40 ทดสอบภายในเวลา 40 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



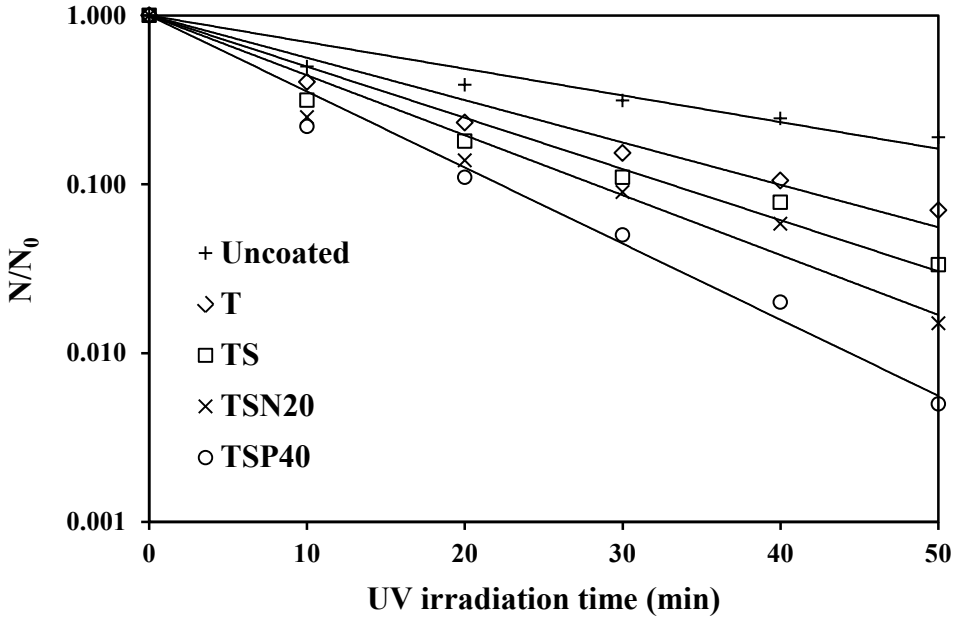
รูปที่ 77 ภาพแสดงผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของฟิล์มสูตร (ก) เส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ (ข) T (ค) TS (ง) TSN20 และ (จ) TSP40 ทดสอบภายในเวลา 60 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



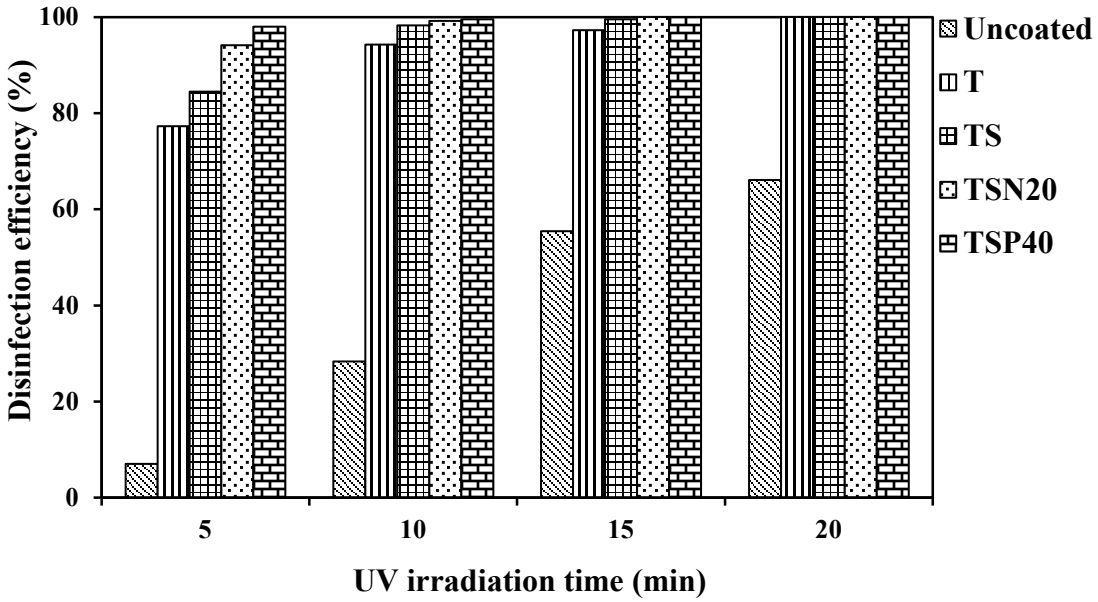
รูปที่ 78 ผลการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ ทดสอบภายในเวลา 15 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



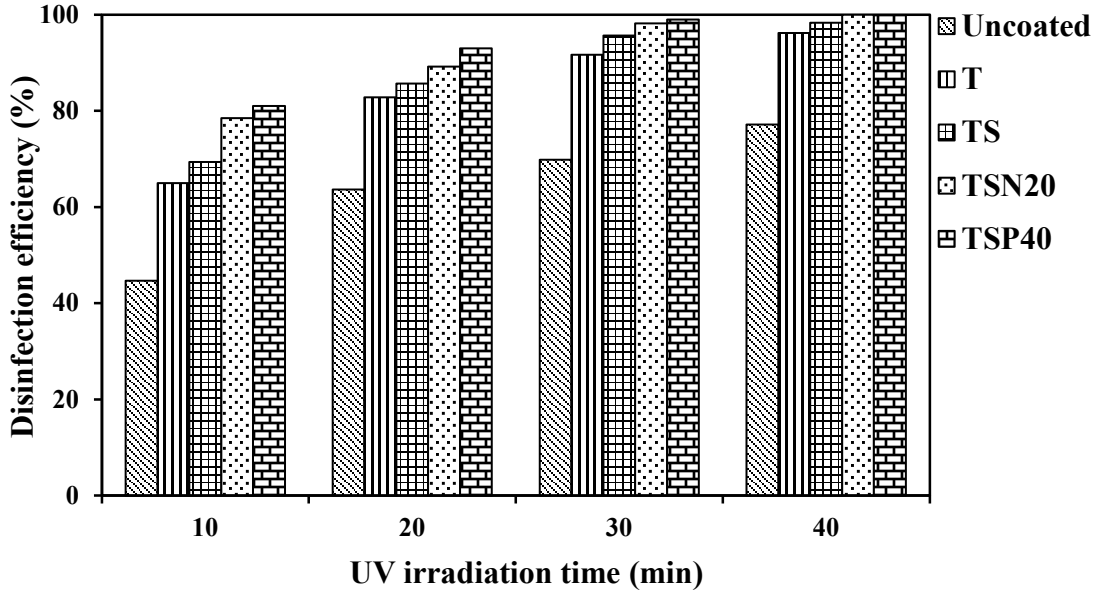
รูปที่ 79 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 30 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



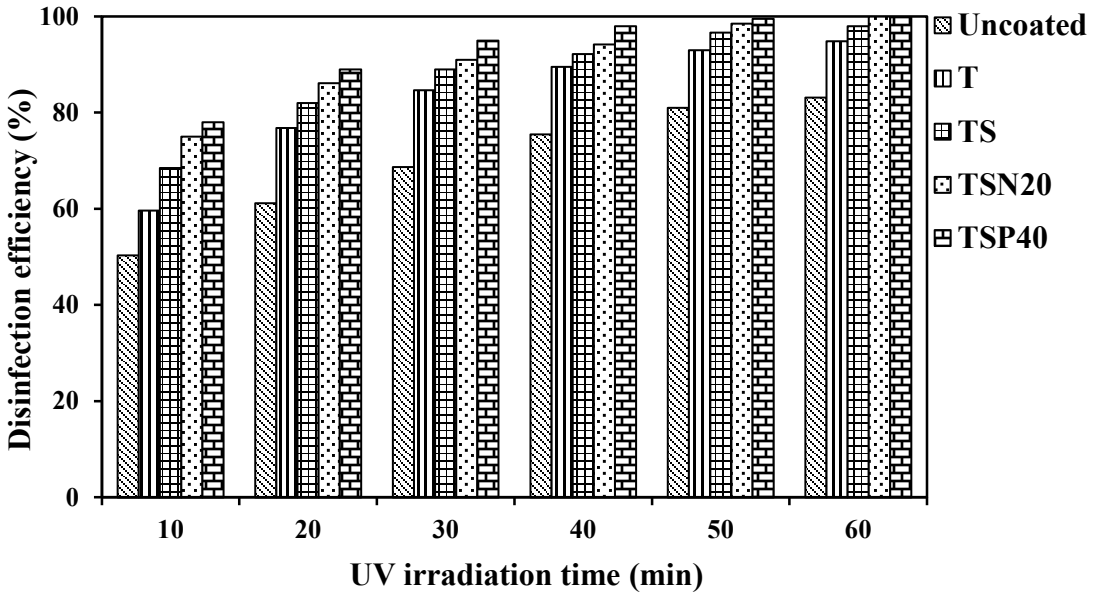
รูปที่ 80 ผลการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 50 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 81 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์มสูตร T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 20 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



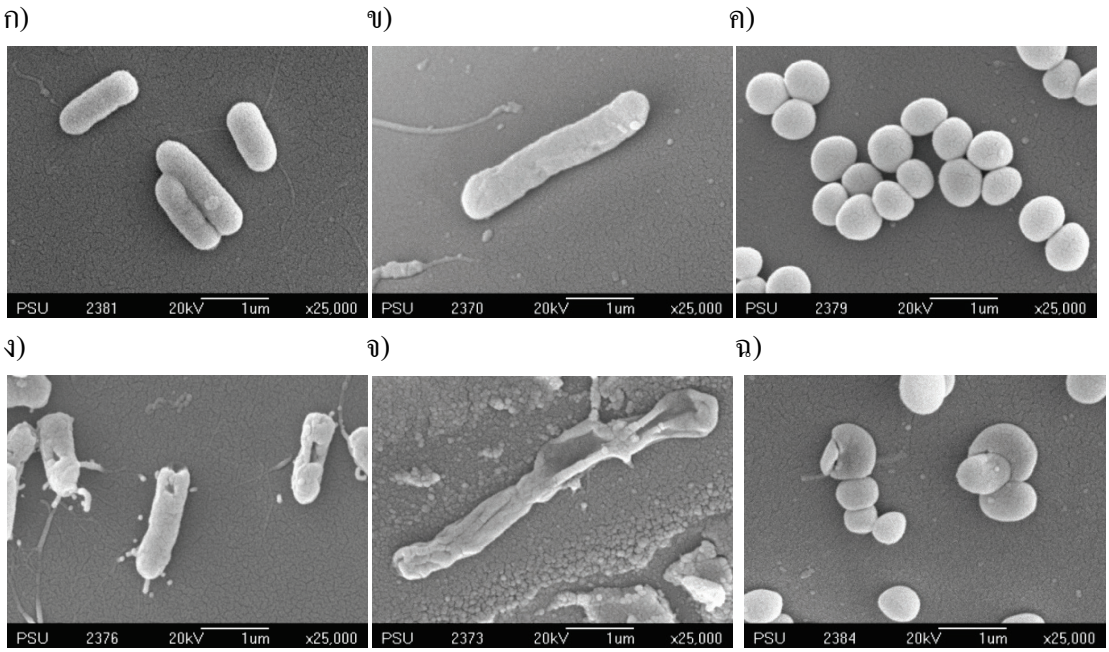
รูปที่ 82 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์มสูตร T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 40 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 83 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 20 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 20 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

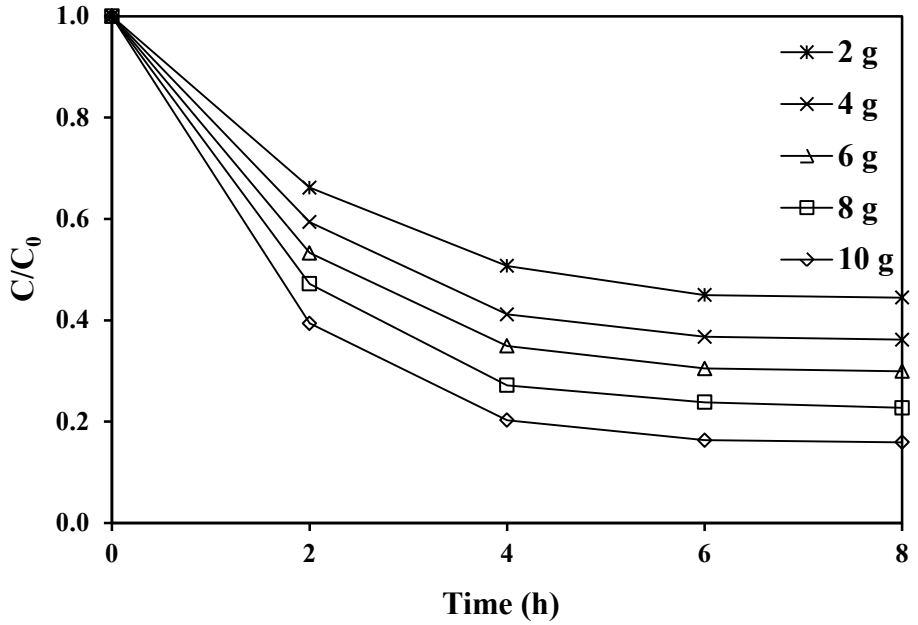
ชนิดแบคทีเรีย	ชนิดของฟิล์ม	สมการความสัมพันธ์	ค่าคงที่ (k) (min^{-1})	R^2
S.typhi	Uncoated	$N/N_0=e^{-0.045t}$	0.045	0.864
	T	$N/N_0=e^{-0.257t}$	0.257	0.975
	TS	$N/N_0=e^{-0.369t}$	0.369	0.989
	TSN20	$N/N_0=e^{-0.574t}$	0.574	0.975
	TSP40	$N/N_0=e^{-0.602t}$	0.602	0.969
E.coli	Uncoated	$N/N_0=e^{-0.044t}$	0.044	0.935
	T	$N/N_0=e^{-0.086t}$	0.086	0.986
	TS	$N/N_0=e^{-0.103t}$	0.103	0.993
	TSN20	$N/N_0=e^{-0.128t}$	0.128	0.975
	TSP40	$N/N_0=e^{-0.149t}$	0.149	0.987
S.aureus	Uncoated	$N/N_0=e^{-0.036t}$	0.036	0.888
	T	$N/N_0=e^{-0.058t}$	0.058	0.940
	TS	$N/N_0=e^{-0.070t}$	0.070	0.944
	TSN20	$N/N_0=e^{-0.082t}$	0.082	0.936
	TSP40	$N/N_0=e^{-0.104t}$	0.104	0.981



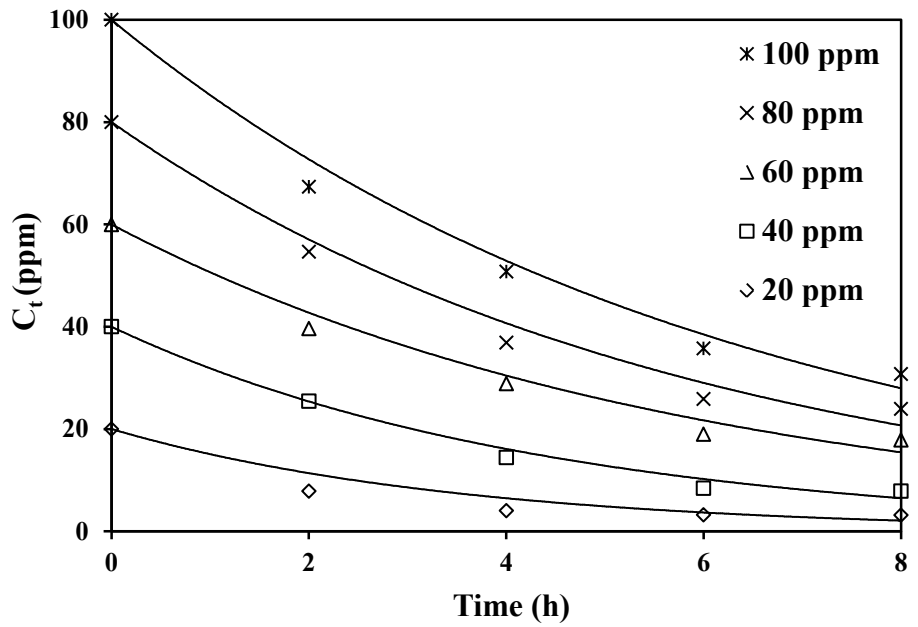
รูปที่ 84 ภาพถ่าย SEM ของเชื้อแบคทีเรียบนฟิล์ม (ก) *S. typhi* (ก่อนทดสอบ) (ข) *E.coli* (ก่อนทดสอบ) (ค) *S.aureus* (ก่อนทดสอบ) (ง) *S. typhi* (หลังได้รับแสงยูวี 15 นาที) (จ) *E.coli* (หลังได้รับแสงยูวี 40 นาที) และ (ฉ) *S.aureus* (หลังได้รับแสงยูวี 60 นาที) ของฟิล์ม TSN20

3.13 การทดสอบการดูดซับคาร์โบฟูรานและไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์

การทดสอบการดูดซับสารละลายคาร์โบฟูรานและไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ (Granular about 1.5 mm, Loba Chemie) โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 กรัมต่อสารละลายคาร์โบฟูรานและไนเตรตความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร (รูปที่ 85 และ 87) จากการทดสอบ พบว่า เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้นด้วยเพราะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นก็ทดสอบการดูดซับของถ่าน กัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างกันของคาร์โบฟูรานและไนเตรต คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัม (รูปที่ 86 และ 88) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับก็เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลาในการดูดซับได้สมการความสัมพันธ์ดังตารางที่ 21 และ 22 จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 8 ชั่วโมง พบว่า ที่ความเข้มข้นต่ำมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่สูงกว่าความเข้มข้นสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์



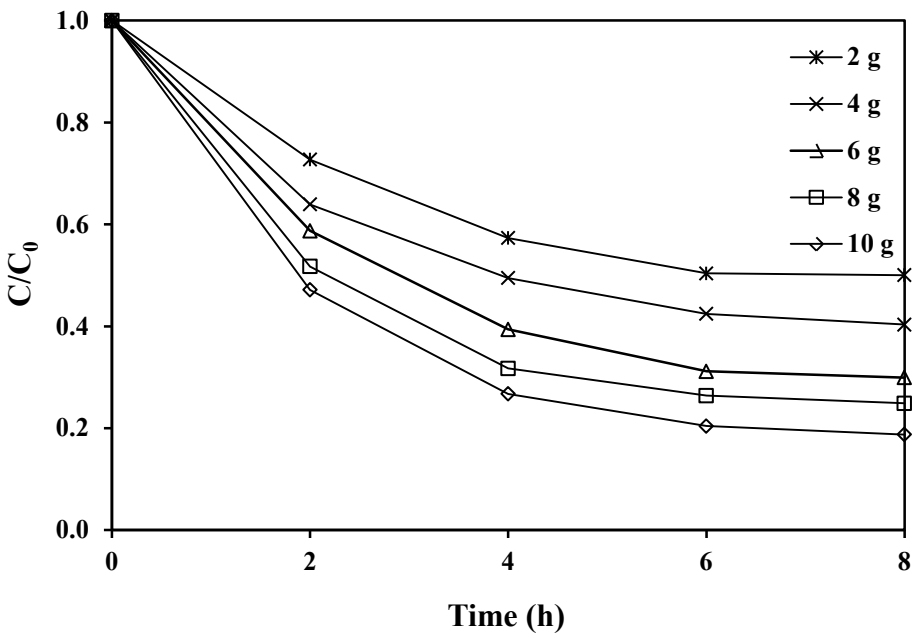
รูปที่ 85 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของคาร์โบฟูราน โดยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0= 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



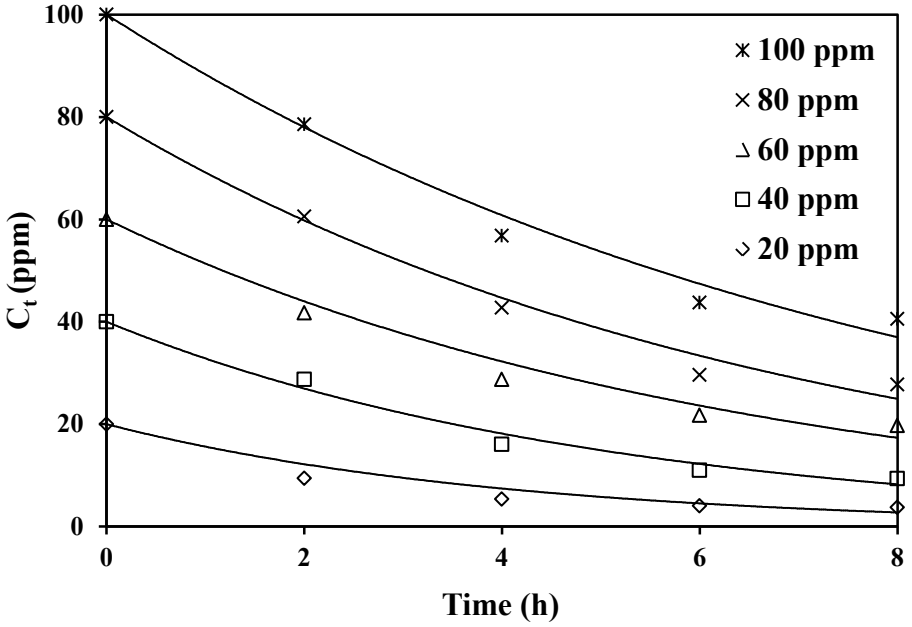
รูปที่ 86 กราฟแสดงการดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัม ต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ 21 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมการการดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้นของคาร์โบฟูราน (ppm)	สมการการดูดซับ	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การดูดซับ (8 h)
20	$C_t=20e^{-0.282t}$	0.282	0.777	84.1
40	$C_t=40e^{-0.227t}$	0.227	0.956	80.3
60	$C_t=60e^{-0.170t}$	0.170	0.954	70.2
80	$C_t=80e^{-0.169t}$	0.169	0.955	70.0
100	$C_t=100e^{-0.159t}$	0.159	0.976	69.2



รูปที่ 87 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไนเตรต จากการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0= 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 88 กราฟแสดงการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัม ต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ 22 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมการการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้นของคาร์โบฟูราน (ppm)	สมการการดูดซับ	ค่าคงที่ (k)(h^{-1})	R^2	% การดูดซับ (8 h)
20	$C_t=20e^{-0.274t}$	0.274	0.856	81.2
40	$C_t=40e^{-0.197t}$	0.197	0.970	76.6
60	$C_t=60e^{-0.155t}$	0.155	0.954	67.1
80	$C_t=80e^{-0.146t}$	0.146	0.967	65.3
100	$C_t=100e^{-0.124t}$	0.124	0.967	59.5

3.14 การออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำดื่ม

จากผลการศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนเส้นใยแก้วแล้ว พบว่า ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ TSP40 หลังจากนั้นก็ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks2013 เครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้นแสดงในรูปที่ 89–91 ในรูปที่ 89ก คือ ท่ออะคริลิคที่เป็นทรงกระบอกสูง 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร มีปริมาตร 170 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในท่ออะคริลิคบรรจุเส้นใยแก้วชนิด E–glass น้ำหนัก 50 กรัม (พีรวัส คงสง, 2554) โดยเส้นใยแก้วมีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร TSP40 เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส บรรจุอยู่ในท่ออะคริลิค ส่วนรูปที่ 89ข คือ หลอดแบล็คไลต์กำลัง 10 วัตต์ รูปที่ 90ก คือ ภาพจากด้านข้างของกล่องภายในเครื่องปฏิกรณ์ และ รูปที่ 90ข คือ ภาพจากด้านบนของกล่องภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนรูปที่ 91ก คือ ภาพจากด้านข้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ และรูปที่ 91ข คือ ภาพจากด้านหน้าของเครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์

เครื่องปฏิกรณ์มีโครงที่ทำจากอะคริลิค ประกอบด้วยเสา 4 เสา (1) และมีแผ่นอะคริลิค 2 แผ่น (2) แต่ละแผ่นมีช่อง 4 ช่อง ไว้สำหรับใส่ท่ออะคริลิค ซึ่งท่ออะคริลิค (3) เรียงต่อกันทั้งหมด 20 ท่อ แยกออกเป็น 4 แถว แต่ละแถวเชื่อมต่อกันด้วยท่อยาง (4) ส่วนท่ออะคริลิคถูกปิดด้วยจุกยาง (5) และมีการเชื่อมต่อกันเป็นอนุกรม ในแต่ละแถวด้วยท่อยางทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อให้น้ำไหลได้อย่างต่อเนื่องจนครบทุกท่อ ระหว่างท่ออะคริลิคแต่ละแถวมีแหล่งกำเนิดแสงยูวี (6) ซึ่งใช้หลอดแบล็คไลต์แถวละ 4 หลอด กำลังรวม 120 วัตต์ เพื่อกระตุ้นให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนเส้นใยแก้วเกิดปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อโรคและย่อยสลายสารเคมี โครงดังกล่าว (ตามรูปที่ 89ก และ 89ข) ถูกบรรจุอยู่ในตู้ที่ทำมาจากอลูมิเนียม (7) ที่มีหลอดแบล็คไลต์ (8) อยู่ด้านละ 4 หลอด กำลังรวม 80 วัตต์ และมีพัดลมระบายอากาศด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์

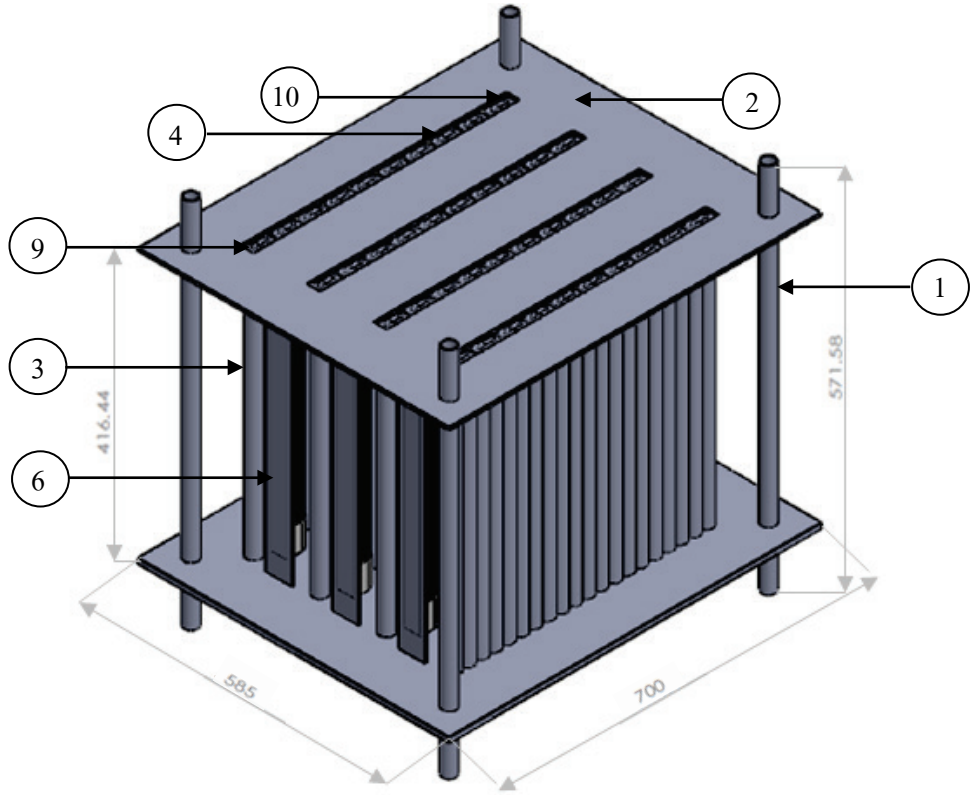
หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ คือ เมื่อน้ำไหลด้วยความดันเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางน้ำเข้า (9) แล้วไหลเข้าสู่ท่ออะคริลิคแต่ละแถว ตั้งแต่หลอดแรกจนถึงหลอดสุดท้ายจนถึงทางน้ำออก (10) น้ำจะสัมผัสกับผิวของเส้นใยแก้วที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ ซึ่งมีการกระตุ้นด้วยแสงยูวีจากหลอดแบล็คไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในการบำบัดน้ำ หลังจากนั้นน้ำก็ไหลผ่านท่อยางมารวมกันและผ่านเข้าสู่ท่ออะคริลิค (11) ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ และก็นำข้อมูลการออกแบบไปสร้างเครื่องปฏิกรณ์และทดสอบประสิทธิภาพต่อไป รูปที่ 92 แสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้ว ซึ่งเป็นกล่องภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปที่ 92ก) และเครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ (รูปที่ 92ข)

ก)

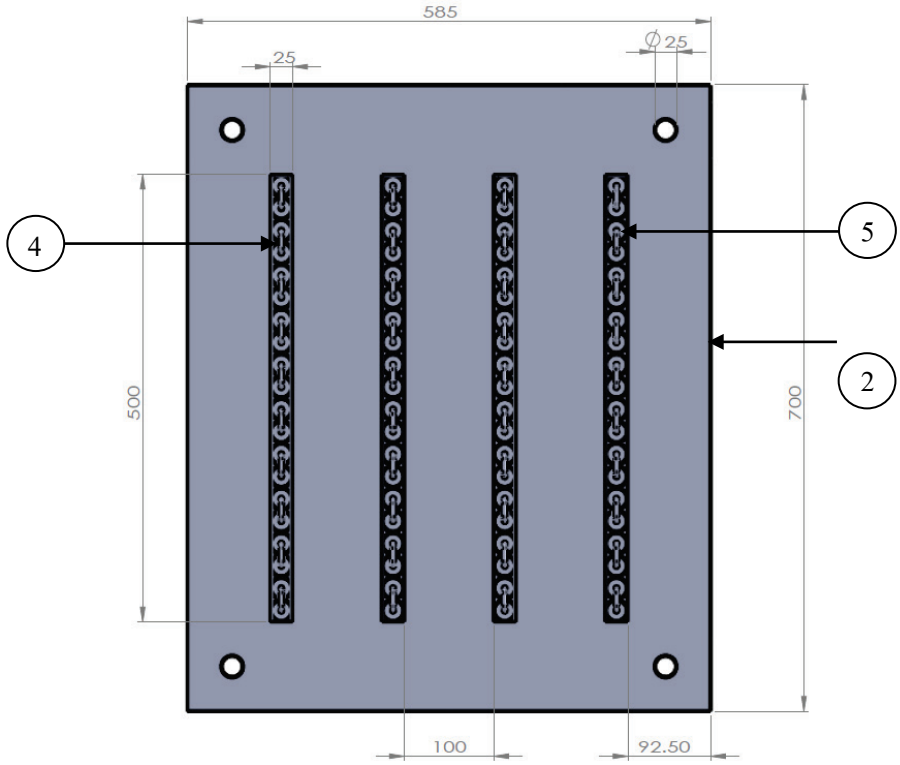
ข)

รูปที่ 89 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้น (ก) ท่ออะคริลิคสำหรับบรรจุเส้นใยแก้ว และ (ข) หลอดแบล็คไลต์

ก)

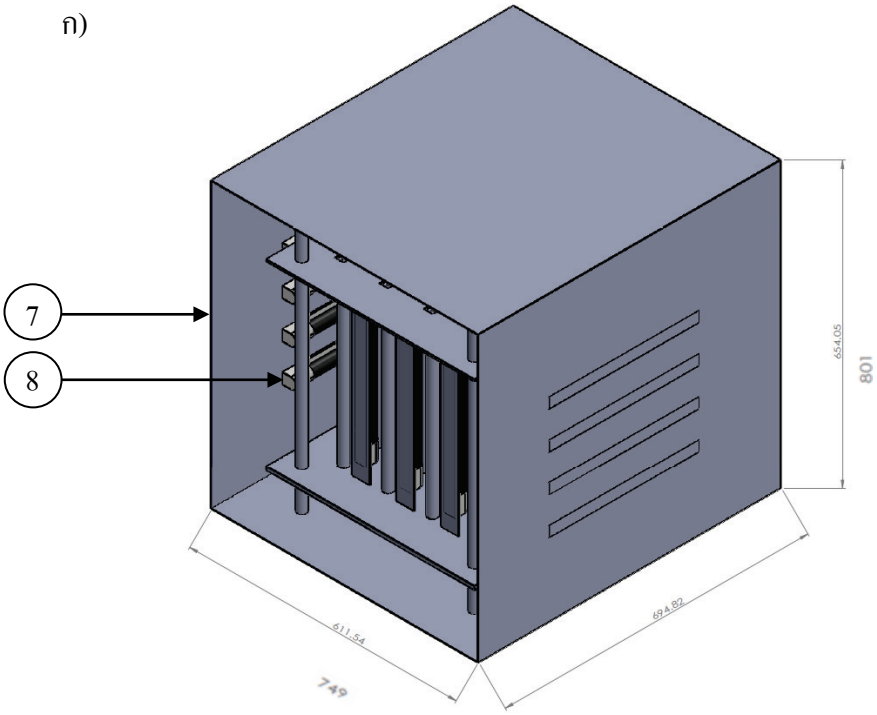


ข)

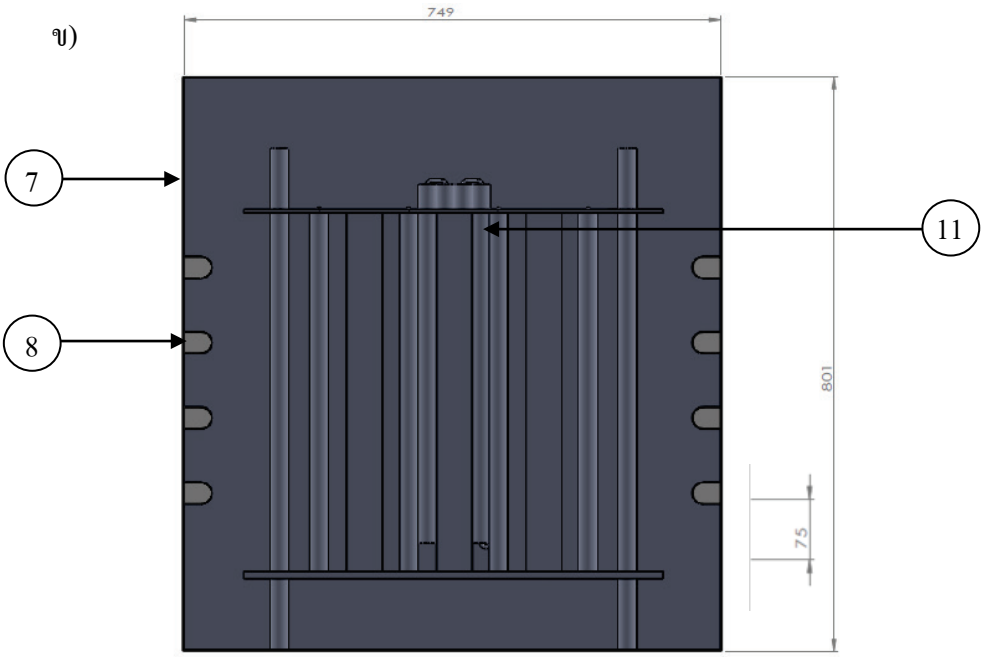


รูปที่ 90 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้น (ก) ภาพจากด้านข้างของกล่องภายใน และ (ข) ภาพจากด้านบนของกล่องภายใน

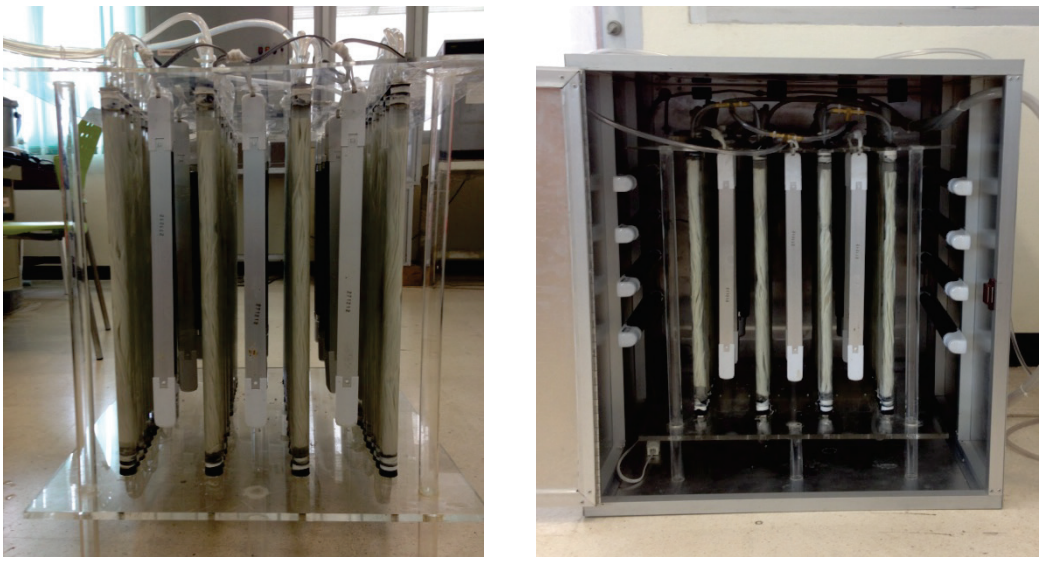
ก)



ข)



รูปที่ 91 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์ (ก) ภาพจากด้านข้าง และ (ข) ภาพจากด้านหน้า



ก) ข)

รูปที่ 92 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น (ก) กล่องภายใน และ (ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบสมบูรณ์

3.15 การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและย่อยสลายสารเคมีในน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น

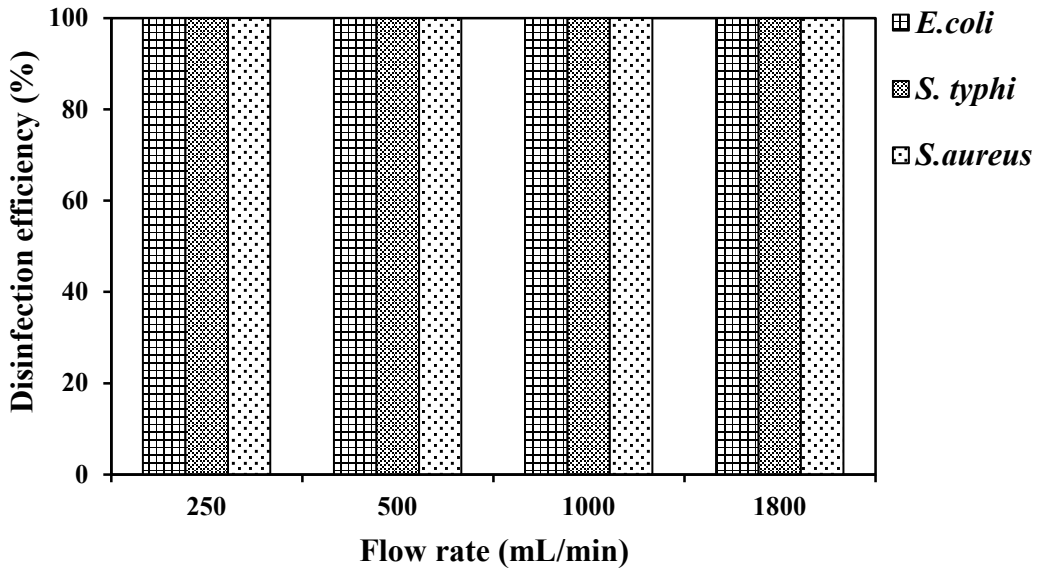
การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยทดสอบกับแบคทีเรีย 3 ชนิด คือ *S.typhi, E.coli* และ *S.aureus* และทดสอบการย่อยสารเคมีในน้ำ ได้แก่ กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ไกลโฟเสต คาร์โบฟูรานและไนเตรต โดยแยกการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

3.15.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น

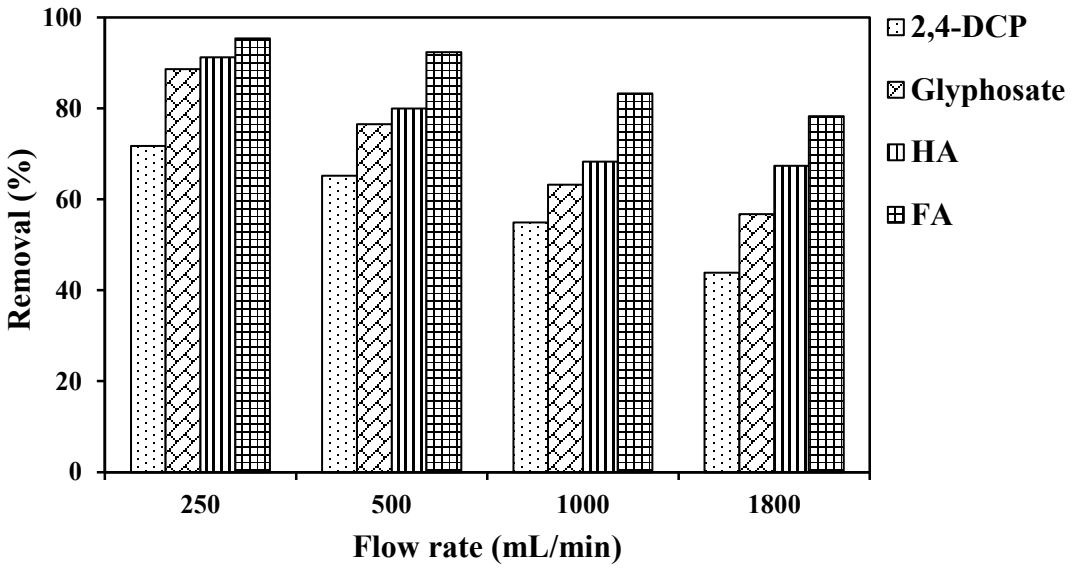
การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยเตรียมเชื้อแบคทีเรีย 3 ชนิด คือ *S.typhi, E.coli* และ *S.aureus* ความเข้มข้นของเชื้อ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และสารเคมี ได้แก่ กรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) โดยให้น้ำที่มีเชื้อแบคทีเรียและสารเคมีต่างๆ ผ่านเครื่องปฏิกรณ์เพียงครั้งเดียว แล้วนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อแบคทีเรียและความเข้มข้นของสารเคมี โดยทดสอบที่อัตราการไหลน้ำที่ 0.25, 0.5, 1.0 และ 1.8 ลิตรต่อนาที พบว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้หมดภายในครั้งเดียว ที่ทุกๆ อัตราการไหล (รูปที่ 3.93) และเมื่อทดสอบกับสารเคมีต่างๆ (รูปที่ 3.94) พบว่า ที่อัตราการไหลต่ำๆ เครื่อง

ปฏิกรณ์สามารถย่อยสลายสารเคมีได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูงๆ เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำๆ มีเวลาในการสัมผัสกันมากขึ้นระหว่างฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารเคมีต่างๆ โดยผลการทดสอบที่อัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที พบว่า สามารถย่อยสลายกรดฟัลวิค กรดฮิวมิค ไกลโฟเสต และ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลได้ 95.5, 91.3, 88.7 และ 71.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถย่อยสลายกรดฟัลวิคได้ดีที่สุด และย่อยสลาย 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ได้น้อยที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารนั้นๆ และการทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที พบว่า สามารถย่อยสลายกรดฟัลวิค กรดฮิวมิค ไกลโฟเสต และ 2,4–ไดคลอโรฟีนอลได้ 78.3, 67.5, 56.8 และ 43.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวที่อัตราการไหลที่สูง พบว่า ยังมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ค่อนข้างต่ำอยู่

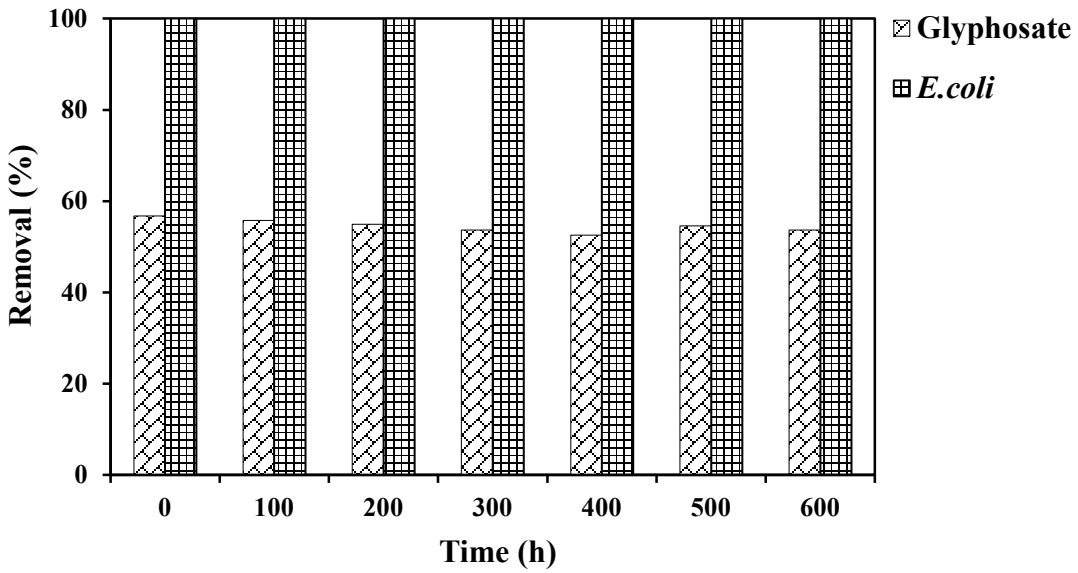
การศึกษาความคงทนของฟิล์มโดยการใช้งานอย่างต่อเนื่องแล้วทดสอบประสิทธิภาพทุกๆ 100 ชั่วโมง ด้วย *E.coli* ($N_0 = 10^3$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร) และไกลโฟเสต ($C_0 = 1x10^{-4}$ โมลาร์) (รูปที่ 95) ที่อัตราการไหลของน้ำ 1.8 ลิตรต่อนาที ผลการทดสอบ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้หมดตั้งแต่ 100 ชั่วโมง จนถึง 600 ชั่วโมง สำหรับการย่อยสลายไกลโฟเสต พบว่า สามารถย่อยสลายไกลโฟเสตได้ประมาณ 53.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ค่อนข้างจะคงที่ เนื่องจากฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีการยึดติดกับวัสดุฐานที่ดีเพราะฟิล์มถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิสูง (600 องศาเซลเซียส) จึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรง หลังจากทดสอบการใช้งานของเครื่องปฏิกรณ์แล้วเป็นเวลา 600 ชั่วโมง จึงนำฟิล์มที่ผ่านการใช้งานแล้วไปถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า (รูปที่ 96ก) 1,500 (รูปที่ 96ข) และ 5,000 เท่า (รูปที่ 96ค) เพื่อดูลักษณะของฟิล์มว่ามีการหลุดลอกหรือไม่ จากภาพถ่ายจาก SEM ของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มที่ใช้งานแล้วเป็นเวลา 600 ชั่วโมง มีการยึดเกาะที่ดีไม่มีการหลุดลอก โดยมีฟิล์มเคลือบอยู่ทั่วชิ้นงาน



รูปที่ 93 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่าง กัน ($N_0 = 10^3$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร)

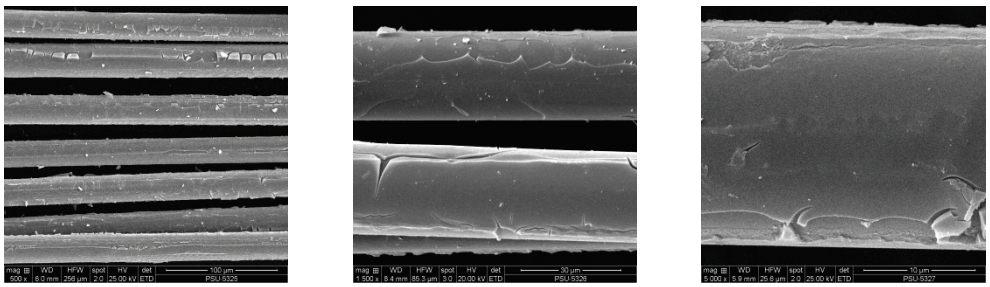


รูปที่ 94 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่าง กัน โดยทดสอบกับกรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต ($C_0 = 1x10^{-4}$ โมลาร์)



รูปที่ 95 ผลการทดสอบความคงทนของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังจากใช้งานเป็นเวลานาน ทดสอบกับเชื้อ *E.coli* ($N_0 = 10^3$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร) และไกลโฟเสต ($C_0 = 1x10^{-4}$ โมลาร์) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที

(ก) (ข) (ค)

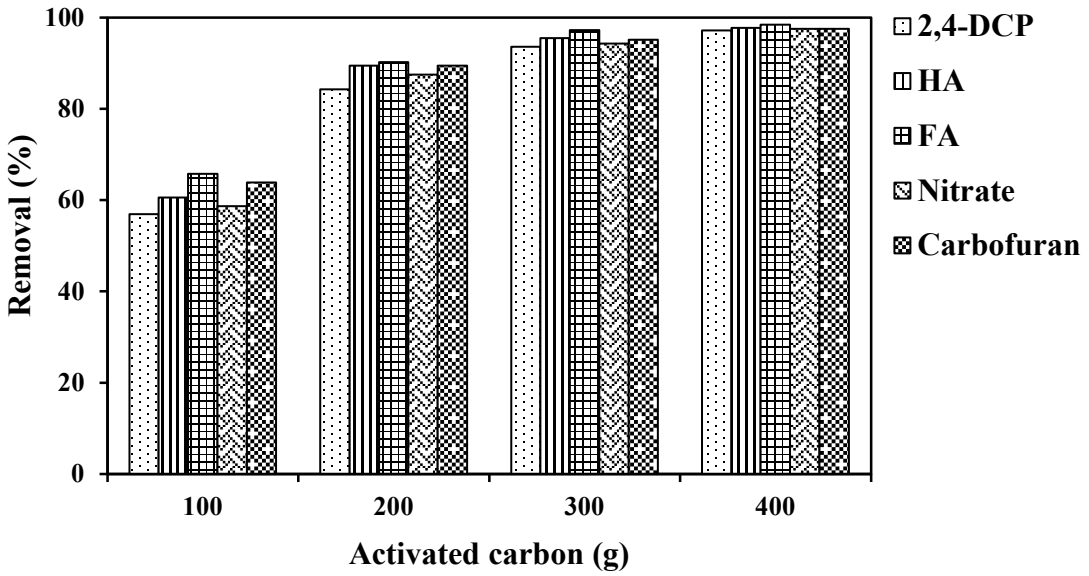


รูปที่ 96 ภาพถ่ายเส้นใยแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มสูตร TSN40 หลังจากใช้งานแล้วเป็นเวลา 600 ชั่วโมง เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ก) 500 เท่า (ข) 1,500 เท่า และ (ค) 5,000 เท่า

3.15.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารเคมีต่างๆ ด้วยถ่านกัมมันต์

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารเคมีต่างๆ ที่อัตราการไหลสูง (1.8 ลิตรต่อนาที) พบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ยังต่ำอยู่ จึงมีการนำถ่านกัมมันต์มาศึกษาเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป โดยศึกษาผลการดูดซับของถ่านกัมมันต์กับกรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไนเตรต (C_0 =20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน

(C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที โดยศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน คือ 100, 200, 300 และ 400 กรัม และนำถ่านกัมมันต์บรรจุในท่ออะคริลิคยาว 50 เซนติเมตร ท่อละ 100 กรัม (รูปที่ 97) จากการทดสอบ พบว่า เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับก็เพิ่มขึ้นด้วย เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ 300 และ 400 กรัม ได้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ผลการใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณที่ 400 กรัม พบว่า มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุด คือ สามารถดูดซับ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ไนเตรต คาร์โบฟูราน กรดฮิวมิค และ กรดฟัลวิคได้ 97.2, 97.5, 97.5, 97.7 และ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ท่ออะคริลิคที่มีถ่านกัมมันต์จำนวน 4 ท่อ ต่อเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์แล้วนำไปศึกษาประสิทธิภาพต่อไป

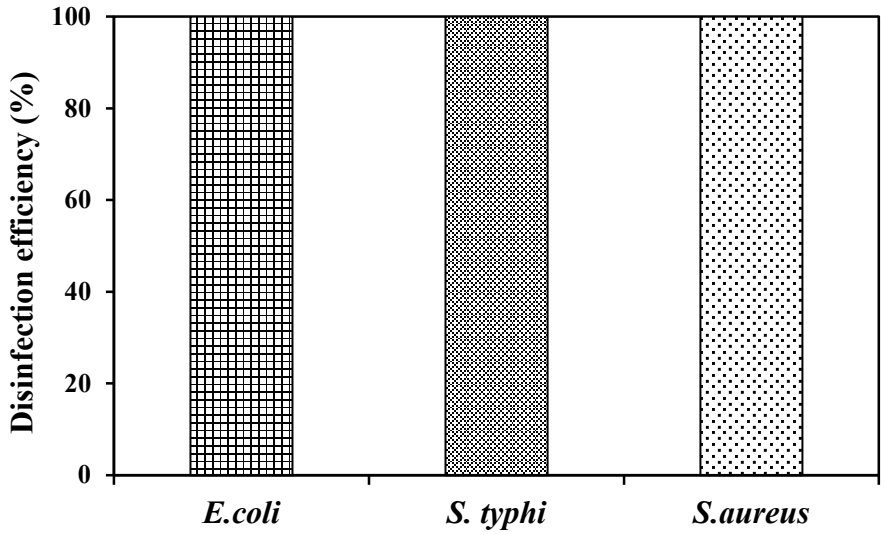


รูปที่ 97 ผลการทดสอบการดูดซับสารเคมีต่างๆ ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทดสอบกับ กรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) ไนเตรต (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที

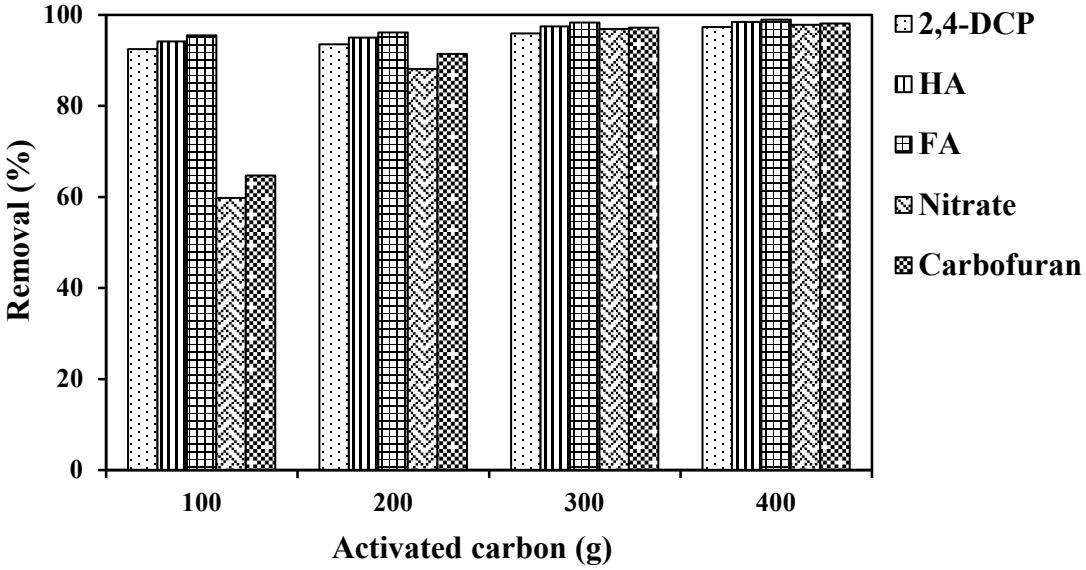
3.15.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีถ่านกัมมันต์ร่วมด้วย

จากการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเชื้อแบคทีเรียและสารเคมีต่างๆ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้หมดในครั้งเดียว แต่ยังย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ได้น้อย ดังนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เครื่องปฏิกรณ์ โดยนำถ่านกัมมันต์มาต่อเพิ่มเข้ากับ

เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งน้ำจะไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์แล้วผ่านถ่านกัมมันต์อีกครั้ง เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีอายุการใช้งานจำกัด และต้องนำมาปรับสภาพเพื่อให้ใช้งานได้อีก แต่ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีความคงทนและสามารถใช้งานได้นาน โดยยังมีประสิทธิภาพที่คงที่อยู่ จึงให้น้ำไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ไปก่อนแล้วจึงไหลผ่านถ่านกัมมันต์ เพื่อให้สารเคมีต่างๆ ถูกย่อยสลายด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ไปก่อน แล้วที่เหลือก็จะถูกกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูปที่ 98 และ 99 ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ 400 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถฆ่าแบคทีเรียได้หมด (รูปที่ 98) และสามารถกำจัดสารเคมี ได้แก่ กรดฮิวมิค (C_o = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_o = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไนเตรต (C_o = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที ปริมาณถ่านกัมมันต์เท่ากับ 100, 200, 300 และ 400 กรัม (รูปที่ 99) พบว่า ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 100 กรัม สามารถกำจัดไนเตรตและคาร์โบฟูรานได้ 59.8 และ 64.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่สำหรับกรดฮิวมิค กรดฟัลวิค และ 2,4–ไดคลอโรฟีนอล สามารถกำจัดได้เท่ากับ 94.1, 95.5 และ 92.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดไนเตรตและคาร์โบฟูราน ซึ่งผลส่วนใหญ่จากการกำจัดสาร 2 ชนิดนี้ก็มาจากถ่านกัมมันต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 200, 300 และ 400 กรัม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเคมีต่างๆ ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย และที่ปริมาณ 400 กรัมของถ่านกัมมันต์เครื่องปฏิกรณ์สามารถกำจัดกรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ไนเตรต และคาร์โบฟูราน ได้ 98.5, 98.9, 97.3, 97.8 และ 98.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการทดสอบดังกล่าว พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถทำงานได้ดีขึ้นเมื่อมีการเพิ่มถ่านกัมมันต์เข้าไปในระบบ โดยสามารถฆ่าแบคทีเรียได้หมดและสามารถกำจัดสารเคมีที่เป็นอันตรายได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานเพื่อการบำบัดน้ำดื่มเพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภคต่อไป



รูปที่ 98 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเครื่องปฏิกรณ์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ ($N_0 = 10^3$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 99 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารเคมีของเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำต่างกัน โดยทดสอบกับกรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไนเตรต (C_0 =20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคาร์โบฟูราน (C_0 = 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที

3.15.4 การทดสอบการย่อยสลายสารเคมีของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยตามมาตรฐานน้ำบริโภค

การทดสอบการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยตามมาตรฐานน้ำบริโภค กระทรวงสาธารณสุข จากสารเคมีที่ทำการศึกษามี 2,4–ไดคลอโรฟีนอลและไนเตรต ที่อยู่รวมในมาตรฐานน้ำบริโภค กระทรวงสาธารณสุข โดยมีค่ามาตรฐาน คือ มีฟีนอลไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไนเตรตไม่เกิน 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์โดยนำน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด 20 ลิตร มาเติมสาร 2,4–ไดคลอโรฟีนอลและไนเตรตให้มีความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และนำน้ำดังกล่าวไปผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่มีถ่านกัมมันต์ร่วมด้วย แล้วนำน้ำไปวิเคราะห์ตามมาตรฐานน้ำบริโภค ผลการวิเคราะห์ดังกล่าว พบว่า มีปริมาณฟีนอลน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณไนเตรต 0.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำดังกล่าวผ่านมาตรฐานน้ำบริโภค กระทรวงสาธารณสุข

3.15.5 รายละเอียดและคำแนะนำในการใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำดื่ม

- น้ำที่นำมาผ่านเครื่องปฏิกรณ์จะต้องผ่านการกรองหยาบมาก่อน
- ความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำที่จะนำมาผ่านเครื่องปฏิกรณ์ควรอยู่ในช่วง 10-20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียในน้ำที่จะนำมาผ่านเครื่องปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร
- อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 1.8 ลิตรต่อนาที

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือดีบุกและไนโตรเจน ซึ่งแหล่งที่ให้ไนโตรเจน คือ แอมโมเนียมคาร์บอเนต และ PVP แล้วเคลือบฟิล์มลงบนเส้นใยแก้วชนิด E-glass และนำฟิล์มสูตรต่างๆ ไปศึกษาประสิทธิภาพด้วยการทดสอบการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูและสารเคมีต่างๆ ในน้ำ ได้แก่ กรดฮิวมิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) กรดฟัลวิค (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2,4–ไดคลอโรฟีนอล (C_0 = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไกลโฟเสต (C_0 = $1x10^{-4}$ โมลาร์) และทดสอบฆ่าเชื้อแบคทีเรียต่างๆ ได้แก่ *E.coli*, *S.typhi* และ *S.aureus* ($N_0 = 10^3$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร)ศึกษาผลของชนิดของสารเจือ ปริมาณสารเจือ ที่มีผลต่อสารเคลือบที่พัฒนาได้ ศึกษาการดูดซับไนเตรตและคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ แล้วทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือและมีการเจือดีบุกร่วมกับไนโตรเจน เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้เกิดเฉพาะเฟสอะนาเทสเท่านั้น และการเจือไนโตรเจนยังมีผลทำให้มีขนาดผลึกและค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง โดยฟิล์ม TSN20 มีค่าแถบช่องว่างพลังงานน้อยที่สุดเพียง 3.03 อิเล็คตรอนโวลต์ และ ฟิล์ม TSP30 มีขนดผลึกที่เล็กที่สุดเพียง 8.4 นาโนเมตร

การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือดีบุกร่วมกับไนโตรเจน โดยศึกษาแหล่งให้ไนโตรเจนที่ต่างกัน พบว่า การเจือไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคาร์บอเนต ไนโตรเจนจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนอยู่ในรูปของ TiN และ O–Ti–N ส่วนการเจือไนโตรเจนด้วย PVP พบว่า ไนโตรเจนจะฟอร์มตัวแบบแทรกอยู่ในรูปของ Ti–O–N

การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ฟิล์มสูตร TSP40 มีประสิทธิภาพที่ดีสุดในการย่อยสลายเมทิลีนบลู โดยสามารถย่อยสลายได้ 90.4 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งดีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือที่ย่อยสลายสารเมทิลีนบลูได้เพียง 71.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเจือไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคาร์บอเนตให้ผลการย่อยสลายเมทิลีนบลูที่น้อยกว่าการเจือไนโตรเจนจาก PVP และผลการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ

ได้แก่ กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล และไกลโฟเสต ผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับการทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลู

เมื่อนำฟิล์ม TSP40 ซึ่งเป็นฟิล์มที่ดีที่สุดจากจากการทดสอบการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ไปทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย โดยศึกษาเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร TSN20, TS และ T พบว่า ฟิล์ม TSP40 มีผลการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ดีที่สุด โดยสามารถฆ่าเชื้อ *E.coli, S.typhi* และ *S.aureus* ได้หมดภายในเวลา 40, 15 และ 60 นาที ตามลำดับ รองลงมา คือ ฟิล์ม TSN20, TS และ T ตามลำดับ โดยฟิล์มที่สังเคราะห์ได้สามารถฆ่าได้ทั้งแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli, S.typhi*) และแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*)

ผลการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีฟิล์ม TSP40 กับเชื้อแบคทีเรียและสารเคมีต่างๆ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli, S.typhi* และ *S.aureus* ได้หมดในครั้งเดียวที่ทุกๆ อัตราการไหล (0.25-1.8 ลิตรต่อนาที) และสามารถย่อยสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ ได้แก่ กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล และไกลโฟเสตได้ 91.3, 95.5 , 71.8 และ 88.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที เมื่อทดสอบที่อัตราการไหลสูงขึ้น พบว่า เครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ลดลง ส่วนการทดสอบความคงทนของฟิล์ม พบว่า ประสิทธิภาพของฟิล์มค่อนข้างคงที่เมื่อทดสอบใช้เครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 600 ชั่วโมง

จากการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเฉพาะฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างเดียว พบว่า ที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที ยังมีประสิทธิภาพต่ำในการย่อยสารเคมีต่างๆ ดังนั้นจึงมีออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ใหม่โดยการเพิ่มคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์เข้าไปในส่วนท้ายของระบบ เมื่อนำเครื่องปฏิกรณ์ที่มีถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยไปทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและกำจัดสารเคมีต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที พบว่า สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli, S.typhi* และ *S.aureus* ได้หมดในครั้งเดียว และสามารถกำจัดสารเคมีต่างๆ ได้แก่ กรดฮิวมิค กรดฟัลวิค 2,4–ไดคลอโรฟีนอล ไนเตรตและคาร์โบฟูรานได้ 98.5, 98.9, 97.3, 97.8 และ 98.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์กับถ่านกัมมันต์สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดสารเคมีบางชนิดที่เป็นอันตรายในน้ำดื่มได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และสารเคมีที่ความเข้มข้น 10–20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบที่อัตราการไหล 1.8 ลิตรต่อนาที และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ก็มีความคงทนสามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน ส่วนถ่านกัมมันต์ก็มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นเพราะสารเคมีต่างๆ ได้ถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกไปแล้วบางส่วน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาต่อโดยอาจจะเปลี่ยนจากเส้นใยแก้วเป็นวัสดุอย่างอื่นที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

2. ควรเปลี่ยนวัสดุที่นำมาสร้างเครื่องปฏิกรณ์ให้มีน้ำหนักน้อยลง

3. ควรพัฒนาต่อโดยเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาบเคลือบสารเคมีเพื่อให้ฟิล์มมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

4. ควรปรับขนาดของท่ออะคริลิคสำหรับบรรจุฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา

บรรณานุกรม

กองวิเคราะห์และทดสอบ กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ. 2548. ความสำคัญของการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตและการควบคุมคุณภาพของน้ำดื่ม. http://www.navy.mi.th/science/Webpage/newdocument/ni_water.htm.

ฐาปนันท์ พุทธา. 2549. การกำจัดฟีนอลที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบโดยใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธีรพร กงบังเกิด. 2546. จุลชีววิทยาอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์, ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์. 2550. ไททาเนีย:ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. http://www.vcharkarn.com/varticle/27809. (สืบค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2557).

นงนุช กำลังแพทย์. 2550. การศึกษาแคดเมียมและสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ แคดเมียม–กรดฟัลวิกต่อความผิดปกติทางพันธุกรรมของผักบุ้งจีน. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ปริยานุช สายสุพรรณ์. 2553. การหาปริมาณคาร์โบฟูรานในผักด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโทเมทรี. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเคมีสำหรับครู คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เพ็ญประภา เฟื่องอักษร. 2553. การทำปุ๋ยหมักจากใบและลำต้นมันสำปะหลัง: อิทธิพลของรูปแบบและความเข้มข้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อการเปลี่ยนแปลงอินทรีสาร. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พีรวัส คงสง. 2554.การศึกษาประสิทธิภาพของใยแก้วที่เคลือบด้วย TiO_2 ในการทำความสะอาดน้ำดื่ม. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พรนภา สุจริตวรกุล. 2548. ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์กับชีวิตประจำวัน. *วารสารเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุ*. 40, 77.

ภัทรารัตน์ เทียมเก่า. 2557. ความเป็นพิษของไกลโฟเสตและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*. 32 (3), 71–79.

วิโรจน์ วัชระเกียรติศักดิ์ พนมพันธ์ จันทร์สูง ศรายุทธ อุ่นแก้วและกาญจนา แสนตะรัตน์. กลุ่มวิจัยและพัฒนาคุณภาพน้ำบริโภค สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข "สถานการณ์คุณภาพน้ำบริโภคในประเทศไทย ปี 2551–2556" http://www.m–society.go.th/article_attach/12253/16501.pdf. (สืบค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2558).

ราชัน ธีระพิทยาตระกูล. 2545. การก่อตัวของไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มของระบบประปาชนบทในจังหวัดนครราชสีมา. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

รุจิรา ปิ่นแก้ว. 2556. การผลิตและการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชเพชรบูรณ์.

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

สุจิตรา นาวารัตน์. 2553. การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลสีส การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซีและการเติมคลอรีน. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สุภาพ เหมืองแก้ว. 2548. การศึกษาชนิดและปริมาณของแบคทีเรียและเชื้อราก่อโรคที่สำคัญจากตัวอย่างน้ำขยะในเขตกรุงเทพมหานคร ปทุมธานีและอยุธยา. วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสัตวแพทยสาธารณสุข ภาควิชาสัตวแพทยสาธารณสุข คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.

สำนักสารนิเทศ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. สธ.เผยคนทั่วโลกเสียชีวิตจากเหตุ ดื่มน้ำไม่สะอาดปีละ 500,000 คน เฉลี่ยนาทีละ1 คน. http://pr.moph.go.th/iprg/module.php?mod=news_print&idHot_new=71671 (สืบค้นเมื่อ 4 สิงหาคม 2558).

Agustina, T.E., Ang, H.M., and Vareek, V.K. 2006. A Review of Synergistic Effect of Photocatalysis and Ozonation on Wastewater Treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology C:Photochemistry Reviews.*6(4), 264–273.

Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, K., and Taga, Y., 2001. Visible–Light Photocatalysis in Nitrogen–Doped Titanium Oxides. *Science*. 293, 269–271.

Ashkarran, A.A., Hamidinezhad, H., Haddadi, H., and Mahmoudi, M. 2014. Double–Doped TiO_2 Nanoparticles as an Efficient Visible–Light–Activephotocatalyst and Antibacterial Agent Under Solar Simulated Light. *Applied Surface Science*. 301, 338–345.

Bing, N.L., Woei, D.L., and Jie, C.L. 1999. Photocatalytic Decolorization of Methylene Blue in Aqueous TiO_2 Suspension. *Environmental Engineering Science*. 16(3), 165–175.

Blake, D.M., Maness, P.C., Huang, Z., Wolfrum, E.J., Huang, J., and Jacoby, W.A. 1999 Application of the Photocatalytic Chemistry of Titanium Dioxide to Disinfection and the Killing of Cancer Cells. *Separation and Purification Methods*. 28(1), 1–5.

Bla□ková, A., Csölleová, I., and Brezová, V. 1998. Effect of Light Sources on the Phenol Degradation using Pt/TiO_2 Photocatalysts Immobilized on Glass Fibres. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 113(3), 251–256.

Bolton, J.R. and Cater, S.R. 1994. Homogeneous Photodegradation of Pollutants in Contaminated Water an Introduction. 467–490.

Brinker, C.J. and Scherer, G.W. 1990. Sol–Gel Science–The Physics and Chemistry of Sol–Gel Processing, Academic Press, New York.

Byrne, J.A., Eggins, B.R., Brown, N.M.D., McKinney, B., and Rouse, M. 1998. Immobilisation of TiO_2 Powder for the Treatment of Polluted Water. *Application Catalysis B: Environmental*. 17, 25–36.

Carlos, J.P., Robertson, P.K.J., Edwards, C., Wilhelm, W., McKenzie, C., and Lawton, L.A. 2014. A Continuous Flow Packed Bed Photocatalytic Reactor for the Destruction of 2–Methylisoborneol and Geosmin Utilising Pelletised TiO_2. *Chemical Engineering Journal* 235, 293–298.

Cheng, X., Yu, X., Xing, Z., and Wan, J. 2012. Enhanced Photocatalytic Activity of Nitrogen Doped TiO_2 Anatase Nano–Particle under Simulated Sunlight Irradiation. in *Proceedings of the International Conference on Future Energy, Environment, and Materials (FEEM '12)*, 16, 598–605, April 2012.

Chrisopher, R. and Daniel, A. 1992. Surface Water Treatment for Communities in Developing Country. University of North Carooolina at Chapel Hill.

Chungsiriporn, J., Bunyakan, C., and Intamannee, J. 2008. Photocatalytic Oxidation of Toluene in Waste Air with TiO_2 Catalyst. *TISD2008*. 546–550.

Dawson, M., Soares, G.B., and Ribeiro, C. 2014. Influence of Calcinations Parameters on the Synthesis of N–Doped TiO_2 by the Polymeric Precursors Method. *Journal of Solid State Chemistry*. 215, 211–218.

Edzward, G.A. and Amirtharajah, A. 1985. Removal Color Caused by Humic Acide. *Journal American Water Works Association*. 77(3), 50–57.

Emmanuil, S.T., Konstantina, T., Nikolaos, P.X., Nikolalaos, P.N., Evan, D., and Dionissios, M. 2009. Simultaneous Photocatalytic Oxidation of As(III) and Humic Acid in Aqueous TiO_2 Suspensions. *Journal of Hazardous Materials.* 169(1–3), 376–385.

Fox, M.A. and Duley, M.T. 1993. Heterogeneous Photocatalysis. *Chemical Reviews*. 93, 341–357.

Fua, J., Ji, M., Wang, Z, Jin, L., and Ana, D. 2006. A New Submerged Membrane Photocatalysis Reactor (SMPR) for Fulvic Acid Removal Using a Nano–Structured Photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*. 131(1–3), 238–242.

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.

Geng, J., Yang, D., Zhu, J., Chen, D., and Jiang, Z. 2009. Nitrogen–Doped TiO_2 Nanotubes with Enhanced Photocatalytic Activity Synthesized by a Facile Wet Chemistry Method. *Materials Research Bulletin*. 44(1), 146–150.

Hatch, G.L., Steinhardt, M.D., Kurth, M.J., and Anderson, M.A. Photocatalytic Water Treatment Apparatus. U.S. Patent 0231470A1, October 19, 2006.

Helfrich, L.A. 1996. Pesticides and Aquatic Aminals: a Guide to Reducing Impacts on Aquatic Systems, Carson City, USA.

Hoffman, M.R., Martin, S.T., Choi, W., and Bahnemannt, D.W. 1995. Envimemtal Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chemical Reviews*. 95, 69–96.

Hong, W.J. and Kang, M. 2006. The Super–Hydrophilicities of Bi–TiO_2, V–TiO_2, and Bi–V–TiO_2 Nano–Sized Particles and Their Benzene Photodecompositions with H_2O Addition. *Materials Letters.* 60(9–10), 1296–1305.

Horn, M., Schwerdtfeger, C.F., and Meagher, E.P. 1972. Refinement of the Structure of Anatase at Several Temperatures. *Zeitschrift fur Kristallographie*.136, 273

Hu, Y., Tsai, H.L., and Huang, C.L. 2003. Phase Transformation of Precipitated TiO_2 Nanoparticles. *Materials Science and Engineerin.* 344(1–2), 209–214.

Hou, L.R., Yuan, C.Z., and Peng, Y. 2007. Synthesis and Photocatalytic Property of SnO_2/TiO_2 Nanotubes Composites. *Journal of Hazardous Materials*. 139(2), 310–315.

Hubbell, D.A. and Hubbell, M.C. 2005. Environmental Coatings Assemblies. U.S. Patent 0159309, July 21, 2005.

In, G.R., Helz, R.G., and Zepp., D.G. 1994. Crosby (Eds), Aquatic and Surface Photochemistry. *Lewis Publishers*, USA.

Jain, P. and Pradeep, T. 2005. Potential of Silver Nanoparticle Coated Polyurethane Foam as an Antibacterial Water Filter. *Biotechnol Bioeng*. 90(1), 59–63.

Jaiswal, R., Patel, N., Kothari, D.C., and Miotello, A. 2012. Improved Visible Light Photocatalytic Activity of TiO_2 Co–Doped with Vanadium and Nitrogen. *Applied Catalysis B:Environmental*. 126, 47–54.

Jang, S.J., Kim, M.S., and Kim, B.W. 2005. Photodegradation of DDT with the Photodeposited Ferric Ion on the TiO_2 Film. *Water Research.* 39(10), 2178–2188.

Jiaqing, G., Dong, Y., Juhong, Z., Daimei, C., and Zhongyi, J. 2009. Nitrogen–Doped TiO_2 Nanotubes with Enhanced Photocatalytic Activity Synthesized by a Facile Wet Chemistry Method. *Materials Research Bulletin.* 44(1), 146–150.

Jin, R., Gao, W., Chen, J., Zeng, H., Zhang F., Liu , Z., and Guan, N. 2004. Photocatalytic Reduction of Nitrate Ion in Drinking Water by Using Metal–Loaded $MgTiO_3$–TiO_2 Composite Semiconductor.*Catalyst Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 162(2–3), 585–590.

Kadam, A.N., Dhabbe, R.S., Kokate, M.R., Gaikwad, Y.B., and Garadkar K.M. 2014. Preparation of N Doped TiO_2 Via Microwave–Assisted Method and Its Photocatalytic Activity for Degradation of Malathion. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 133, 669–676.

Kanai, N., Nuida, T., Ueta, K., Hashimoto, K., Watanabe, T., and Ohsaki, H. 2004 Photocatalytic Efficiency of TiO_2/SnO_2 Thin Film Stacks Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Vacuum.* 74(3–4), 723–727.

Kegley, S. 1999. Ecological Impacts of Pesticides in California, San Francisco, California.

Kim, S. and Kim, H.J. 2006. Anti–Bacterial Performance of Colloidal Silver–Treated Laminate Wood Flooring. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 57(3), 155–162

Kudo A. and Miseki, Y. 2009. Heterogeneous Photocatalyst Materials for Water Splitting. *Chemical Society Reviews*. 38(1)*,* 253.

Kuo, C.N., Chen, H.F., Lin, J.N., and Wan, B.Z. 2007. Nano–Gold Supported on TiO_2 Coated Glass Fiber for Removing Toxic CO Gas from Air. *Catalysis Today*. 122(3–4), 270–276

Lei, X.F., Xue, X.X., Yang, H., Chena, C., Li, X., Niu, M.C., Gao, X.Y., and Yang, Y.T. 2015. Effect of Calcination Temperature on the Structure and Visible–Light Photocatalytic Activities of (N, S and C) Co–Doped TiO_2 Nano–Materials. *Applied Surface Science*. 332, 172–180.

Sikong, L., Masae, M., Kooptarnond, K., Taweepreda W., and Saito F. 2012 Improvement of Hydrophilic Property of Rubber Dipping Former Surface with Ni/B/TiO_2 Nano–Composite Film*. Applied Surface Science*. 258, 4436–4443.

Li, H., Hao, Y., Lu, H., Liang, L., Wang, Y., Qiu. J., Shi, X., Wang, Y., and Yao, J. 2015. A Systematic Study on Visible–Light N–Doped TiO_2 Photocatalyst Obtained from Ethylenediamine by Sol–Gel Method. *Applied Surface Science*. 344, 112–118

Li, X., Liu, P., Mao, Y., Xing, M., and Zhang, J. 2015. Preparation of Homogeneous Nitrogen–Doped Mesoporous TiO_2 Spheres with Enhanced Visible–Light Photocatalysis. *Applied Catalysis B:Environmental*. 164, 352–359.

Li, X.Z., Li, F.B., Fan, C.M., and Sun, Y.P. 2002. Enhancement of Photocatalytic Oxidation of Humic Acid in TiO_2 Suspensions by Increasing Cation Strength. *Chemosphere*. 48(4), 453–460.

Lin, Y.H., Chiu, T.C., Hsueh, H.T., and Chu, H. 2011. N–Doped TiO_2 Photo–Catalyst for the Degradation of 1,2–Dichloroethane under Fluorescent Light. *Applied Surface Science*. 258(4), 1581–1586.

Liu, C., Lei, Z., Yang, Y., and Zhang, Z. 2013. Preliminary Trial on Degradation of Waste Activated Sludge and Simultaneous Hydrogen Production in a Newly–Developed Solar Photocatalytic Reactor with AgX/TiO_2–Coated Glass Tubes. *Water Research*. 47(14), 4986–4992.

Liu, L. F., Zhang, P.H., and Yang, F.L. 2010. Adsorptive Removal of 2,4–DCP from Water by Fresh or Regenerated Chitosan/ACF/TiO_2 Membrane. *Separation and Purification Technology.* 70(3), 354–361.

Liu, Q., Wu, X., Wang, B., and Liu, Q. 2002. Preparation and Super–Hydrophilic Properties of TiO_2/SnO_2 Composite Thin Film. *Materials Research Bulletin*. 37(14), 2255–2262.

Liu, Z., Zhou,Y., Li, Z., Wang, Y., and Ge, C. 2007. Enhanced Photocatalytic Activity of (La, N) Co–Doped TiO_2 by $TiCl_4$ Sol–Gel Autoigniting Synthesis. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 14(6), 552–557.

Liuxue, Z., Xiulian, W., Peng, L., and Zhixing, S. 2008. Low Temperature Deposition of TiO_2 Thin on Polyvinyl Alcohol Fibers with Photocatalytical and Antibacterial Activities. *Applied Surface Science*. 254(6), 1771–1774.

Lonnen, J., Kilvington, S., Kehoe, S.C., Al–Touati, F., and McGuigan, K.G. 2005. Solar and Photocatalysis Disinfection of Protozoan, Fungal and Bacterial Microbes in Drinking Water. *Water Research*. 39(5), 877–883.

Mahalakshmi, M., Arabindoo, B., M., Palanichamy, and Murugesan, V. 2007. Photocatalytic Degradation of Carbofuran Using Semiconductor Oxides. *Journal of Hazardous Materials*. 143(1–2), 240–245.

Mamane, H., Horovitz. I., Lozzi, L., Camillo, D.D., and Avisar, D. 2014. The Role of Physical and Operational Parameters in Photocatalysis by N–Doped TiO_2 Sol–Gel Thin Films. *Chemical Engineering Journal*. 257, 159–169.

Meagher, E.P. and Lager, G.A. 1997. Polyhedral Thermal Expansion in the TiO_2. *The Canadian Mineralogist*. 17, 77.

Mehrjouei, M., Müller S., and Möller, D. 2013. Design and Characterization of a Multi–Phase Annular Falling–Film Reactor for Water Treatment Using Advanced Oxidation Processes. *Journal of Environmental Management*. 120, 68–74.

Mehrjouei, M., Müller, S., and Möller, D. 2014. Catalytic and Photocatalytic Ozonation of Tert–Butyl Alcohol in Water by Means of Falling Film Reactor: Kinetic and Cost–Effectiveness Study. *Chemical Engineering Journal*. 248, 184–190.

Michael, S. 2009. Metal Oxide Photocatalysis. http://photochemistryportal.net/home/index.php/2009/09/30/metal–oxide–photocatalysis/.(accessed August 7, 2014).

Myilsamy, M., Mahalakshmi, M., Murugesan, V., and Subha, N. 2015. Enhanced Photocatalytic Activity of Nitrogen and Indium Co–Doped Mesoporous TiO_2 Nanocomposites for the Degradation of 2,4–Dinitrophenol under Visible Light. *Applied Surface Science*. 342, 1–10.

Ollis, D.F., Pelizzetti, E., and Serpone, N. 1991. Photocatalyzed Destruction of Water Contaminants. *Environmental Science & Technology.* 25(9), 1522–1529.

Onodera, S., Siriwong, C., and Tabucanon, M. 1984. Comparison of Method for Determination of Trihalomethane in Dinking Water Detoxification. *Science and Social Thailand Journal.* 10, 221–237.

Paleologou, A., Marakas, H., Nikolaos, P., Moya, A., Vergara, Y., and Kalogerakis, N. 2007. Disinfection of Water and Wastewater by TiO_2 Photocatalysis, Sonolysis and U–VC Irradiation. *Catalysis Today*. 129, 136–142.

Park, E.J., Jeong, B., Jeong, M.G., and Kim, Y.D. 2014. Synergetic Effects of Hydrophilic Surface Modification and N–Doping for Visible Light Response on Photocatalytic Activity of TiO_2. *Current Applied Physics*. 14, 300–305.

Peill, N.J. and Hoffman, M.R. TiO_2–Coated Fiber Optic Cable Reactor. U.S. Patent 5,875,384, February 23, 1999.

Piscopo, A., Robert, D., Marzolin, C., and Weber, J.V. 2000. TiO_2 Supported on Glass Fiber for the Photocatalytic Degradation of Benzamide. *Journal of Materials Science Letters*. 19(8), 683–684.

Rao, A.R. and Dutta, V. 2007. Law–Temperature Synthesis of TiO_2 Nanoparticles and Preparation of TiO_2 Thin Films by Spray Deposition. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 91, 1075–1080.

Reutergardh, L.B. and Langphassuk, M. 1997. Photocatalytic Decolourization of Reactive Azo Dye: a Comparison Between TiO_2 and CdS Photocatalysis. *Chemosphere*. 35(3), 585–596.

Ruzimuradov, O., Sharipov, K., Yarbekov, A., Saidov, K., Hojamberdiev, M., Prasad, R.M., Cherkashinin, G., and Riedelc, R., 2015. A Facile Preparation of Dual–Phase Nitrogen–Doped TiO_2–$SrTiO_3$ Macroporous Monolithic Photocatalyst for Organic Dye Photodegradation under Visible Light. *Journal of the European Ceramic Society.* 35(6), 1815–1821.

Sa, J., Berger, T., Fottinger, K., Riss, A., Anderson, J.A., and Vinek, H. 2005. Can TiO_2 Promote the Reduction of Nitrates in Water?. *Journal of Catalysis.* 234(2), 282–291.

Stevenson, J.F., 1994. Humus Chemistry: Genisis, Composition, Reactions, 2nd ed, United states of America, 188–189

Sato, S. 1986. Photo Catalytic Activity of NO_x Doped TiO_2 in the Visible Region. *Chemical Physics Letters*. 123(1–2), 126–128.

Sayılkan, F., Asilturk , M., Tatar, P., Kiraz , N., Arpac, E., and Sayılkan, H. 2007. Photocatalytic Performance of Sn–Doped TiO_2 Nanostructured Mono and Double Layer Thin Films for Malachite Green Dye Degradation under UV and Visible–Lights. *Journal of Hazardous Materials*. 144, 140–146.

Senthilnathan, J. and Philip, L. 2010. Photocatalytic Degradation of Lindane under UV and Visible Light using N–Doped TiO_2. *Chemical Engineering Journal*. 161(1–2), 83–92.

Serpone, N. and Pelizzetti, E. 1989. Photocatalysis Fundamental and Application (Eds.), Wiley, New York.

Shaykhi, Z.M. and Zinatizadeh, A.A.L. 2014. Statistical Modeling of Photocatalytic Degradation of Synthetic Amoxicillin Wastewater (SAW) in an Immobilized TiO_2 Photocatalytic Reactor Using Response Surface Methodology (RSM). *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 45(4), 1717–1726.

Shifu, C. and Yunzhang, L. 2007. Study on the Photocatalytic Degradation of Glyphosate by TiO_2 Photocatalyst. *Chemosphere*. 67(5), 1010–1017.

Soares, G.B., Bravin, B., Vaz, C.M.P., and Ribeiro, C. 2011. Facile Synthesis of N–Doped TiO_2 Nanoparticles by a Modified Polymeric Precursor Method and Its Photocatalytic Properties. *Applied Catalysis B:Environmental*. 106(3–4), 287–294

Stafford, U., Gray, K.A., and Kamat, P.V. 1996. Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants : Halophenols and Related Model Compound. *Heterogen Chemical Reviews.* 3, 77–104.

Subrahmanyam, M., Boule, P., Durga Kumari, V., Naveen Kumar, D., Sancelme, M., and Rachel, A. 2008. Pumice Stone Supported Titanium Dioxide for Removal of Pathogen in Drinking Water and Recalcitrant in Wastewater. *Solar Energy*. 82(12), 1099–1106.

Sun, L., Cai, J., Wu, Q., Huang, P., Su, Y., and Lin, C. 2013. N–Doped TiO_2 Nanotube Array Photoelectrode for Visible–Light–Induced Photoelectrochemical and Photoelectrocatalytic Activities. *Electrochimica Acta*. 108, 525–531

Sun, D.D., Tay, J.H., and Tan, K.M. 2003. Photocatalytic Degradation of *E. coliform* in Water. *Water Rerearch*. 37(14), 3452–3462.

Tang, W.Z., Zhang, Z., An, H., Quintana, M.O., and Torres, D.F. 1997. Photodegradation of Azo Dyes in Aqueousnn Solution. *Enviromental Technology.* 18, 122.

Tinsley, I.J. 1979. Chemical Concept in Pollutant Behavior. New York : Wiley.

Tryba, B. 2008. Immobilization of TiO_2 and Fe–C–TiO_2 Photocatalysts on the Cotton Material for Application in a Flow Photocatalytic Reactor for Decomposition of Phenol in Water. *Journal of Hazardous Material*. 151(2–3), 623–627.

Tseng, J.M. and Huang, C.P. 1991. Removal of Chlorophenols from Water by Photocatalytic Oxidation. *Water Science Technology*. 23(1–3), 377–387.

U.S. EPA. 1995. Glyphosate, Office of water, National Primary Drinking Water Regulations, EPA 811–F–95–003, Washington, DC: US EPA. Available at : <http://http://www.epa.gov/safewater/pdfs/ factsheets/soc/tech/glyphosa.pdf.

U.S. EPA. 1998. Ambient Water Quality Criteria for 2,4–dichlorophenol, Office of water, Regulations and Standards Criteria and Standards Division, EPA 440–5–80–423, Washington, DC: US EPA. Available at : < 2001_10_12_criteria_ambientwqc_24dichlorophenol80/.

U.S. EPA. 1998. Consumer Factsheet on: Carbofuran, Office of water, Regulations and Standards Criteria and Standards Division, EPA 1563–66–2, Washington, DC: US EPA. Available at : < http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/historical/upload/Archived–Consumer–Factsheet–on–Carbofuran.pdf.

U.S. EPA. 2006. Stage 2 Disinfectants and Disinfection by Product Rule (Stage 2 DBP rule). http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/www.epa.gov/safewater/stage2/index.html.

Vaccari, D.A., Strom, P.F., and Alleman, J.E. 2005. Environmental Biology for Engineers and Scientists.

Venkatadri, R. and Peters, R.W. 2009. Chemical Oxidation Technologies:Ultraviolet Light/Hydrogen Peroxide, Fenton's Reagent, and Titanium Dioxide–Assisted Photocatalysis. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*. 2, 107–149.

Wang, Z.D. 1990. Spectroscopic and Structural Characterization of a Laurentian Fulvic Acid. Notes the Origin of the Colour. *Analytica Chimica Acta*. 232, 43–49.

Wang, H., Gao, X., Duan, G., Yang, X., and Liu, X. 2015. Facile Preparation of Anatase–Brookite–Rutile Mixed–Phase N–Doped TiO_2 with High Visible–Light Photocatalytic Activity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 3(2), 603–608.

Weber, WJ. and Vlient, B.M. 1981. Synthetic Absorbents and Activated Carbon for Water Treatment. *Journal American Water Works Association*. 73, 420–426.

Xiu, Z.B., Zhong, L.X., and Peng, W. 2007. Degradation of 2,4–Dichlorophenol with a Novel TiO_2/Ti–Fe–Graphite Felt Photoelectrocatalytic Oxidation Process. *Journal of Environmental Sciences.* 19(8), 1020–1024.

Xue, W., Zhang, G., Xu, X., Yang. X., Liu, C., and Xu, Y. 2011. Preparation of Titania Nanotubes Doped with Cerium and Their Photocatalytic Activity for Glyphosate. *Chemical Engineering Journal.* 167(1), 397–402.

Xuea, G., Liua, H., Chena, Q., Hills, C., Tyrerc, M., and Innocenta, F. 2010. Synergy Between Surface Adsorption and Photocatalysis During Degradation of Humic Acid on TiO_2/Activated Carbon Composites. *Journal of Hazardous Materials*. 186(1), 765–772.

Yang, D., Feng, W., Wu, G., Li, L., and Guan, N. 2011. Nitrate Hydrogenation on Pd–Cu/TiO_2 Catalyst Prepared by Photo–Deposition. *Catalysis Today.* 175(1), 356–361.

Yang, J., Li, D., Wang, X., Yang, X., and Lu, L. 2002. Rapid Synthesis of Nanocrystalline TiO_2/SnO_2 Binary Oxides and Their Photoinduced Decomposition of Methyl Orange. *Journal of Solid State Chemistry*. 165(1), 193–198.

Yang, J.K. and Lee, S.M. 2006. Removal of Cr(VI) and Humic Acid by Using TiO_2 Photocatalysis. *Chemosphere*. 63(10), 1677–1684.

You, Y.S., Chung, K.H., Kim, Y.M., Kim, J.H., and Seo, G. 2003. Deactivation and Regeneration of Titania Catalyst Supported on Glass Fiber in the Photocatalytic Degradation of Toluene. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 20(1), 58–64.

Yu, H., Lee, S.C., Yu, J., and Ao, C.H. 2006. Photocatalytic Activity of Dispersed TiO_2 Particles Deposited on Glass Fibers. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*. 246(1–2), 206–211.

Zeng, L., Song, W., Li, M., Jie, X., Zeng, D., and Xie, C. 2014. Comparative Study on the Visible Light Driven Photocatalytic Activity between Substitutional Nitrogen Doped and Interstitial Nitrogen Doped TiO_2. *Applied Catalysis A:General*. 488, 239–247.

Zhang, Q., Gao, L., and Guo, J. 2000. Effect of Hydrolysis Conditions on Morphology and Crystallization of Nanosized TiO_2 Powder. *Journal of the European Ceramic Society*. 20(12), 2153–2158.

Zhang, L., Peng, L., and Zhixing, S. 2006. Photocatalytic Anatase Thin Film Coated PAN Fiber Preparedat Low Temperature. *Materials Chemistry and Physics*. 98(1), 111–115.

Zhang, K., Wang, X., He, T., Guo, X., and Feng, Y. 2014. Preparation and Photocatalytic Activity of B–N Co–Doped Mesoporous TiO_2. *Powder Technology*. 253, 608–613.

Zhou, M., Yu, J., Liu, S., Zhai, P., and Jiang, L. 2007. Effects of Calcination Temperatures on Photocatalytic Activity of SnO_2/TiO_2 Composite Films Prepared by an EPD Method. *Journal of Hazardous Materials*. 154(1–3), 1141–1148.

Zhao, L., Han, M., and Lian, J. 2008. Photocatalytic Activity of TiO_2 Films With Mixed Anatase and Rutile Structures Prepared by Pulsed Laser Deposition. *Thin Solid Films*. 516(10), 3394–3398.

http://www.onlinemarket.com.au/whatisnew/photocatalyst/: (15/02/2558)

http://www.staff.aist.go.jp/.../english/itscgallary–e.htm:

(19/11/2558)http://believerwoman.wordpress.com/2007/08/01/what–is–hydrosyntetic–

photocatalyst:

(28/11/2557)

www.antonio.licciulli.unile.it: (10/01/2557)

http://phys.suwan.ac.kr/jgyoon/lab/solgel.ht; Brinker and Scherer, 1990: (1/01/2557)

http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.html: (11/01/2557)

http://photochemistryportal.net/home/index.php/2009/09/30/metal–oxide–photocatalysis:

(17/01/2558)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่รับแสงยูวีในเวลาต่างๆ กัน ความเข้มข้นของสารเคมีชนิดต่างๆ (C_0) และความเข้มข้นของสารเคมีชนิดต่างๆที่เวลาได้รับรังสียูวี (C)

ตารางที่ 23 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีที่เวลาต่างกัน ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	**C/C_0**			
	1 h	2 h	3 h	4 h
T	0.626	0.435	0.340	0.281
TS	0.590	0.369	0.255	0.197
TSN10	0.552	0.340	0.226	0.164
TSN20	0.465	0.254	0.154	0.105
TSN30	0.498	0.291	0.186	0.134
TSN40	0.610	0.397	0.279	0.231
TSN10	0.561	0.350	0.245	0.187
TSN20	0.552	0.328	0.226	0.157
TSN30	0.498	0.285	0.186	0.131
TSN40	0.466	0.244	0.154	0.096

ตารางที่ 24 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิคเมื่อได้รับรแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดฮิวมิคเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	**C/C_0**		
	2 h	4 h	6 h
T	0.679	0.488	0.356
TS	0.654	0.446	0.312
TSN10	0.549	0.385	0.198
TSN20	0.479	0.313	0.146
TSN30	0.532	0.352	0.167
TSN40	0.601	0.435	0.244
TSN10	0.631	0.357	0.232
TSN20	0.539	0.362	0.199
TSN30	0.504	0.323	0.148
TSN40	0.457	0.299	0.125

ตารางที่ 25 ความเข้มข้นของกรดฟัลวิคเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดฟัลวิคเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	**C/C_0**			
	1 h	2 h	3 h	4 h
T	0.758	0.543	0.379	0.289
TS	0.714	0.498	0.298	0.210
TSN10	0.643	0.371	0.216	0.155
TSN20	0.557	0.298	0.135	0.065
TSN30	0.598	0.347	0.168	0.103
TSN40	0.698	0.457	0.265	0.197
TSN10	0.654	0.387	0.229	0.168
TSN20	0.612	0.345	0.188	0.124
TSN30	0.579	0.303	0.146	0.088
TSN40	0.490	0.245	0.118	0.042

ตารางที่ 26 ความเข้มข้นของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 4 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	**C/C_0**					
	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h
T	0.888	0.814	0.758	0.706	0.617	0.572
TS	0.868	0.759	0.661	0.576	0.494	0.388
TSN10	0.847	0.666	0.539	0.435	0.309	0.235
TSN20	0.701	0.503	0.332	0.258	0.198	0.137
TSN30	0.803	0.619	0.495	0.387	0.257	0.194
TSN40	0.839	0.727	0.630	0.548	0.472	0.369
TSN10	0.876	0.663	0.552	0.451	0.345	0.274
TSN20	0.779	0.581	0.483	0.419	0.280	0.204
TSN30	0.735	0.535	0.422	0.296	0.223	0.191
TSN40	0.617	0.419	0.296	0.192	0.134	0.094

ตารางที่ 27 ความเข้มข้นของไกลโฟเสต เมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไกลโฟเสตเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ $1x10^{-4}$โมลาร์ โดยฟิล์มสูตรต่างๆ ทดสอบภายในเวลา 6 ชั่วโมง ของการรับแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	**C/C_0**		
	2 h	4 h	6 h
T	0.734	0.568	0.410
TS	0.699	0.499	0.354
TSN10	0.637	0.401	0.272
TSN20	0.564	0.317	0.161
TSN30	0.602	0.377	0.225
TSN40	0.665	0.432	0.310
TSN10	0.608	0.435	0.346
TSN20	0.565	0.385	0.299
TSN30	0.535	0.343	0.223
TSN40	0.467	0.252	0.156

ภาคผนวก ข. ตารางแสดงจำนวนเชื้อเฉลี่ยของแบคทีเรียที่รับแสงยูวีที่เวลาต่างกัน ของฟิล์มสูตรต่างๆ จำนวนเชื้อเริ่มต้น (N_0) เท่ากับ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และจำนวนเชื้อของแบคทีเรียที่เวลาต่างๆ (N)

ตารางที่ 28 ผลการฆ่าเชื้อ *S.typhi* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 15 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	**N/N_0**		
	5 min	10 min	15 min
Uncoated	0.93	0.72	0.45
T	0.23	0.06	0.03
TS	0.16	0.02	0.01
TSN20	0.06	0.01	0.00
TSP40	0.02	0.01	0.00

ตารางที่ 29 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และTSP40 ทดสอบภายในเวลา 30 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	**N/N_0**		
	10 min	20 min	30 min
Uncoated	0.55	0.36	0.30
T	0.35	0.17	0.08
TS	0.31	0.14	0.04
TSN20	0.22	0.11	0.02
TSP40	0.19	0.07	0.01

ตารางที่ 30 ผลการฆ่าเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยแก้วที่ไม่ได้เคลือบ ฟิล์ม T, TS, TSN20 และ TSP40 ทดสอบภายในเวลา 50 นาที ของการรับแสงยูวี เมื่อเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	**N/N_0**				
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
Uncoated	0.50	0.39	0.31	0.25	0.19
T	0.40	0.23	0.15	0.11	0.07
TS	0.32	0.18	0.11	0.08	0.03
TSN20	0.25	0.14	0.09	0.06	0.02
TSP40	0.22	0.11	0.05	0.02	0.01

ภาคผนวก ค. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของคาร์โบฟูรานและไนเตรต โดยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เวลาต่างกัน

ตารางที่ 31 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของคาร์โบฟูราน โดยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0= 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณถ่านกัมมันต์	**C/C_0**			
	2 h	4 h	6 h	8 h
2 กรัม	0.662	0.507	0.450	0.445
4 กรัม	0.594	0.412	0.367	0.362
6 กรัม	0.533	0.349	0.305	0.299
8 กรัม	0.472	0.272	0.238	0.227
10 กรัม	0.394	0.203	0.163	0.159

ตารางที่ 32 ผลการดูดซับคาร์โบฟูรานด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อสารละลายคาร์โบฟูราน 50 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์โบฟูราน (mg/L)	**C (mg/L)**			
	2 h	4 h	6 h	8 h
20	7.875	4.056	3.265	3.187
40	25.456	14.456	8.456	7.897
60	39.675	28.879	18.987	17.876
80	54.677	36.876	25.875	23.965
100	67.345	50.765	35.765	30.765

ตารางที่ 33 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของไนเตรต จากการดูดซับของถ่านกัมมันต์ปริมาณที่ต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง C_0=20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณถ่านกัมมันต์	**C/C_0**			
	2 h	4 h	6 h	8 h
2 กรัม	0.727	0.573	0.504	0.501
4 กรัม	0.639	0.495	0.424	0.403
6 กรัม	0.587	0.394	0.312	0.299
8 กรัม	0.517	0.317	0.264	0.249
10 กรัม	0.472	0.267	0.204	0.188

ตารางที่ 34 กราฟแสดงการดูดซับไนเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน ทดสอบภายในเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อสารละลายไนเตรต 50 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรต (mg/L)	**C (mg/L)**			
	2 h	4 h	6 h	8 h
20	9.432	5.345	4.087	3.754
40	28.766	16.087	10.986	9.345
60	41.765	28.765	21.766	19.765
80	60.544	42.767	29.654	27.765
100	78.554	56.786	43.766	40.544

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพีรวัส คงสง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5410130024

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Photocatalytic efficiency of N-doped $3SnO_2/TiO_2$ films coated on glass fiber substrate" RGJ Seminar Series XC Cutting Edge Technologies toward AEC 2015, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Thailand, 7 September 2012.

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Photocatalytic degradation of humic acid using Fe^{3+} and N-doped $3SnO_2/TiO_2$ thin films coated on glass fibers" International Conference on Traditional and Advanced Ceramics (ICTA2013), BITEC, Bangkok, Thailand, 11-13 September 2013.

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Photocatalytic degradation of 2,4-DCP in water by N-doped $3SnO_2/TiO_2$ thin film coated glass fibers" RGJ-Ph.D. Congress XV, Jomtien Palm Beach Hotel & Resort, Pattaya, Chonburi, Thailand, 28-30 May 2014.

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Photocatalytic degradation of humic acid using Fe^{3+} and N-doped $3SnO_2/TiO_2$ thin films coated on glass fibers". *Key Engineering Materials*. Vol. 608 (2014) pp 164-169.

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Photocatalytic antibacterial performance of glass fibers thin film coated with N-doped SnO_2/TiO_2". *Scientific World Journal*. Vol. 2014 (2014) pp 1-9.

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Photocatalytic degradation of glyphosate in water by N-doped SnO_2/TiO_2 thin-film-coated glass fibers". *Photochemistry and Photobiology*. Vol. 90 (2014) pp 1243-1250.

-Peerawas Kongsong, Lek Sikong, Sutham Niyomwas, and Vishnu Rachpech "Enhanced photocatalytic degradation of fulvic acid using N–doped SnO_2/TiO_2 thin film coated glass fibers under UV and solar light irradiation for drinking water purification" *Applied Mechanics and Materials*.(accepted).