



รายงานการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งด้วยกระบวนการ
โฟโตคะตะไลซิส
(Study of disinfection efficiency in treated wastewater by
photocatalysis process)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งด้วยกระบวนการ
โฟโตคะตะไลซิส

(Study of disinfection efficiency in treated wastewater by
photocatalysis process)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายณฤตล สายใจอุป

ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2561

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ คุณมานพ จรโคกกรวด คุณสินีนานู นอกกระโทก (เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ) ขอขอบคุณ คุณนารี กลิ่นกลาง (เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ผู้วิจัย

กันยายน 2561



บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโน (TiO₂ nanotubes) ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคแอโนดไอซ์เซชัน (anodization) การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้แอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (Sb₂S₃) ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตอบสนองต่อแสงวิชิเบิลหลังการปรับปรุงแล้ว และจะถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM พบว่า ทั้งไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (TiO₂/Sb₂S₃) มีลักษณะพื้นผิวเห็นเป็นท่อชัดเจน อย่างไรก็ตามการใช้โหมด EDX ในเทคนิค XRF พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/Sb₂S₃ มีธาตุของ Sb และ S กระจายอยู่ทั่วผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณธาตุ Sb และ S จะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการโฟโตเดโพสิชัน สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบผลึกแบบอนาเทสของไททาเนียมไดออกไซด์ และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกคริสตัลของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ การใช้เทคนิค UV-VIS (DRS) พบว่า เส้นการดูดกลืนแสงของ TiO₂/Sb₂S₃ ตอบสนองต่อช่วงแสงวิชิเบิลได้มากกว่า TiO₂ แต่การดูดกลืนแสงของทั้งสองตัวอย่างจะใกล้เคียงกันตั้งแต่หลังจากระยะเวลาการโฟโตเดโพสิชันที่ 15 นาที ดังนั้นในการศึกษาต่อไปตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/Sb₂S₃ ที่ใช้เวลาการโฟโตเดโพสิชันที่ 15 นาที จะถูกนำไปศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ผลการศึกษาพบว่า ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ TiO₂/Sb₂S₃ จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า TiO₂ ทั้งในการศึกษากับเชื้อ *E. coli* และ *Fecal Streptococcus* ในการศึกษาพื้นที่ผิวของ TiO₂/Sb₂S₃ ในช่วง 0- 75 ตารางเซนติเมตรต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรค พบว่ายังมีปริมาณของพื้นที่ผิวมากประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (*E. coli*) ในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่าน TiO₂/Sb₂S₃ ในช่วง 130 -500 มิลลิลิตร/นาที พบว่ายิ่งใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้นประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า TiO₂/Sb₂S₃ สามารถใช้ได้เป็นระยะเวลานานและใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีการหลุดของตัวเร่งปฏิกิริยาและยังคงรักษาสมรรถนะในการฆ่าเชื้อโรคได้ดี การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่า k_p เท่ากับ 2.5×10^5 เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที และ K_L เท่ากับ 1.4×10^{-21} เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที

Abstract

This research aims to study the modification of titanium dioxide nanotube photocatalyst which was synthesized by anodization technique. The catalyst modification was conducted by using antimony trisulfide (Sb_2S_3) via photodeposition process. The visible light responsive photocatalyst was expected after modification and using as photocatalyst in the water disinfection study by photocatalysis process. The FE-SEM analyzer shows that both of TiO_2 and $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ clearly formed nanotube on the surface. However, when using the EDX mode in XRF technique found that, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ catalysts have Sb and S elements scattered throughout the catalyst surface. The number of Sb and S elements increased with the times in the photodeposition process. For XRD analysis found that the anatase phase structure of titanium dioxide was obtained and crystallinity structure of antimony trisulfide was occurred. The UV-VIS (DRS) technique shown that the absorption spectra of $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ response to the visible region more than bare TiO_2 , but the spectra were close together after 15 minutes photodeposition. So in the next experiment, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 15 minutes used on water disinfection by photocatalysis. The results show that, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ shows better disinfection efficacy more than bare TiO_2 for both *E. coli* bacteria and *Fecal Streptococcus* bacteria. The effect of catalyst surface areas in the range of 0-75 cm^2 on the disinfection efficiency found that, the higher surface area of $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ lead to the higher disinfection efficacy of the photocatalysis process. For the effect of water flow rate over the $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ in the range of 130-500 ml/min on the disinfection efficiency found that at the higher flow rate shows the higher disinfection efficiency. From catalysts stabilities study found that $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ could be used for a long time and can be reuse in several times without damages of the catalyst and still keep good disinfection performances. The study on the kinetics of water disinfection by photocatalysis process using the Langmuir-Hinshelwood equation found that k_r was 2.5×10^5 cell/100 ml-min and K_L was 1.4×10^{-21} cell/100 ml-min.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญเรื่อง.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาแผนงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
2 ปรัชศัณวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ประเภทของน้ำเสีย.....	3
2.1.1 น้ำเสียจากแหล่งชุมชน.....	3
2.1.2 น้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม.....	5
2.1.3 น้ำเสียจากแหล่งเกษตรกรรม.....	5
2.2 ระบบการบำบัดน้ำเสีย.....	6
2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ.....	6
2.2.2 กระบวนการทางเคมี.....	6
2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ.....	7
2.3 วิธีการบำบัดน้ำเสีย.....	7
2.3.1 การบำบัดก่อนขั้นต้น.....	7
2.3.2 การบำบัดขั้นต้น.....	7
2.3.3 การบำบัดขั้นที่สอง.....	7
2.3.4 การบำบัดขั้นที่สาม.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 โรคที่เกิดจากน้ำเป็นสื่อ.....	8
2.5 การตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย.....	8
2.5.1 โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด.....	9
2.5.2 ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย.....	9
2.5.3 ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย.....	10
2.6 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย.....	11
2.6.1 วิธี Serial dilution.....	11
2.6.2 วิธี Spread plate.....	12
2.6.3 วิธี Pour plate.....	13
2.6.4 การวัดความขุ่นของเซลล์.....	13
2.6.5 เทคนิคการตรวจหาจุลินทรีย์ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น.....	13
2.6.6 การตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มโดยวิธีเยื่อกรอง.....	14
2.6.6.1 การตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม.....	15
2.6.6.2 การตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม.....	15
2.7 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	16
2.7.1 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยวิธีทางกล.....	16
2.7.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการให้ความร้อน.....	16
2.7.2.1 การพาสเจอร์ไรซ์.....	16
2.7.2.2 การต้ม.....	17
2.7.2.3 การกลั่น.....	17
2.7.3 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการใช้แสง.....	17
2.7.3.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	17
2.7.3.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอาทิตย์.....	17
2.7.4 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยการใช้โอโซน.....	18
2.7.5 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน.....	19
2.7.5.1 ชนิดของสารคลอรีน.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.5.2	ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ.....	20
2.7.5.3	ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน.....	21
2.8	กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	22
2.8.1	หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	23
2.8.1.1	การเกาะหรือดูดติดผิว.....	23
2.8.1.2	การฉายแสง.....	23
2.8.2	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.8.2.1	โลหะทรานซิชัน.....	23
2.8.2.2	โลหะกึ่งตัวนำ.....	23
2.8.3	โครงสร้างของวัสดุกึ่งตัวนำ.....	24
2.8.4	กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	25
2.8.5	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	26
2.8.5.1	ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.8.5.2	พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.8.5.3	ค่าพีเอช.....	26
2.8.5.4	ความเข้มของแสง.....	26
2.8.5.5	ถังปฏิกิริยา.....	27
2.8.5.6	อุณหภูมิ.....	27
2.8.5.7	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ.....	27
2.8.6	พลังงานแสงสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	27
2.9	ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	29
2.9.1	ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียม.....	29
2.9.2	ลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	29
2.9.3	การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	30
2.9.4	การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ตอบสนองต่อแสงวิชิเบล.....	33
2.9.5	การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9.5.1	ผงไทเทเนียม.....	34
2.9.5.2	ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	35
2.9.5.3	ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	35
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.10.1	การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน.....	36
2.10.2	การฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	37
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1	การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
3.2	การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์.....	44
3.2.1	การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
3.2.2	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
3.2.3	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
3.2.4	การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงยูวีเอและแสงวิซิเบิล.....	45
3.3	ถังปฏิกิริยาสำหรับใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	45
3.4	การเตรียมน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.4.1	การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของเชื้อแบคทีเรียกับความหนาแน่นของเซลล์.....	46
3.4.2	การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i>	46
3.4.3	การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย <i>Fecal Streptococcus</i>	46
3.5	การศึกษากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	47
3.5.1	การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	47
3.5.2	การศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	48
3.5.3	การศึกษาอัตราการไหลของน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	48
3.5.4	การศึกษากการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	49
3.5.4.1	การศึกษากการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที.....	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.4.2	การศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	51
3.5.5	การศึกษาผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>Fecal Streptococcus</i>) ในน้ำ.....	52
4	ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการทดลอง.....	53
4.1	ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53
4.1.1	ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53
4.1.1.1	ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	53
4.1.1.2	ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	58
4.1.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	64
4.1.3	ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	65
4.1.4	ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	67
4.2	การออกแบบถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	69
4.3	ผลของการเตรียมน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง.....	76
4.3.1	ผลของการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม.....	76
4.3.2	ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่า O.D. กับปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย.....	76
4.4	ผลการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	77
4.4.1	ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	80
4.4.1.1	ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	80

สารบัญ (ต่อ)

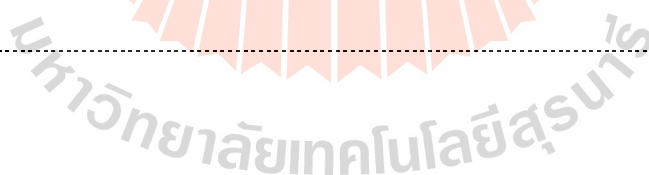
หน้า

4.4.1.2	ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	83
4.4.2	ผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	87
4.4.3	ผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	89
4.4.3.1	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	89
4.4.3.2	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	91
4.4.4	ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	94
4.4.4.1	ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300นาที่.....	94
4.4.4.2	ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	96
4.4.5	ผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>Fecal Streptococcus</i>) ในน้ำ.....	96
4.5	ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	98
4.6	กลไกการฆ่าเชื้อโรคของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	102
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	104
5.1.1	สรุปผลการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา.....	104

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2	สรุปผลการศึกษาศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	105
5.1.3	สรุปผลการศึกษาศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมได ออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนี-ไตรซัลไฟด์.....	106
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	107
5.2.1	การนำไปใช้ประโยชน์.....	107
5.2.2	ประเด็นที่ควรทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป.....	108
	รายการอ้างอิง.....	109
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	119
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลการคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะไม่มีแสง ไม่มีแผ่น.....	221
	ภาคผนวก ค. ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	224
	ภาคผนวก ง. การคำนวณทางสถิติ.....	238
	ประวัติผู้เขียน.....	245



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบน้ำเสียจากแหล่งชุมชน.....	4
2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรประเภท ก และ ข.....	6
2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย.....	10
2.4 อัตราส่วนระหว่าง Fecal Coliform Bacteria : Fecal Streptococcus Bacteria.....	11
2.5 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด.....	15
2.6 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาฟีคัลโคลิฟอร์ม.....	16
2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียด้วยวิธีทางกล.....	16
2.8 ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตซี ที่กำจัดจุลินทรีย์ได้ ประสิทธิภาพ 1 log และ 2 log.....	18
2.9 ช่วงเวลาการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย.....	18
2.10 ปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคชนิดต่าง ๆ.....	22
2.11 ตำแหน่งช่องว่างพลังงาน และขนาดช่องว่างพลังงานของโลหะกึ่งตัวนำชนิดต่าง.....	24
2.12 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต.....	27
3.1 สภาวะการทดลองการศึกษามลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูบที่อนุภาคนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	47
3.2 สภาวะการทดลองการศึกษามลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	48
3.3 สภาวะการทดลองการศึกษามลของอัตราการไหลของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	49
3.4 สภาวะการทดลองการศึกษามลของผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลาหนึ่ง.....	50
3.5 สภาวะการทดลองการศึกษามลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	51
3.6 สภาวะการทดลองการศึกษามลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	52
4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูบที่อนุภาคนาโนจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM.....	56
4.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูบที่อนุภาคนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.3 ตำแหน่งของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	62
4.4 ปริมาณของธาตุ Ti, O, Sb and S ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	65
4.5 ตัวอย่างการคำนวณการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลวนครบ 1 รอบ.....	75
4.6 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์แบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่แตกต่างกัน.....	100



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการ Serial dilution.....	12
2.2 ขั้นตอนการ Spread plate.....	12
2.3 ขั้นตอนการ Pour plate.....	13
2.4 สัดส่วนของ HOCl และ OCl ⁻ ในน้ำที่พีเอชต่าง ๆ.....	20
2.5 ค่าช่องว่างของพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ.....	24
2.6 การเกิดอิเล็กตรอน (e ⁻) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h ⁺) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	25
2.7 ความยาวคลื่นของแสง.....	28
2.8 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม.....	30
2.9 เซลล์โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นออกไซด์.....	31
2.10 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน.....	31
2.11 การพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อนาโน.....	33
2.12 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงในวัสดุ TiO ₂ /CdS.....	34
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	40
3.2 การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	41
3.3 ลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	42
3.4 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน.....	42
3.5 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	43
3.6 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบการฆ่าเชื้อโรค.....	45
4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition).....	64
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่เกิดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD).....	66
4.3 การดูกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	68
4.4 งานวิจัยที่เลือกใช้เทคนิค DRS ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป.....	69
4.5 แบบแปลนพร้อมขนาดของการออกแบบถังปฏิกิริยา.....	72
4.6 การไหลวนของน้ำในถังปฏิกิริยา.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	74
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของจำนวนแบคทีเรียกับความยาวคลื่น.....	76
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับจำนวนแบคทีเรีย.....	77
4.10 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>E.coli</i> ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและ ฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1.....	78
4.11 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>E.coli</i> ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและ ฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 2.....	79
4.12 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>E.coli</i> ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและ ฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3.....	79
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการ ตอบสนองของแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	80
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการ ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	81
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย <i>E.coli</i> กับระยะเวลาของการตอบสนองต่อ แสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	82
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการ ตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	83
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการ ตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	84
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย <i>E.coli</i> กับระยะเวลาของการตอบสนองต่อ แสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลา กับพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	87
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	88
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่ กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล.....	89
4.22 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล.....	90
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่ กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ.....	91
4.24 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ.....	92
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่ กับระยะเวลาของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที.....	94
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที.....	95
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่ กับเวลาของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 3 ครั้ง.....	96
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>Fecal Streptococcus</i> ที่คงเหลืออยู่ กับระยะเวลาของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค.....	97
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย <i>Fecal Streptococcus</i> กับเวลาของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	98
4.30 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกัน.....	99
4.31 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order).....	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$	101
4.33 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

น้ำเสียเกิดขึ้นจากการชำระล้างในครัวเรือน สถานที่ราชการ บริษัทเอกชน และแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่มีความสำคัญมากๆ คือน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม สถานประกอบการที่เป็นต้นกำเนิดน้ำเสียมีหน้าที่ที่จะต้องบำบัดน้ำเสีย หรือควบคุมให้น้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบบำบัดน้ำเสียมีความสกปรกไม่เกินมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด อีกทั้งในบางสถานประกอบการ น้ำเสียชุมชน และน้ำเสียจากโรงพยาบาลต่างๆ ซึ่งน้ำเสียมักปนเปื้อนเชื้อโรคต่างๆ มากมาย ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีใช้อยู่เป็นเพียงระบบบำบัดความสกปรกขั้นพื้นฐาน เพื่อกำจัดสารแขวนลอยในน้ำและสารอินทรีย์ให้ลดลงให้ได้ตามมาตรฐาน แต่น้ำที่ผ่านระบบบำบัดมากแล้ว ยังมีเชื้อโรคปะปนอยู่ ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการฆ่าเชื้อโรคเสียก่อน เพื่อให้มั่นใจในระดับหนึ่งว่าน้ำทิ้งที่ปล่อยออกไปไม่เป็นต้นเหตุของการแพร่เชื้อโรคลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะและไม่ทำลายระบบนิเวศของแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะที่นิยมใช้ในปัจจุบันในประเทศไทยคือกระบวนการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน รูปของคลอรีนที่นิยมใช้มีทั้งแบบก๊าซคลอรีน คลอรีนผง และคลอรีนน้ำ คลอรีนฆ่าเชื้อโรคโดยการทำลายเอนไซม์ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเจริญเติบโตของเซลล์สิ่งมีชีวิต คลอรีนยังสามารถกำจัดสาหร่าย ตะไคร่น้ำ ตลอดจนจรส กลิ่น และสีของน้ำด้วย การเติมคลอรีนในน้ำต้องให้มีเวลาสัมผัส 20 – 30 นาที เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ดี และต้องมีการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ซึ่งควรอยู่ระหว่าง 0.5 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่อย่างไรก็ตามในการฆ่าเชื้อโรคด้วยการเติมคลอรีน สามารถก่อให้เกิดสารไตรแฮโลมีเทน (Trihalomethans, THM) หรือกรดแฮโลอาซิติก (Haloacetic acids, HAAs) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสารอินทรีย์ในน้ำ สารเหล่านี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (Nieuwenhuijsen et al., 2000) ที่ยังมีผลต่อความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอดบุตร การไหลเวียนของโลหิต และส่งผลต่ออวัยวะภายในร่างกาย (WHO, 2000) อีกทั้งปัญหาการส่งเชื้อสารเคมีมาเก็บไว้ การดูแลรักษาโรงเรือนเก็บสารเคมี การเตรียมสารเคมีก่อนจ่ายคลอรีนเข้าสู่ระบบซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ทักษะของผู้มีความรู้และความชำนาญในการเตรียมสารเคมี ดังนั้นผู้วิจัยซึ่งมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสอยู่แล้วจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มาทดแทนกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำแทนการใช้คลอรีนแบบดั้งเดิมซึ่งจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

1.2 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำแทนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน
- 2) เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนให้ตอบสนองต่อแสง visible ให้มากขึ้น
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
- 4) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลผ่านของน้ำบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลา และแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

1.3 ขอบเขตของแผนงานวิจัย

1. โฟโตคะตะไลซิส ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง คือตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่มีการสังเคราะห์ขึ้นเองด้วยเทคนิคการแอโนไดซ์เซชัน และจะมีการปรับปรุงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสงวิชิเบิลตามวิธีการของ Zhong et al., (2015)
2. น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำที่เตรียมขึ้นโดยให้มีเชื้อแบคทีเรียที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งแบคทีเรียที่จะใช้ในการทดสอบเป็นแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia Coli (E.coli)* และ แบคทีเรียแกรมบวก *Fecal Streptococcus*
3. พลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอ ที่มีความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร ขนาด 10 วัตต์ และแสงวิชิเบิล ที่มีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 -760 นาโนเมตร ขนาด 10 วัตต์
4. ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ คือ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา และ แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน คือ แสงยูวี และแสงวิชิเบิล 2) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 3) อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา และ 4) การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติสามารถตอบสนองต่อแสงวิชิเบิลได้
2. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
3. ได้ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา แหล่งกำเนิดแสง พื้นที่ผิว อัตราการไหลผ่านของน้ำบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันประชากรในประเทศไทยและทั่วโลกเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาคือ ปัญหาน้ำเสีย ซึ่งตามมาตรา 4 ใน พ.ร.บ. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมปี พ.ศ. 2535 ได้ให้นิยามของน้ำเสีย หมายถึงของเสียที่อยู่ในสถานะเป็นของเหลวรวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวทำให้ออกให้เกิดภาวะมลพิษทางน้ำ ปัญหาน้ำเสียในแหล่งน้ำที่สำคัญของประเทศต่าง ๆ กำลังทวีความรุนแรงมากขึ้นโดยเฉพาะแหล่งน้ำที่อยู่บริเวณแหล่งชุมชน โรงพยาบาล รวมทั้งแหล่งอุตสาหกรรมและแหล่งเกษตรกรรม ทั้งนี้เพราะของเสียส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ จะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัดน้ำเสีย และเมื่อปริมาณการปล่อยของเสียหรือน้ำเสียจากแหล่งชุมชน โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม การเกษตร มีปริมาณเกินกว่าที่แหล่งน้ำจะสามารถปรับสภาพตามธรรมชาติ หรือทำความสะอาดด้วยตนเอง (Self-purification) ได้แล้ว จะทำให้ระบบนิเวศในแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนกลายเป็นแม่น้ำลำคลองที่เน่าเสีย วิธีการบำบัดน้ำเสีย จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดการเกิดภาวะมลพิษน้ำดังกล่าว เพราะการบำบัดน้ำเสียมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ข้อ คือ (1) เพื่อป้องกันการเกิดภาวะมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำและแหล่งธรรมชาติ (2) เพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของโรคทางน้ำชนิดต่าง ๆ เพราะในน้ำเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากแหล่งชุมชน โรงพยาบาล มักจะมีเชื้อโรคปนเปื้อนอยู่หลายชนิด

ประเทศไทยได้มีมาตรการต่าง ๆ ที่จะช่วยลดภาวะมลพิษทางน้ำโดยการให้ความรู้และตระหนักถึงปัญหาและความร่วมมือแก้ไขปัญหาอย่างจริงจังจึงร่วมกับการใช้มาตรการทางกฎหมายเพื่อช่วยแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำให้ประสบผลสำเร็จ จึงเริ่มมีการจัดการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ในปี พ.ศ. 2545 ได้มีพระราชบัญญัติปรับปรุงกระทรวงทบวงกรม โดยกำหนดให้กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มีหน้าที่ในการจัดให้มีระบบบำบัดน้ำเสียในเขตพื้นที่การจัดการน้ำเสียรวมทั้งบริการหรือกิจกรรมต่อเนื่องที่เกี่ยวกับการจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย 4 ขั้นตอนคือ ระบบบำบัดก่อนขั้นต้น ระบบบำบัดขั้นต้น ระบบบำบัดขั้นที่สอง และระบบบำบัดขั้นที่สาม

2.1 ประเภทของน้ำเสีย

2.1.1 น้ำเสียจากแหล่งชุมชน (Domestic wastewater)

น้ำเสียจากแหล่งชุมชน คือ น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากแหล่งชุมชนแหล่งที่พักอาศัย บ้านเรือน ร้านค้า ตลาด โรงแรม ที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น ขำระล้างร่างกาย ประกอบอาหาร ซักเสื้อผ้า และการขับถ่าย ซึ่งมักประกอบด้วยสารปนเปื้อนส่วนใหญ่คือสารอินทรีย์ต่าง ๆ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากอาศัยปะปนอยู่ด้วย เช่น ไวรัส โปรโตซัว และแบคทีเรียที่ก่อโรค จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากแหล่งชุมชน ถ้าเทียบปริมาณน้ำเสียทั้งหมด คิดเป็น 75%

ซึ่งคำนวณจากความสกปรกหรือสารปนเปื้อนในรูป บีโอดี หรือประมาณวันละ 200,000 กิโลกรัมต่อวัน (เกรียงศักดิ์, 2540)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบน้ำเสียจากแหล่งชุมชน (เกรียงศักดิ์, 2540)

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น	หน่วย	กรัม/คน/วัน
BOD ₅	110-400	มิลลิกรัม/ลิตร	80-120
COD	250-1000	มิลลิกรัม/ลิตร	-
TOC	80-290	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Total solids	350-1200	มิลลิกรัม/ลิตร	170-220
Total Suspended Solids	100-350	มิลลิกรัม/ลิตร	40-145
Settleable solids	5-20	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Total nitrogen as N	50-150	มิลลิกรัม/ลิตร	10-30
Organic nitrogen	20-85	มิลลิกรัม/ลิตร	6-12
Total phosphorus as P	4-15	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Organic phosphorus	1-5	มิลลิกรัม/ลิตร	0.6-4.5
Inorganic phosphorus	3-10	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Chlorides as CaCO ₃	30-50	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Sulfates as Cl	15-30	มิลลิกรัม/ลิตร	4-8
Nitrate as NO ₃	20-40	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Phosphates as PO ₄	20-40	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Sodium as Na	40-70	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Potassium as K	7-15	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Calcium as CaCO ₃	15-40	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Magnesium as CaCO ₃	15-40	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Total dissolved solid	100-300	มิลลิกรัม/ลิตร	-
Bacteria	10 ⁹ -10 ¹⁰	จำนวน/100 มิลลิลิตร	-
Coliform	10 ⁶ -10 ⁹	จำนวน/100 มิลลิลิตร	-
Fecal streptococcco	10 ⁵ -10 ⁶	จำนวน/100 มิลลิลิตร	-
Salmonella typhosa	10 ¹ -10 ⁴	จำนวน/100 มิลลิลิตร	-
Virus	10 ² -10 ⁴	จำนวน/100 มิลลิลิตร	-

2.1.2 น้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม (Industrial wastewater)

คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ หรือกระบวนการที่ใช้ เช่น (1) น้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ จะมีการใช้สีในกระบวนการฟอกย้อม โดยสีย้อมอะโซจะเป็นตัวที่ได้รับความนิยมมากที่สุด น้ำเสียจากโรงงานแห่งนี้จึงพบสีย้อมอะโซเป็นส่วนใหญ่ (2) น้ำเสียโรงงานถ่านโค้ก จะประกอบด้วยสารที่ย่อยสลายได้ยากหลากหลายชนิดในความเข้มข้นสูง เช่น ฟีนอล ไทโอไซยานेट ซัลไฟด์ ฟลูออรีน ไพริน พีแนนรีน เป็นต้น (3) น้ำเสียจากโรงงานหมักกากน้ำตาลและโรงผลิตอาหารทะเล จะมีปริมาณของซัลเฟตปะปนอยู่กับน้ำเสียในปริมาณสูง ดังนั้นน้ำเสียที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมแต่ละประเภทต้องผ่านการบำบัดที่ถูกต้องและเหมาะสม เพื่อเป็นการป้องกันการปนเปื้อนของมลสารต่าง ๆ สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะมีข้อบังคับของโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้กำหนดว่า น้ำเสียที่ปล่อยออกสู่แหล่งสาธารณะจะต้องมีค่าความสกปรกไม่เกินตามที่กฎหมายกำหนด เช่น ความสกปรกในรูปของ บีโอดีจะต้องไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น

2.1.3 น้ำเสียจากแหล่งเกษตรกรรม (Agricultural wastewater)

น้ำเสียจากแหล่งเกษตรกรรมมีมากมายหลายชนิด เช่น น้ำเสียจากแหล่งเพาะปลูก ฟาร์มสุกร เป็ด ไก่ โค กระบือ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นสารปนเปื้อนที่พบในน้ำเสียจากแหล่งนี้ ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยปุ๋ยเคมี ยาปราบศัตรูพืชและมูลสัตว์ น้ำเสียจากเกษตรกรรมจะไม่มีท่อขนส่งเหมือนกับน้ำเสียจากแหล่งอื่น ๆ จึงเรียกน้ำเสียแบบนี้ว่า non-point source หรือปริมาณน้ำเสียที่ไม่สามารถบ่งบอกแหล่งที่มาได้อย่างชัดเจน ซึ่งจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ (1) แบบที่ไม่มีการบำบัดแต่จะปล่อยผ่านไปสู่อ่างน้ำโดยตรง มีน้ำเสียจากเกษตรกรรมหลายชนิดที่ถูกปล่อยลงสู่อ่างน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัดก่อน (2) แบบที่ผ่านการบำบัด เป็นการใช้กฎหมายการควบคุมการปล่อยน้ำเสียจากกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่มีปริมาณค่าบีโอดีสูง มีเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก มีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนที่จะระบายสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งบังคับใช้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 โดยแบ่งเป็นฟาร์มขนาดใหญ่ที่มีสุกรมากกว่า 5000 ตัวขึ้นไปจะใช้ มาตรฐานประเภท ก และ ฟาร์มขนาดกลางที่มีสุกรอยู่ในช่วง 500-5000 ตัว จะใช้มาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ข ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรประเภท ก และ ข (วนิช, 2544)

ข้อมูล	มาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ก	มาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ข
pH	5.5 - 9	5.5 - 9
BOD	60	100
COD	300	400
TS	150	200
TKN Nitrogen	120	200

2.2 ระบบการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึงการกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าน้ำเสียจะมีแหล่งที่มาแตกต่างกัน ซึ่งน้ำเสียแต่ละแหล่งก็จะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 กระบวนการดังนี้

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

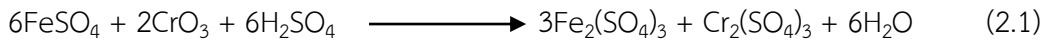
กระบวนการทางกายภาพเป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำ วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) ลดลงประมาณ 20-30% ซึ่งในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระดาษ การดักด้วยตะแกรงจึงนิยมใช้เป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วงซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ เป็นต้น

2.2.2 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่าง ๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-ด่างที่ปนเปื้อนอยู่ ด้วยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับสารนั้น ๆ วิธีนี้มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูงและเมื่อเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียแล้วอาจทำให้เกิดสารตัวใหม่ที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ ยกตัวอย่างเช่น

2.2.2.1) การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นกลุ่ม โดยทั่วไปสารแขวนลอยจะมีประจุเป็นประจุลบ สารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจวบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน สารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอน เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เฟอร์ริกคลอไรด์หรือเฟอร์ริกซัลเฟต ($FeCl_3$, $FeSO_4$) เป็นต้น

2.2.2.2) การเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี (chemical oxidation-reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับและให้อิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วย เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการที่ 2.1



2.2.2.3) การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก เป็นต้น

2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยาเป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้ต้องเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย โดยแบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) (เกรียงศักดิ์, 2547)

2.3 วิธีการบำบัดน้ำเสีย

โดยทั่วไปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียจะแบ่งการบำบัดน้ำเสียแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

2.3.1 การบำบัดก่อนขั้นต้น (preliminary treatment) เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำ เช่น การใช้ตะแกรง (Screens) เป็นต้น

2.3.2 การบำบัดขั้นต้น (primary treatment) น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนจากข้อที่ 2.3.1 แล้ว จะถูกนำมาตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่ง เรียกว่า primary sludge การบำบัดในขั้นนี้จะลดค่า BOD ได้ประมาณ 25 -40% ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

2.3.3 การบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) น้ำเสียจากข้อ 2.3.2 จะผ่านเข้าสู่ถังเติมอากาศซึ่งในถังเติมอากาศก็จะมีจุลินทรีย์อยู่ แบคทีเรียแบบใช้อากาศจะช่วยย่อยสลายและกำจัดสารอินทรีย์หรือค่า BOD ออกไปจากน้ำ เมื่อปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้นสามารถกำจัดออกได้ ในขั้นตอนนี้จะช่วยลดค่า BOD ลงได้ประมาณ 75-95% ซึ่งค่า BOD ของน้ำในขั้นตอนนี้จะต่ำกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำได้แต่ถ้าต้องการความสะอาดเหมาะแก่การนำกลับมาใช้ใหม่ก็จะเข้าสู่การบำบัดขั้นที่ 3 ต่อไป

2.3.4 การบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) จะใช้สำหรับเมื่อต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์สะอาดหรือสามารถนำกลับมาใช้อุปโภคและบริโภคได้ ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ

(ion-exchange) กระบวนการดูดติดผิว (adsorption) และ กระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination) กระบวนการบำบัดนี้จะใช้น้ำจากการบำบัดในขั้นตอนที่สอง มาผ่านกระบวนการกำจัดสารอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคต่าง ๆ ที่ยังหลงเหลือจากการบำบัด การบำบัด ก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม (เกรียงศักดิ์, 2540)

2.4 โรคที่เกิดจากน้ำเป็นสื่อ (Water- Borne Diseases)

น้ำสามารถเป็นสื่อหรือตัวกลางนำเอาสิ่งสกปรกหรือเชื้อโรคมารัฐมนุษย์ได้ โรคต่าง ๆ ที่มักเกิดขึ้นจะเป็นโรคของโรคระบาดทางเดินอาหารอันเนื่องมาจากการดื่มหรือรับประทานน้ำที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนเข้าไป จากการรายงานของ United Nations Conference on Environment and Development (UNCED, 1992) พบว่า ประมาณร้อยละ 80 ของการเกิดโรค และกว่า 1 ใน 3 ของการตายในประเทศกำลังพัฒนา ล้วนมีสาเหตุมาจากน้ำ (Water associated) ทั้งสิ้นและเมื่อพบว่ามีผู้ป่วยเกิดขึ้นในชุมชน ก็มักจะเกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคได้ง่าย และอาจแพร่กระจายไปสู่ชุมชนอื่นได้ด้วย สำหรับโรคที่มีน้ำเป็นสื่อกลางที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์นั้น ส่วนใหญ่มักเป็นเชื้อแบคทีเรีย (Bacterial infection) ซึ่งเชื้อแบคทีเรียจะแบ่งตามลักษณะของเชื้อโรคหรือสิ่งที่ทำให้เกิดอาการของโรคได้ดังนี้

2.4.1 เชื้อแบคทีเรีย *Vibrio cholera* (Vibrio cholera) ทำให้เกิดโรค อหิวาต์กโรค (Cholera) เชื้อ *Vibrio cholera* พบในอุจจาระของผู้ป่วย หรือผู้เป็นพาหะของโรค การได้รับเชื้อเกิดจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อเข้าไป ผู้ป่วยมักจะมีอาการหลังจากการดื่มน้ำที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนเข้าไปภายใน 2-3 ชั่วโมง อาการที่พบคือ อุจจาระร่วงอย่างรุนแรง มีไข้ อาเจียน หดสติ และอาจถึงตายได้

2.4.2 เชื้อแบคทีเรีย *Shigella* spp. ทำให้เกิดโรคบิด (Bacillary dysentery) หรือที่เรียกว่า โรคบิดไม่มีตัว เชื้อ *Shigella* พบในอุจจาระของผู้ป่วย หรือผู้เป็นพาหะของโรค การได้รับเชื้อเกิดจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อเข้าไป ผู้ป่วยมักจะมีอาการหลังจากการดื่มน้ำที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนเข้าไปภายใน 1-7 วัน อาการที่พบคือ มีไข้ ท้องเดิน ปวดถ่วง อุจจาระมีมูกเลือดปนออกมาด้วย

2.4.3 เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhi* (salmonella typhi) ทำให้เกิดโรคไข้ไทฟอยด์ (Typhoid fever) หรือ โรคไข้รากสาดน้อย เชื้อ *Salmonella typhi* พบในอุจจาระของผู้ป่วย หรือผู้เป็นพาหะของโรค การได้รับเชื้อเกิดจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อเข้าไป ผู้ป่วยมักจะมีอาการหลังจากการดื่มน้ำที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนเข้าไปภายใน 7- 21 วัน อาการที่พบคือ มีไข้ติดต่อกันทุกวัน มีจุดแดงขึ้นตามตัว มีอาการท้องผูกสลับท้องเสีย ปวดท้อง ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลียและเบื่ออาหาร (ถาวร , 2559)

2.5 การตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย

การตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย เป็นดัชนีที่จะบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำ เนื่องจากมีแบคทีเรียหลายชนิดที่ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร เช่น ไทฟอยด์ บิด และอหิวาห์ ซึ่งสามารถตรวจพบได้ในอุจจาระ เมื่อถูกขับถ่ายปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะถูกแพร่กระจายไปโดยมีน้ำเป็นสื่อ และ

จะมีผลกระทบต่อสุขภาพของคนที่ใช้ในแหล่งน้ำนั้น ดังนั้นในการตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรียวิทยา สามารถทำได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยการตรวจสอบทางตรง จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและปริมาณของแบคทีเรียที่เป็นอันตราย (Pathogens) ต่าง ๆ ในน้ำ ซึ่งอาจต้องใช้เวลานาน ยุ่งยาก และสิ้นเปลือง ส่วนการตรวจวิเคราะห์ทางอ้อมจะเป็นการตรวจวิเคราะห์แบคทีเรียที่เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำ (Indicator Bacterial) เช่น โคลิฟอร์มแบคทีเรีย ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย และฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยแบคทีเรียเหล่านี้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำดังนี้ (วีรชัย, 2530)

- (1) สามารถตรวจวัดแบคทีเรียที่เป็นดัชนีได้ทุกครั้งที่ตรวจพบแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรค โดยเฉพาะโรคติดต่อระบบทางเดินอาหาร
- (2) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องตรวจพบว่ามีปริมาณมากกว่า และมีความทนทานในสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียที่เป็นเชื้อโรค
- (3) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องขึ้นในอาหารที่เตรียมได้ง่าย ให้ผลการทดสอบที่ชัดเจน สามารถตรวจสอบได้ง่าย และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในตัวอย่างที่นำมาทดสอบ
- (4) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีควรจะเจริญได้ดีโดยไม่ขึ้นอยู่กับเครื่องมือของจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ
- (5) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีควรจะตรวจพบได้ก่อนที่จะก่อให้เกิดอันตราย

2.5.1 โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (Total Coliform Bacteria)

โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดคือกลุ่มของแบคทีเรีย แกรมลบ (gram negative bacteria) มีรูปร่างเป็นท่อน (rod shape) ไม่สร้างสปอร์ (non spore forming) แบคทีเรียกลุ่มนี้ พบได้ทั่วไปในดิน พืช น้ำ อากาศ และในลำไส้ของคนและสัตว์เลือดอุ่น แบคทีเรียชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีอากาศ (aerobic) และในสภาพที่มีอากาศและไม่มีอากาศ (facultative anaerobic) สามารถย่อยสลายน้ำตาลแลคโตส (lactose) ให้เกิดกรดและก๊าซ ได้ที่อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส ภายใน 48 ชั่วโมง ไม่ทนความร้อน สามารถทำลายได้ง่ายด้วยความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) ไม่ผลิตเอนไซม์ออกซิเดส (oxidase negative) แบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรียประกอบด้วย (1) *Escherichia group (genus) type species* ได้แก่ *E. coli* (2) *Citrobacter group (genus) type species* ได้แก่ *Citrobacter freundii* (3) *Klebsiella group (genus) type species* ได้แก่ *Klebsiella pneumonia* และ (4) *Enterobacter group (genus) type species* ได้แก่ *E. aerogenes* เป็นต้น

2.5.2 ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Fecal Coliform Bacteria)

ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียมีถิ่นอาศัยในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์และสัตว์ และจะมีการปนเปื้อนออกมากับอุจจาระเสมอ แบคทีเรียชนิดนี้สามารถหมักย่อยน้ำตาลแลคโตสที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ในเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้แก่ *Escherichia coli (E.coli)* ซึ่ง *E. coli* จะพบในอุจจาระของมนุษย์ปกติประมาณ 10^8 เซลล์ต่อกรัม แต่ในกรณีที่เป็นโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร แบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคก็จะปนออกมากับอุจจาระ ดังนั้นถ้าตรวจพบ *E.coli* ในแหล่งน้ำแสดงว่ามีการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น และอาจมีโอกาสดำรงอันตรายจากแบคทีเรีย

ที่ทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารด้วย นอกจากนี้การพบ *E.coli* ยังแสดงให้เห็นว่ามีการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายใหม่ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของ *E.coli* เกิดขึ้นได้ยากและสามารถมีชีวิตอยู่ได้นานประมาณ 8 สัปดาห์เท่านั้น สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการใช้โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย เป็นพารามิเตอร์หนึ่งในมาตรฐานแหล่งน้ำดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย

ประเภทของมาตรฐาน	ฟีคัลโคลิฟอร์ม MPN/100 มิลลิตร		โคลิฟอร์มทั้งหมด MPN/100 มิลลิตร		ที่มา
	แหล่งน้ำประเภท 2	แหล่งน้ำประเภท 3	แหล่งน้ำประเภท 2	แหล่งน้ำประเภท 3	
มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	ไม่เกิน 1000	ไม่เกิน 4000	ไม่เกิน 5000	ไม่เกิน 20000	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8, 2537
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา	ตรวจไม่พบ		การประปาส่วนภูมิภาค	กรมอนามัย	เกียรติกู้, 2557
			ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ตรวจไม่พบ		น้อยกว่า 2.2		ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ, 2551
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ตรวจไม่พบ		เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 2.2		ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332, 2521
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ตรวจไม่พบ		เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 2.2		ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61, 2524

2.5.3 ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย (*Fecal Streptococcus Bacteria*)

ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ที่มีรูปร่างกลมต่อกันเป็นโซ่ ไม่สร้างสปอร์ สามารถย่อยสลายน้ำตาลให้กรดแลคติกเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่ให้ก๊าซ เป็นแบคทีเรียที่มีแหล่งกำเนิดมาจากอุจจาระของสัตว์เลือดอุ่นเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการตรวจพบแบคทีเรียพวกนี้แสดงว่ามีการปนเปื้อนของอุจจาระ (American Public Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 1992) ซึ่งสาเหตุที่ใช้ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำ เนื่องจากฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียจะไม่เพิ่มจำนวนเมื่ออยู่ในน้ำและปริมาณที่พบจะมีความสัมพันธ์กับ *E.coli* แต่สามารถมีชีวิตอยู่ได้นานกว่า และ Cohen (1973) ได้ศึกษาการมีชีวิตอยู่ของฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย และฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสีย แม่น้ำที่เกิดมลพิษ ทะเลสาบ และแหล่งน้ำดื่มในกรุงเยรูซาเลม ประเทศอิสราเอล พบว่า ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียจะมีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมของน้ำตามธรรมชาติมากกว่าแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ ทำให้

มีชีวิตรอดในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ การตรวจหาปริมาณของฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียนอกจากจะแสดงการถูกปนเปื้อนและแหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนจากอุจจาระของสัตว์เลือดอุ่นแล้วยังช่วยสนับสนุนการ ตรวจหาปริมาณของโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วย

นอกจากนี้อัตราส่วนของฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย *Fecal Coliform Bacteria* ต่อฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย สามารถบอกแหล่งที่มาของการปนเปื้อนได้ว่ามาจากมนุษย์หรือสัตว์เลือดอุ่นได้ เพราะสิ่งขับถ่ายของมนุษย์จะมีฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียมากกว่าฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย แต่ในทางตรงกันข้าม สิ่งขับถ่ายจากสัตว์จะมีปริมาณฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียมากกว่าฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Kjellander, 1960) ซึ่งวีระชัย (2530) ได้กล่าวถึงอัตราส่วนระหว่าง *Fecal Coliform Bacteria : Fecal Streptococcus Bacteria* ในการบอกแหล่งที่มาของการปนเปื้อน โดยสามารถบอกได้ว่าต้นกำเนิดของการปนเปื้อนเกิดจากสิ่งมีชีวิตประเภทใด ถ้าหากอัตราส่วนระหว่าง *Fecal Coliform Bacteria : Fecal Streptococcus Bacteria* มากกว่า 4.4 แสดงว่าเกิดการปนเปื้อนของสิ่งขับถ่ายจากมนุษย์ ถ้าหากอัตราส่วน *Fecal Coliform Bacteria* ต่อ *Fecal Streptococcus Bacteria* น้อยกว่า 0.7 แสดงว่าต้นกำเนิดการปนเปื้อนไม่ได้เกิดจากมนุษย์แต่มาจากสัตว์เลือดอุ่นอื่น ๆ และถ้ามีค่าระหว่าง 0.7 ถึง 4.4 แสดงว่าต้นกำเนิดการปนเปื้อนเกิดจากมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่นอื่น ๆ รวมกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนระหว่าง *Fecal Coliform Bacteria : Fecal Streptococcus Bacteria* (วีระชัย, 2530)

<i>Fecal Coliform Bacteria: Fecal Streptococcus Bacteria</i>	ต้นกำเนิดการปนเปื้อน
4.4	มนุษย์
0.6	เปิด
0.4	แกะ หมู ไก่
0.2	วัว
0.1	ไก่ทอง

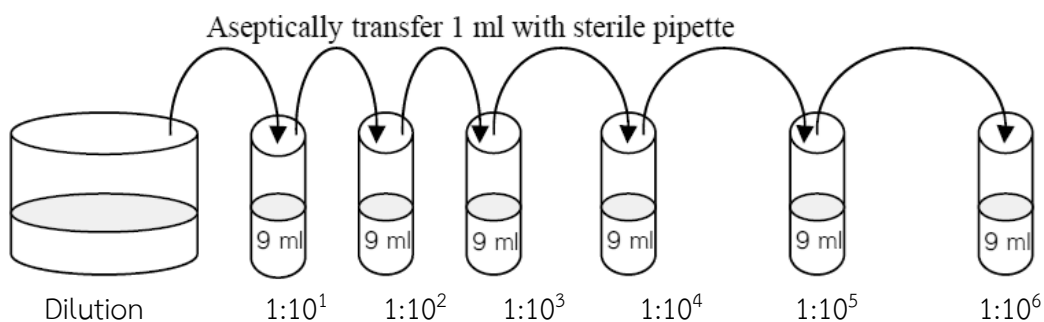
2.6 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย

ในการตรวจนับจำนวนแบคทีเรียจากตัวอย่างของวัสดุหรือสารละลายแบคทีเรีนั่นเจริญหรือปนเปื้อนอยู่สามารถกระทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.6.1 วิธี Serial dilution

วิธี Serial dilution เป็นการเจือจางน้ำตัวอย่างด้วย phosphate buffer หรือ peptone water ที่บรรจุอยู่ในหลอดทดลองปริมาณ 9 มิลลิลิตร ซึ่งการ Dilute จะเริ่มจากการปิเปตน้ำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ใส่ลงใน peptone water ปริมาตร 9 มิลลิลิตร หลอดที่ 1 เขย่าให้เข้ากัน หลอดนี้จะมีความเจือจาง 1:10 ใช้ปิเปตอันใหม่ดูดน้ำตัวอย่างจากหลอดที่ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่ลงไป

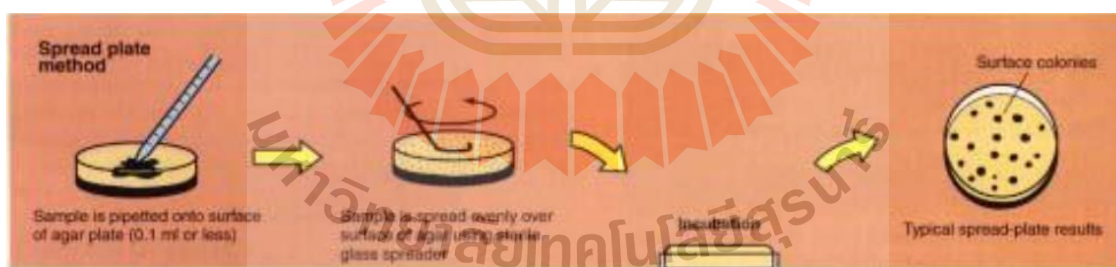
peptone water หลอดที่ 2 เขย่าให้เข้ากัน หลอดนี้จะมีความเจือจาง $1:10^2$ ทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ความเจือจางของน้ำเท่ากับความต้องการ เช่น $1:10^5$ และ $1:10^6$ (ซีนจิตต์, 2554) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการ Serial dilution (นงลักษณ์, 2541)

2.6.2 วิธี Spread plate

วิธี Spread plate เป็นการนับจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เริ่มจากการเทอาหารแข็งลงในจานอาหารที่ปลอดเชื้อและทิ้งไว้ให้อาหารแข็งตัว หลังจากนั้น ปิเปต 0.1 มิลลิลิตร จากหลอดความเจือจางที่เลือก เช่น เลือกความเจือจางที่ $1:10^4$ $1:10^5$ และ $1:10^6$ ลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ เกือบอาหารแข็งเป็นวงกลมด้วย sterile spreader ปล่อยให้แห้งและนำไปบ่มเชื้อ ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเชื้อเจริญเติบโตเป็นโคโลนีให้เห็นใน Plate ที่มี 30 – 300 โคโลนี สามารถคำนวณจำนวนแบคทีเรียในน้ำตัวอย่าง โดยการคูณจำนวนโคโลนีที่นับได้ด้วย 10 และ Dilution factor ค่าที่คำนวณได้จะมีหน่วยเป็น Colony forming unit/ml หรือ CFU/ml (ซีนจิตต์, 2554)



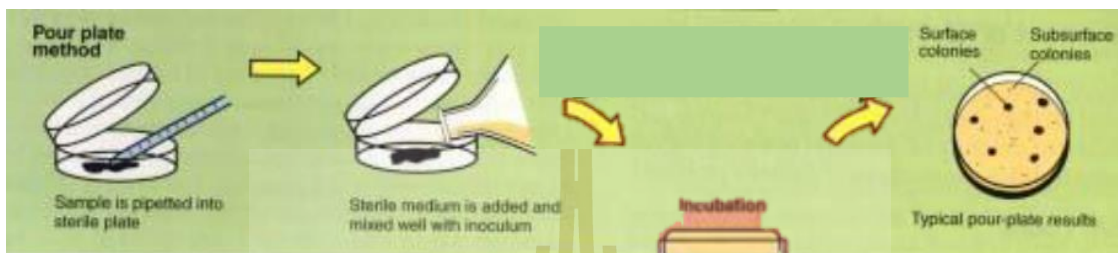
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการ Spread plate (Madigan et al., 2003)

การคำนวณปริมาณจุลินทรีย์ (ซีนจิตต์, 2554)

จำนวนเซลล์ที่นับได้	= X	เซลล์
บันทึกความเจือจางที่ได้	= $1:10^A$	
ในความเจือจางที่ $1/10^A$ เท่า 1 มิลลิลิตร จะมีจุลินทรีย์	= X	เซลล์
(1 เท่า 1 มิลลิลิตร)	= (X) (10^A)	เซลล์
ในน้ำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตรจะมีแบคทีเรีย	= (X) (10^A)	เซลล์

2.6.3 วิธี Pour plate

วิธี Pour plate เป็นวิธีที่ผสมแบคทีเรียลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งและเทส่วนผสมนี้ลงใน Plate พร้อมกัน โดยเริ่มจากการปิเปต 1 มิลลิลิตรจากหลอดความเจือจางที่เลือก ปล่อยลงในจานที่ปลอดเชื้อ และจะเทอาหารแข็งตามลงไป แล้วทำการผสมให้เข้ากันโดยหมุนจานอาหารเป็นวงกลมซ้ำ ๆ ทิ้งให้อาหารแข็งตัว จึงนำไปบ่มเชื้อ ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเชื้อเจริญเติบโตเป็นโคโลนีให้เห็นใน Plate ที่มี 30 – 300 โคโลนี สามารถคำนวณจำนวนแบคทีเรียคล้ายกับวิธี Spread plate (ชินจิตต์, 2554)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการ Pour plate (Madigan et al., 2003)

2.6.4 การวัดความขุ่นของเซลล์ Optical density (O.D.)

การวัดความขุ่นของเซลล์ที่เจริญเติบโตอยู่ในอาหารเหลว ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยอ่านค่าออกมาเป็น Absorbance หรือ ความขุ่น Optical density (O.D.) เป็นการวัดทางกายภาพ (Physical method) วิธีนี้อาศัยหลักการหักเหของแสง เมื่อส่องไปถูกเซลล์ของแบคทีเรีย ความยาวคลื่นแสงที่สามารถวัดได้ คือ 400 และ 600 นาโนเมตร แต่ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรจะมีปัญหาเกี่ยวกับสีของอาหารเลี้ยงเชื้อ Rich medium ที่จะถูก Adsorb เข้าไปด้วย แต่ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรจะไม่เจอปัญหาดังกล่าว สำหรับวิธีการวัดความหนาแน่นของเซลล์ด้วยการวัดความขุ่นนี้มีข้อจำกัดที่ การวัดค่า Absorbance แต่ละครั้ง ไม่ควรเกิน 0.7 เพราะแบคทีเรียที่หนาแน่นเกินไป จะทำให้แสงที่ถูกหักเหออกไปแล้วถูกหักเหกลับมาอีกครั้ง ทำให้ค่า Absorbance ที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง และการวัดด้วยวิธีนี้จะเป็นการวัดทั้งเซลล์ที่มีชีวิตและเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (วัฒนาลัย, 2554)

2.6.5 เทคนิคการตรวจหาจุลินทรีย์ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น (Most probable number MPN Technique)

วิธีเอ็มพีเอ็นเป็นวิธีการประเมินจำนวนจุลินทรีย์ที่เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปรากฏให้เห็นจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและทางเคมีของอาหารโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ค่า MPN เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนจุลินทรีย์ที่ใช้หลักการทางสถิติ และประเมินจุลินทรีย์เฉพาะชนิด ซึ่งต้องการอาหารเลี้ยงเชื้อที่จำเพาะต่อชนิดของจุลินทรีย์ที่จะแสดงผลให้เห็นได้ชัดเจน วิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานของการวิเคราะห์น้ำ โดยตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งในน้ำดื่ม น้ำใช้และน้ำทิ้งทั่วไป การตรวจวิเคราะห์แบคทีเรียโคลิฟอร์มโดยวิธี MPN ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1) การตรวจสอบขั้นแรก (Presumptive test) เป็นการเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยใช้อาหารเหลวซึ่งมีน้ำตาล lactose ทิ้งไว้ 24-48 ชั่วโมงที่ 35 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบว่า

แบคทีเรียฟอร์เมนน้ำตาลแล้วเกิดกรดก๊าซหรือไม่ ถ้าไม่มีแสดงว่าน้ำนั้นไม่มีโคลิฟอร์มแต่ถ้ามีก๊าซขึ้นสันนิษฐานว่ามีโคลิฟอร์ม ซึ่งแสดงการประเมินเป็นผลบวก

2) การตรวจสอบขั้นยืนยัน (Confirmed test) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำหลอดอาหารที่ให้ผลบวกในขั้นตอนแรกมาทำการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังว่าเป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดและก๊าซขึ้น เป็นแบคทีเรียโคลิฟอร์ม โดยนำแบคทีเรียในอาหารมาเลี้ยงบนอาหารแข็ง ซึ่งจะใช้อาหาร Eosin Methylene Blue Agar โคโลนีของ *E.coli* ที่เจริญอยู่บนอาหารดังกล่าวจะมีสีดำและผิวของโคโลนีจะมีสีเขียวคล้ำยรอยต่อของขึ้นโลหะ ส่วนโคโลนีของ *Enterobacter aerogenes* จะมีสีชมพูแดง ลักษณะค่อนข้างเยิ้ม เป็นเมือก ไม่มี metallic sheen

3) การตรวจสอบขั้นสมบูรณ์ (Completed test) เป็นการทดสอบขั้นสุดท้าย เพื่อให้สรุปให้แน่ใจว่าจุลินทรีย์ที่ตรวจพบในขั้นตอนข้างต้นเป็นจุลินทรีย์โคลิฟอร์ม โดยนำจุลินทรีย์จากขั้นตอนยืนยันมาทำการเลี้ยงในอาหารเหลวที่มี lactose อีกครั้งเพื่อดูการเกิดกรดและก๊าซอีกครั้งในอาหารและเขี่ยเชื่อมาลากบนอาหารวุ้นเอียงใน 24 ชั่วโมง และโคโลนีจากอาหารวุ้นเอียงมาย้อมสีแกรม ถ้าได้ผลแกรมลบ รูปท่อน ไม่มีสปอร์ และอาหารเลี้ยงเชื้อ lactose มีก๊าซเกิดขึ้น แสดงว่ามีโคลิฟอร์มในน้ำตัวอย่างแน่นอน (สุรสิทธิ์, 2540)

การย้อมสีแกรมคือ การย้อมสีแบคทีเรียสำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียด้วยกล้องจุลทรรศน์เนื่องจาก เซลล์แบคทีเรียมีคุณสมบัติเป็น semitransparent ซึ่งแสงสามารถผ่านได้ ทำให้เห็นเซลล์ของแบคทีเรียได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการย้อมสีแบคทีเรียเพื่อให้เห็นโครงสร้างและขนาดของแบคทีเรียได้ชัดเจนยิ่งขึ้น หลักการของการย้อมสีแบบมากกว่าหนึ่งชนิด (Differential staining) คือการทำให้สีย้อมติดส่วนต่างๆ ของเซลล์อย่างเช่น การย้อมสีแบบแกรม (Gram staining) กลไกของการติดสีแกรมของแบคทีเรียจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์ ในแบคทีเรียแกรมลบจะมีสารพวกไขมันที่ผนังเซลล์มากกว่าของแบคทีเรียแกรมบวก และยังมีชั้นของผนังเซลล์บางกว่าด้วย ในกระบวนการย้อมสี เมื่อล้างด้วยแอลกอฮอล์จะไปละลายไขมันทำให้รูของผนังเซลล์เปิดกว้าง จึงทำให้สารโมเลกุลใหญ่ของสียคริสตัลไวโอเลต-ไอโอดีนคอมเพล็กซ์หลุดออกมา เมื่อย้อมสีซาฟรานินจึงติดสีแดงของซาฟรานิน แต่ในแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งมีไขมันน้อยกว่าและมีความซับซ้อนขององค์ประกอบที่ผนังเซลล์น้อยกว่า เมื่อล้างด้วยแอลกอฮอล์เซลล์จะเหี่ยว เพราะเกิดการสูญเสียน้ำ เยื่อหุ้มเซลล์มีรูขนาดเล็กกลวง สารประกอบโมเลกุลใหญ่ของสียจึงละลายออกมาไม่ได้ เซลล์ยังคงติดสีม่วงของคริสตัลไวโอเลต เมื่อย้อมทับด้วยซาฟรานินจึงย้อมไม่ติดสีแดง (สุรสิทธิ์, 2536)

2.6.6 การตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มโดยวิธีเยื่อกรอง (Membrane-filter technique)

วิธีเยื่อกรองเป็นวิธีมาตรฐานอีกวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำทางชีววิทยา และวิธีนี้สามารถใช้ได้และตรวจนับแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (*total coliform bacteria*) และฟีคัลโคลิฟอร์ม (*fecal coliform bacteria*) ได้โดยตรง ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้ทดสอบกับน้ำปริมาณมากได้ ใช้กับอาหารเลี้ยงเชื้อได้หลายชนิด เพื่อแยกความแตกต่างหรือคัดเลือกเฉพาะให้จุลินทรีย์บางชนิดเจริญ อีกทั้งยังที่ให้ผลแน่นอนและรวดเร็วกว่าวิธี MPN การตรวจสอบโดยวิธีเยื่อกรองนี้จะอาศัยหลักการกรองโดยใช้เยื่อกรอง

หรือเมมเบรน ที่เมมเบรนที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตท (cellulose nitrate) ที่มีรูขนาดเล็กมากที่ได้ (pore size 0.45 ไมโครเมตร) แบทที่เรียที่มีขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าขนาดรูของเมมเบรนจึงลอดผ่านไม่ได้ ติดค้างอยู่บนเมมเบรน โดยใช้ชุดเครื่องกรองที่สเตอไรซ์แล้ว เมื่อกรองน้ำผ่านแบทที่เรียจะติดอยู่บนเยื่อกรอง แล้วจึงบีบเยื่อกรองไปวางบนแผ่นกระดาษที่อ้อมตัวไปด้วยอาการเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสม เช่น M-Endo medium, M-FC medium หรือวางบนอาหารวุ้นในจานเพาะเชื้อ บ่มเชื้อไว้ และสังเกตลักษณะของโคโลนีที่เกิดขึ้นบนเยื่อกรอง (นงลักษณ์,2541)

2.6.6.1 การตรวจนับจำนวนแบทที่เรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (total coliform bacteria) ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองจะขึ้นอยู่กับจำนวนแบทที่เรียที่อยู่ในน้ำ ถ้าคิดว่าน้ำที่นำมาตรวจมีจำนวนแบทที่เรียมากจะใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำน้อย ควรเจือจางให้ได้ปริมาณน้ำให้ได้ 20 มิลลิลิตร จำนวนโคโลนีของแบทที่เรียทั้งหมดที่ตรวจพบบนเยื่อกรองควรอยู่ในช่วง 50-200 โคโลนีต่อเยื่อกรอง โดยใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างโดยคาดคะเนตามตาราง 2.6 ลักษณะของโคโลนีที่เจริญบนเยื่อกรอง (อาหารเลี้ยงเชื้อ M- Endo medium) หลังจากบ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีลักษณะเป็นสีชมพูจนถึงแดงเข้ม

ตารางที่ 2.5 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาแบทที่เรียโคลิฟอร์มทั้งหมด

ชนิดของน้ำตัวอย่าง	ปริมาตรที่ใช้กรอง (มิลลิลิตร)							
	100	50	10	10	0.1	0.01	0.001	0.0001
น้ำดื่ม	√							
น้ำประปา			√	√	√			
น้ำในแม่น้ำ				√	√	√	√	
น้ำที่ผ่านการเติมคลอรีน				√	√	√		
น้ำที่มาจากแหล่งชุมชน					√	√	√	√

2.6.6.2 การตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม (fecal coliforms) ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองขึ้นอยู่กับจำนวนแบทที่เรียที่มีอยู่ในน้ำเช่นกัน จำนวนโคโลนีของฟีคัลโคลิฟอร์มที่ตรวจพบบนเยื่อกรองควรมีค่าอยู่ในช่วง 20-80 โคโลนีต่อเยื่อกรอง โดยให้ใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำโดยคาดคะเนตามตารางที่ 2.7 ลักษณะของโคโลนีที่เจริญบนเยื่อกรอง (อาหารเลี้ยงเชื้อ M- FC medium) หลังจากบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง และ 34.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีลักษณะเป็นสีน้ำเงิน

ตารางที่ 2.6 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาฟิซิลโคลิฟอร์ม

ชนิดของน้ำตัวอย่าง	ปริมาตรที่ใช้กรอง (มิลลิลิตร)						
	100	50	10	1	0.1	0.01	0.001
น้ำดื่ม	√						
น้ำประปา				√	√	√	
น้ำในแม่น้ำ				√	√	√	√
น้ำที่ผ่านการเติมคลอรีน			√	√	√		
น้ำที่มาจากแหล่งชุมชน					√	√	√

2.7 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (Disinfection)

การฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะมีอยู่ 2 วิธี คือ Disinfection และ Sterilization โดย วิธี Sterilization หมายถึง การทำลายจุลินทรีย์ทุกชนิดที่อยู่ในน้ำ หรือเรียกว่าเป็นการฆ่าเชื้อโดยสมบูรณ์ วิธีการนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความสะอาดมาก เช่น ทางด้านการแพทย์ แตกต่างกับวิธี Disinfection เป็นการทำลายจุลินทรีย์ในน้ำที่เป็นต้นเหตุของโรคต่าง ๆ เท่านั้น วิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำแบบ Disinfection นิยมใช้สำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียและมียังวิธีที่หลากหลายขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและความต้องการคุณภาพของน้ำ รวมถึงมาตรฐานหรือกฎหมายที่กำหนดไว้ เป็นต้น

2.7.1 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยวิธีทางกล

วิธีทางกลที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น ตะแกรงดักขยะ ถังดักตะกอนหนัก และถังตกตะกอนทั่วไป วิธีการเหล่านี้สามารถกำจัดจุลินทรีย์ออกไปได้แต่ประสิทธิภาพไม่สูงนัก (เกรียงศักดิ์ ,2547) ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียด้วยวิธีทางกล (เกรียงศักดิ์ ,2547)

วิธีทางกล	ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย (ร้อยละ)
1) ตะแกรงหยาบ	0-5
2) ตะแกรงละเอียด	10-20
3) ถังกำจัดตะกอนหนัก	10-25
4) ถังตกตะกอนทั่วไป	25-75

2.7.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการให้ความร้อน

2.7.2.1. การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) โดยใช้ความร้อนต่ำ (ประมาณ 70 องศาเซลเซียส) ในการฆ่าเชื้อโรคทั้งแบคทีเรียและไวรัสที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ปนเนบื้อนมากับน้ำ โดยวิธีการนี้จะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก

2.7.2.2 การต้ม (Boiling) เป็นวิธีที่นิยมใช้มาตั้งแต่โบราณแต่มีข้อจำกัดคือ จะสามารถทำลายได้เฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ที่ปะปนมากับน้ำเท่านั้น แต่จะไม่สามารถทำให้คุณสมบัติทางด้านกายภาพและด้านเคมีของน้ำเปลี่ยนไป ดังนั้นน้ำที่นำมาต้มจะต้องมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม หรือได้มาตรฐานเพียงพอแต่ต้องการความร้อนมาทำลายคุณสมบัติทางด้านชีวภาพที่ไม่ดี สำหรับการต้มน้ำเพื่อทำลายเชื้อโรคจะต้องใช้ความร้อนสูงจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และปล่อยให้ น้ำเดือดต่อไปอีก 15 นาที จะสามารถทำลายเชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำตลอดจนสปอร์ของเชื้อต่าง ๆ ได้หมด วิธีนี้จะเหมาะกับการผลิตน้ำอืดนม ผลิตนม ไม่เหมาะกับการนำน้ำเสียมาผ่านความร้อน

2.7.2.3 การกลั่น (Distillation) เป็นวิธีที่สามารถฆ่าเชื้อโรคและสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีได้ เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณไม่มาก และมีความเป็นพิษมาก แต่วิธีนี้ต้องลงทุนสูงมากกว่าวิธีอื่น ดังนั้นการกลั่นจึงนิยมใช้อยู่ในวงจำกัด เช่น วงการแพทย์ หรืองานเฉพาะกิจบางอย่างเท่านั้น (เกรียงศักดิ์ ,2547)

2.7.3 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการใช้แสง

2.7.3.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นวิธีการฆ่าเชื้อโรคทางกายภาพวิธีหนึ่ง โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำพบว่าไม่ก่อให้เกิดสารพลอยได้ที่เป็นพิษ และสารก่อมะเร็ง ไม่ทำให้เกิดโรค และกลั่น (นันทพร, 2547) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้หลอดคาโทดไอปรอทความดันต่ำและใช้ความยาวคลื่น 200 ถึง 310 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของ UV-C แต่ความยาวคลื่นที่ดีที่สุดสำหรับการฆ่าเชื้อโรคคือ 253.7 นาโนเมตร สำหรับปฏิกิริยาของแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ โดยจะเข้าไปทำลายกรดนิวคลีอิกตรงส่วนโครงสร้างใน DNA และ RNA ซึ่งเป็นส่วนประกอบในสารพันธุกรรมที่ใช้ในการขยายพันธุ์ การเข้าทำลายเชื้อจุลินทรีย์ของแสงอัลตราไวโอเล็ตจะกระทำต่อโมเลกุลของ Pyrimidine โดยเฉพาะ Cytosine Thymine Uracil ทำให้โมเลกุลของ Pyrimidine สร้างพันธะต่อกัน ทำให้การแบ่งตัวของกรดนิวคลีอิกยากขึ้น และทำลายเกลียวไม่ให้เกิดการแบ่งตัว ซึ่งทำให้เกิดการกลายพันธุ์และตายในที่สุด (McGuigan et al.,2006) โดย Wright, (2009) ได้รายงานการประมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้ประสิทธิภาพ 1 log (90%) และ 2 log (99%) ดังตารางที่ 2.8 ข้อควรระวังสำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในการฆ่าเชื้อโรคคือ น้ำเสียที่ใช้ในกระบวนการนี้จะต้องมีความขุ่นน้อย เพราะถ้าหากมีความขุ่นมาก ความขุ่นจะไปบดบังแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้ประสิทธิภาพลดลงไปได้ และหากใช้ความยาวคลื่นที่ไม่เหมาะสมหรือปริมาณแสงที่ไม่เพียงพออาจเป็นการกระตุ้นให้เชื้อแบคทีเรียในน้ำเจริญเติบโตได้

2.7.3.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอาทิตย์ (solar disinfection) สำหรับวิธีนี้ ประสิทธิภาพในการฆ่าจุลินทรีย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง อุณหภูมิ และจะแปรผกผันกับความลึกของน้ำ ปัจจัยที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ด้วยแสงแดดลดลง ได้แก่ พีเอช

ของน้ำ ความขุ่นที่มีอยู่ในน้ำ สภาวะภูมิอากาศ อุณหภูมิ นอกจากนี้จุลินทรีย์แต่ละชนิดที่อยู่ในน้ำจะถูกยับยั้งในช่วงเวลาที่ไม่เท่ากัน (Boyle et al., 2008, Lonnen et al., 2005) ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี ที่กำจัดจุลินทรีย์ได้ ประสิทธิภาพ 1 log และ 2 log ในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (Wright & Cairns, 2009)

Microorganism	log reduction		Microorganism	log reduction	
	1	2		1	2
BACTERIA			Fecal coliforms	3.4	6.8
Bacillus anthracis	4.5	8.7	Salmonella enteritidis	4	7.6
Bacillus subtilis, spores	12	22	Salmonella paratyphi	3.2	-
Bacillus subtilis	7.1	11	Salmonella typhi	2.1	-
Campylobacter jejuni	1.1	-	Salmonella typhimurium	3	-
Clostridium tetani	12	22	Shigella dysenteriae	2.2	4.2
Corynebacterium diphtheriae	3.4	6.5	Shigella flexneri	1.7	3.4
Escherichia coli	3	6.6	Shigella sonnei	3	5
Klebsiella terrigena	2.6	-	Staphylococcus aureus	5	6.6
Legionella pneumophila	0.9	2.8	Streptococcus faecalis	4.4	-
Sarcina lutea	20	26.4	Streptococcus pyogenes	2.2	-
Mycobacterium tuberculosis	6	10	Vibrio cholerae (V.comma)	-	6.5
Pseudomonas aeruginosa	5.5	10.5	Yersinia enterocolitica	1.1	-

ตารางที่ 2.9 ช่วงเวลาการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

ชนิดของแบคทีเรีย	ช่วงเวลาในการยับยั้ง (ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร)	ที่มา
Escherichia coil	2.5 ชั่วโมง	Boyle et al., 2008
Preudomonas aeruginosa	2 ชั่วโมง	Lonnen et al., 2005
Yersinia cnterocolitica	3 ชั่วโมง	Lonnen et al., 2005
Fusarium solani	5 ชั่วโมง	Boyle et al., 2008

2.7.4 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยการใช้โอโซน

เนื่องจากโอโซนมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่ดี มีสภาพเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ จึงมีการนำมาใช้เป็นตัวยับยั้งและทำลายเชื้อโรค แบคทีเรีย ไวรัส ที่ปนเปื้อนมากับน้ำ โดยโอโซนความเข้มข้น 0.05 – 0.45 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร สามารถทำลายเชื้อโรคได้ทุกชนิด การผลิตโอโซนทำโดยใช้อากาศแห้ง หรือออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง (15-20 กิโลโวลต์) ทำให้

เกิดการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจน แล้วรวมตัวเป็นโอโซน อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือ 1.4% โดยปริมาตร จะเห็นว่าการผลิตโอโซนมีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก มีราคาแพง อีกทั้งโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่คงตัว สลายตัวได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องนำเครื่องผลิตโอโซนติดตั้งไว้ที่โรงบำบัดน้ำเสีย และต้องมีการออกแบบอุปกรณ์การเติมโอโซนให้กับน้ำอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดการสูญเสียโอโซนน้อยที่สุด อีกทั้งยังพบว่าการใช้โอโซนในการทำปฏิกิริยานั้น จะได้ผลพลอยได้เป็นสารปนเปื้อนกลุ่มของออการ์โนฮาโลเจน เช่น ไตรฮาโลมีเทน สารปนเปื้อนเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ส่งผลให้ความนิยมในการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อในระบบบำบัดนั้นลดลง (เกรียงศักดิ์ ,2547)

2.7.5 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination)

คลอรีน (Chlorine) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคลอรีนสามารถทำลายเชื้อโรคได้มากกว่า 99% ซึ่งนอกจากคลอรีนจะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ในชั่วระยะเวลาหนึ่งที่ทำให้การเติมคลอรีนลงไปแล้ว ยังให้ผลในระยะยาวอีกด้วย โดยคลอรีนที่เติมลงไปจะละลายน้ำอยู่ในรูปของคลอรีนอิสระทำหน้าที่ฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนมาในภายหลัง (กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ, 2549)

2.7.5.1 ชนิดของสารคลอรีน สารคลอรีนที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 3 ชนิดดังนี้

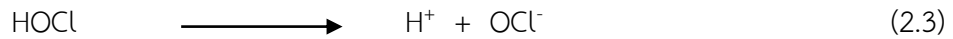
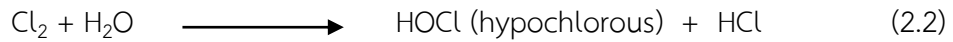
(1) ชนิดคลอรีนก๊าซ (Cl_2) นิยมใช้กันมากในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ มีสีเหลืองแกมเขียว มีความหนาแน่นประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ และเมื่อเป็นของเหลว (คลอรีนเหลว 99%) จะมีสีเหลืองอำพัน มีความหนาแน่นเป็น 1.44 เท่าของน้ำซึ่งเป็นอันตรายต่อบอดและเนื้อเยื่อต่างๆ โดยจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจ เยื่อจมูก และผิวหนัง ซึ่งผลกระทบที่เป็นอันตรายจากการสัมผัสกับก๊าซคลอรีน คือที่ความเข้มข้นประมาณ 5 ppm. ขึ้นไป และที่ความเข้มข้น 5-10 ppm. จะทำให้การหายใจติดขัด น้ำตาไหล ระคายเคืองผิวหนัง ระคายเคืองปอด และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เช่น หากได้รับก๊าซคลอรีนในปริมาณ 1,000 ppm. จะทำให้เสียชีวิตได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ความระมัดระวัง และต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้งและควบคุมการทำงานเสมอ

(2) ชนิดแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calcium hypochlorite) นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก เป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้ดี มีสูตรทางเคมี คือ $Ca(OCl)_2$ ให้ความเข้มข้นระหว่าง 60-70% โดยน้ำหนัก คลอรีนผงชนิดนี้ทำได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์เลี้ยงอย่างรุนแรง สะดวกต่อการใช้งาน และสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพได้ง่าย

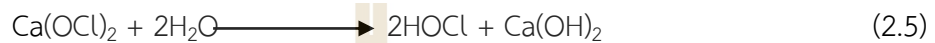
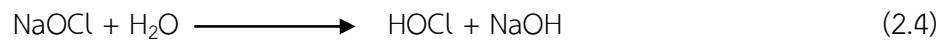
(3) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite) นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก เป็นสารละลายใส สีเหลืองอมเขียวมีสูตรทางเคมี คือ $NaOCl$ ให้ความเข้มข้นประมาณ 16% โดยน้ำหนัก มีความเสถียรน้อยกว่าแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ทำให้เสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว จึงควรเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิไม่สูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพื่อชะลออัตราการเสื่อมคุณภาพ อายุในการเก็บไม่ควรเกิน 60-90 วัน สำหรับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เมื่ออยู่ในสภาวะ pH ต่ำ จะระเหยเป็นหมอกคลอรีนสามารถเกิดการระเบิดได้

2.7.5.2 ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ

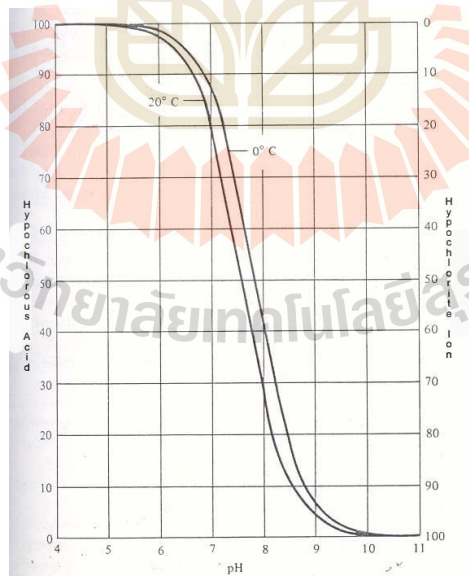
คลอรีนที่อยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน (Cl_2) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส และ กรดไฮโปรคลอไรต์ (การประปานครหลวง, 2552) ดังสมการ 2.2 และกรดไฮโปคลอรัสแตกตัวในน้ำจะให้ไฮโดรเจนไอออน และไฮโปคลอไรต์ดังสมการ 2.3



เมื่อใช้สารแคลเซียมไฮโปรคลอไรต์ หรือ โซเดียมไฮโปรคลอไรต์ แทนก๊าซคลอรีนก็จะได้ สาร HOCl และต่างดังสมการ 2.4 และ 2.5



คลอรีน กรดไฮโปคลอรัส และไฮโปคลอไรต์ เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (free residual chlorine) ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันขึ้นอยู่กับสภาพพีเอชของน้ำ ที่พีเอชของน้ำต่ำกว่า 1 คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีนทั้งหมดและจะระเหยสู่บรรยากาศ ส่วนที่พีเอช 1 ถึง 3.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ทั้งในรูปของก๊าซและกรดไฮโปคลอรัส ขณะที่พีเอชในช่วง 3.5 ถึง 5.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปกรดไฮโปคลอรัสทั้งหมด ที่พีเอชในช่วง 5.5 ถึง 9 จะอยู่ทั้งในรูปของกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปคลอไรต์ และที่พีเอชตั้งแต่ 9 ถึง 7 ขึ้นไป คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปไฮโปคลอไรต์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สัดส่วนของ HOCl และ OCl^- ในน้ำที่พีเอชต่าง ๆ (ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2557)

คลอรีนอิสระในรูปของกรดไฮโปคลอรัสมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าคลอรีนในรูปไฮโปคลอไรต์ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง ควรจะมีคลอรีนในรูปของกรดไฮโปคลอรัสเหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งค่าแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปริมาณคลอรีนอิสระที่

เหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่พีเอชของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU (การประปานครหลวง, 2552)

2.7.5.3 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังนี้

(1) ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (Free chlorine residual) ปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำสามารถวัดได้หลังจากช่วงระยะเวลาสัมผัส ซึ่งการเติมคลอรีนที่น้อยเกินไปจะไม่ทำให้เกิดคลอรีนอิสระขึ้นและอาจจะทำลายเชื้อโรคในน้ำได้ไม่ทั้งหมด แต่การเติมคลอรีนในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้น้ำมีกลิ่นฉุนของคลอรีนและทำให้รสชาติของน้ำเสียไปด้วย ทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองคลอรีนโดยใช่เหตุ นอกจากนี้ คลอรีนยังมีฤทธิ์กัดกร่อน อาจทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เสียหายได้ ดังนั้น ในการเติมคลอรีนจึงต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม คือ สามารถฆ่าเชื้อโรคได้หมดรวมทั้งก่อให้เกิดคลอรีนอิสระที่แนะนำ คือระหว่าง 0.2-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.2-0.5 ppm.) ณ เวลาสัมผัส 30 นาที กล่าวคือภายหลังจากที่ทำการเติมสารละลายคลอรีนไปแล้ว 30 นาที ต้องสามารถวัดปริมาณคลอรีนอิสระได้ระหว่าง 0.2-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อโรค (contact time) ถ้าเวลาสัมผัสนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดีขึ้น

(3) อุณหภูมิ (Temperature) มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ คือ กรณีที่อุณหภูมิของน้ำต่ำ คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัสมากซึ่งทำมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัสน้อยและทำให้คลอรีนสลายตัวได้ดี

(4) ความขุ่นของน้ำ (Turbidity) อนุภาคความขุ่นในน้ำอาจเป็นเกราะกำบังให้เชื้อโรค ทำให้คลอรีนไม่สามารถเข้าไปสัมผัสและฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้น ถ้าต้องการให้คลอรีนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีจึงต้องทำให้น้ำมีความขุ่นต่ำ คือ ต้องมีความขุ่นน้อยกว่า 10 NTU

(5) สภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน เนื่องจากคลอรีนจะแตกตัวเป็นไฮโปคลอรัส (HOCl) ซึ่งมีอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีเมื่อน้ำมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย หาก pH สูงกว่า 7.5 จะทำให้เกิด OCl⁻ มากขึ้น ซึ่ง OCl⁻ นี้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคน้อยกว่า HOCl จะทำให้ต้องสิ้นเปลืองคลอรีนมากขึ้น และหากค่า pH สูงถึง 9.5 จะเกิด OCl⁻ ถึง 100%

(6) สารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำ ในกรณีที่มีสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์สูงจะทำให้คลอรีนมีประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากคลอรีนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับกลุ่มนี้ก่อนเสมอ นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้เกิดสารจำพวก THMs (Trihalomethane) ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย การกำจัดจุลินทรีย์ ในน้ำด้วยวิธีการเติมคลอรีน จะมีความต้องการปริมาณความเข้มข้นของคลอรีน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไปตามชนิดของจุลินทรีย์ (กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ, 2549 และ การประปานครหลวง, 2552) ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคชนิดต่าง ๆ (กองสุขภาพอาหารและน้ำ, 2549)

เชื้อโรค	สารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (นาที)
แบคทีเรีย	100	10
เชื้อวัณโรค	125	3 - 10
เชื้อรา	100	60
เชื้อไวรัสตับอักเสบบ	500	10
เชื้อ HIV	50	10

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า วิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะมีข้อจำกัดหลายด้านของแต่ละวิธี ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ลดข้อจำกัดในการใช้งานเหล่านั้นและลดผลกระทบที่เกิดกับมนุษย์ เทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในจุดมุ่งหมายคือ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคือ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลาย เปลี่ยนแปลง กำจัดมลสารต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำได้

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจึงเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก และ จุลชีพต่าง ๆ ในน้ำ เป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูง และได้ผลเป็นอย่างดีในการกำจัดสารมลพิษในน้ำ

2.8 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

โฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) มาจากการรวมกันของคำว่า “โฟโต” กับ “คะตะลิสต์” “โฟโต” (Photo) หมายถึง กระบวนการที่มีแสงเข้ามาเกี่ยวข้องและ “คะตะลิสต์” (Catalyst) หมายถึง การใช้อุณหภูมิหรือตัวเร่งที่เป็นตัวกลาง ในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่าง ๆ ดังนั้น กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจึงหมายถึง กระบวนการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้พลังงานแสงเป็นตัวกระตุ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยที่ตัวมันเอง ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ (Fujishima et al., 2000) รูปแบบของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสามารถจำแนกได้ 2 แบบคือ

(1) แบบสถานะเดียว (Homogeneous) สถานะของตัวโฟโตคะตะลิสต์กับสารที่จะนำมาทำปฏิกิริยานั้นอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ H_2O_2/UV เป็นต้น

(2) แบบต่างสถานะ (Heterogeneous) สถานะของตัวโฟโตคะตะลิสต์กับสารที่จะนำมาทำปฏิกิริยาอยู่ต่างสถานะกัน เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2/UV เป็นต้น

2.8.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่ง ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

2.8.1.1 การเกาะหรือดูดติดผิว (Adsorption process) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของแข็งโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับของโมเลกุลบนผิวของสารในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก โดยที่การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว เมื่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่ถูกดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างกัน สารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากผิวตัวดูดซับได้

2.8.1.2 การฉายแสง (Irradiation process) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานเพียงพอ หรือมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แกป (band gap) ของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอน (e^-) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (valance band) จะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นคอนดักชันแบนด์ (conduction band) จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h^+) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (valance band) กลายเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (พวงรัตน์, 2557)

2.8.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

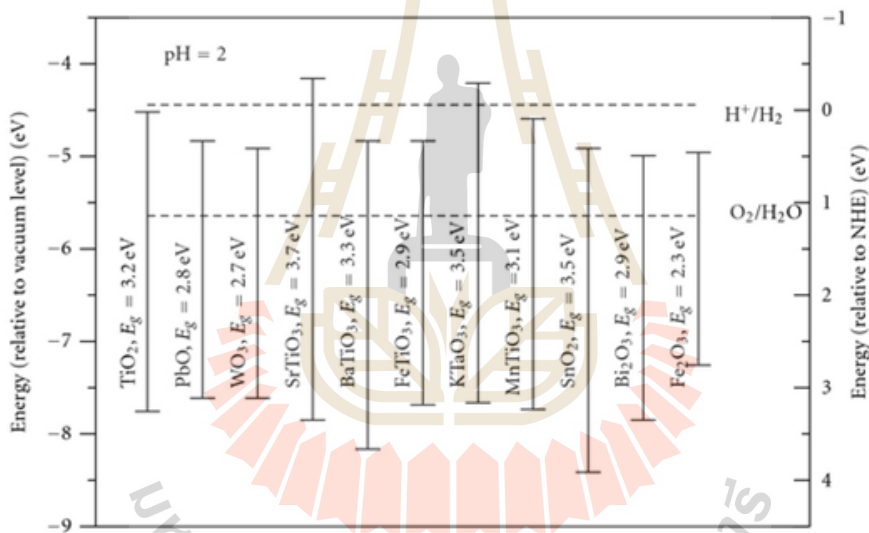
สารที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดได้แก่

2.8.2.1 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น

2.8.2.2 โลหะกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น สำหรับโลหะทรานซิชัน เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) ได้ง่ายและ รวดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะกึ่งตัวนำ เพราะในโลหะทรานซิชัน จะไม่มีแถบพลังงานระหว่างแถบคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) และแถบวาเลนซ์แบนด์ (Valance band) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการ รวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นมีค่าสูง จึงทำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะทรานซิชันนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ปฏิกิริยาชนิดโลหะกึ่งตัวนำได้รับความนิยมน้อยอย่างแพร่หลาย (Sahijpal et al., 2000) โดยโลหะกึ่งตัวนำที่นำมาใช้มีหลายชนิด (Hoffman et al., 1995) โดยจะมีค่าช่องว่างพลังงานที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ตำแหน่งช่องว่างพลังงาน และขนาดช่องว่างพลังงานของโลหะกึ่งตัวนำชนิดต่าง (Robertson, 1996)

Semiconductor	Valence Band (eV)	Conductance Band (eV)	Band gap (eV)	Band gap Wavelength (nm)
TiO ₂ (Rutile)	+3.1	+0.1	3.0	380
TiO ₂ (anatase)	+2.9	-0.3	3.4	380
SnO ₂	+4.1	+0.3	3.9	318
ZnO	+3.0	-0.2	3.2	390
WO ₃	+3.0	+0.2	2.8	443
CdS	+2.1	-0.4	2.5	497

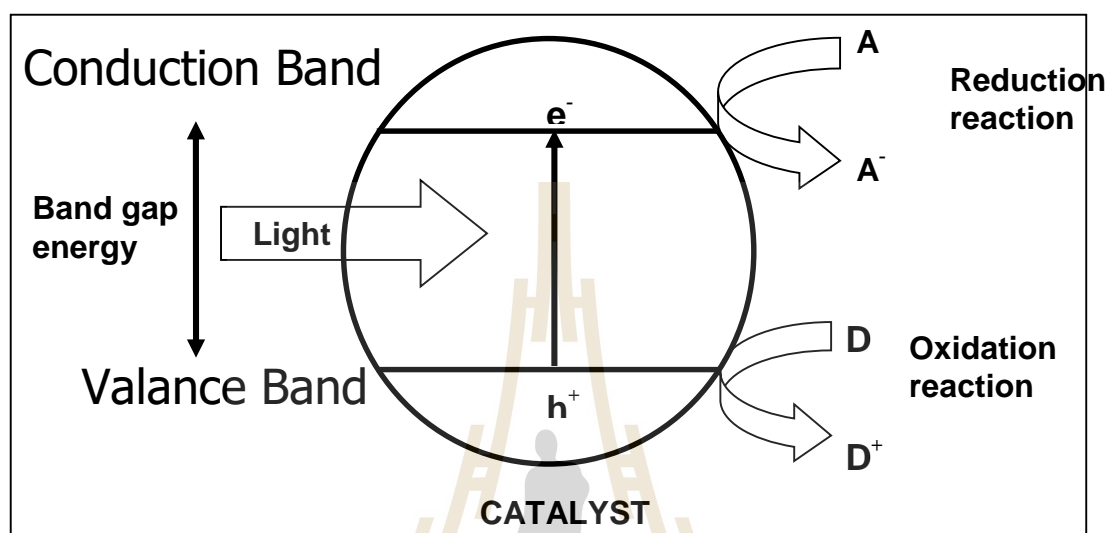


รูปที่ 2.5 ค่าช่องว่างของพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ (Chandra, 1985)

2.8.3 โครงสร้างของวัสดุกึ่งตัวนำ (Structure of Semiconductor)

โครงสร้างของวัสดุกึ่งตัวนำที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอน โดยแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างที่เรียกว่า แบนด์แกป (Band gap) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานเพียงพอ หรือมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แกป ของตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กตรอน (e⁻) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์จะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นคอนดักชันแบนด์จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h⁺) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์

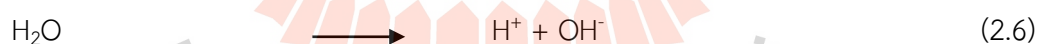
กลายเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอน (e^-/h^+) ในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.6 ในกรณีที่ไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นนี้ สามารถรวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีก เกิดเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Recombination แต่ในกรณีที่มิตัวให้หรือตัวรับอิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันต่อไป (พวงรัตน์, 2557)



รูปที่ 2.6 การเกิดอิเล็กตรอน (e^-) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h^+) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.8.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Mechanism of Photocatalysis Reaction)

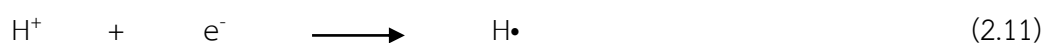
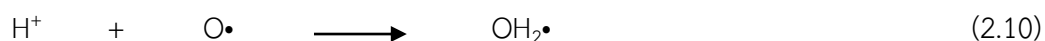
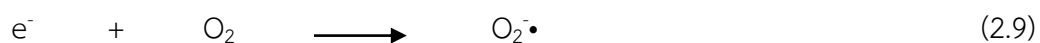
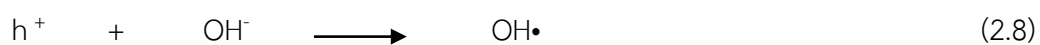
กลไกของกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6 ถึงสมการที่ 2.12



การกระตุ้น



การเกิดแรดิคอลล จาก e^- , h^+



การรวมตัวกันใหม่ของ e^- , h^+ (electron-hole Recombination)



เมื่อโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มากกว่าหรือเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดที่ว่าง (h^+) ของ

อิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ขึ้น ดังสมการที่ 2.7 ซึ่ง h^+ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical: $OH\cdot$) ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) ในคอนดักชันแบนด์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่อยู่รอบ ๆ ตัวเร่งปฏิกิริยา และเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical: $O_2\cdot^-$) ดังสมการที่ 2.9 และสามารถเกิดเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical: $OH_2\cdot$) ดังสมการที่ 2.10 กรณีที่ในระบบการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอน (H^+) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ (สมการที่ 2.6) จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทนและเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical: $H\cdot$) ตามสมการที่ 2.11 ซึ่งเรดิคัลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบ โดยเฉพาะไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$) ซึ่งเป็นสารออกซิแดนท์หลักในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก (รองจาก F^- แต่สูงกว่า Cl^-) และสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำได้ทุกชนิด แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวรับหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนสามารถกลับมารวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้ เกิดปฏิกิริยาที่ เรียกว่า Recombination ตามสมการ 2.12 (พวงรัตน์, 2557)

2.8.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.8.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของสารที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เพื่อจะที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดของแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นได้

2.8.5.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษ ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Gupta et al., 2005)

2.8.5.3 ค่าพีเอช ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลายซึ่ง เป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการติดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไป ยกตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออยู่ในน้ำ ประจุลบบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้แตกต่างกันตามพีเอชของน้ำนั้น ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการเป็น Amphoteric ของกลุ่มไฮดรอกซิลที่พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประจุลัพท์ที่พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นบวก เมื่อมีค่าพีเอชของน้ำน้อยกว่า 6.2 และประจุลัพท์ที่พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นลบเมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่ามากกว่า 6.2 ผลของประจุที่เปลี่ยนแปลงไปตามพีเอชของน้ำ จะส่งผลต่อการบำบัดและกำจัดมลสารมลพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์ ถ้าสารมลพิษนั้นถูกดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มากจะทำให้ประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย (พวงรัตน์, 2557)

2.8.5.4 ความเข้มของแสง ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้น จำเป็นจะต้องมีพลังงานโฟตอนที่มากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาระบุไว้ว่าการเพิ่มความเข้ม

ของแสงนั้นจะส่งผลให้ปริมาณของจำนวนโฟตอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูงขึ้นตามไปด้วย (Zhao et al., 2003)

2.8.5.5 ถึงปฏิกิริยา เป็นหนึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องควรคำนึงถึงความสามารถในส่งผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ต และปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นกับแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา วัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถึงปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ แก้วควอทซ์ อะคลิลิก เป็นต้น (Thomas et al., 2000)

2.8.5.6 อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย โดยทั่วไปกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20–80 องศาเซลเซียส

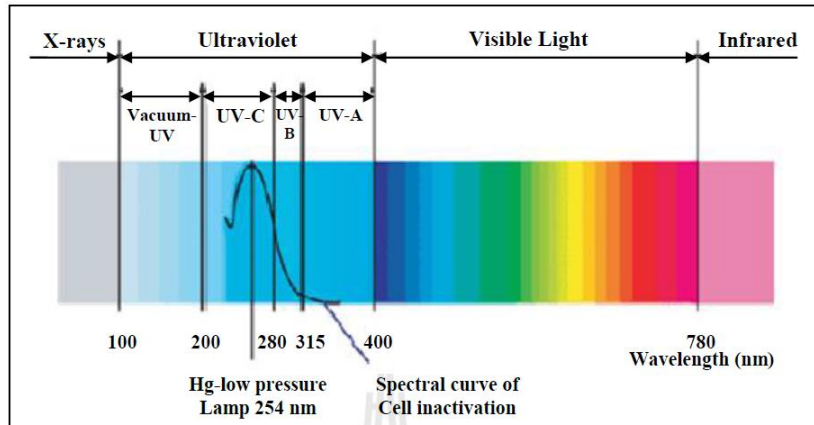
2.8.5.7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่จับกับอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล โดยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีเพิ่มขึ้นเพราะโมเลกุลออกซิเจนจะรวมตัวอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์อ็อกซิเจนแรดิคัล และสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนรุนแรงอีกตัวหนึ่ง โดยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการย่อยสลายมลพิษได้มากขึ้นด้วย (Chen, 2009)

2.8.6 พลังงานแสงสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

จากหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า สิ่งที่สำคัญสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคือแสงที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถจำแนกแสงตามช่วงความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 2.12 (Venturini et al., 2009)

ตารางที่ 2.12 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) (Venturini et al., 2009)

สเปกตรัมรังสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	
Ultraviolet	100-400	
	UV-A	315-400
	UV-B	280-315
	UV-C	100-280
Visible Radiation (Light)	400-760	



รูปที่ 2.7 ความยาวคลื่นของแสง (Venturini et al., 2009)

ความเข้มแสง คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงาน คือ พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา โดยที่อนุภาคแสง 1 โฟตอน มีความถี่ (ν) และความยาวคลื่น (λ) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.13

$$\nu = c / \lambda \quad (2.13)$$

เมื่อ c คือ ค่าความเร็วแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

พลังงานของ Photon จะสามารถคำนวณได้ โดยอาศัยความยาวคลื่นของ Photon ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.14

$$\text{Photon energy (E)} = h\nu = hc/\lambda \quad (2.14)$$

เมื่อ h เท่ากับ 1.24 อิเล็กตรอนโวลต์นาโนเมตร

หลังจากทราบค่าแถบพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำ จะสามารถคำนวณหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีความเข้มแสงเท่ากับวัสดุกึ่งตัวนำนั้นได้ ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเข้มแสง 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.15

$$\lambda = hc/E \quad (2.15)$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\lambda = (6.625 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8) \times \frac{1}{16 \times 10^{-19}}$$

$$\lambda = 0.388 \times 10^{-16} = 388 \text{ nm}$$

ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าค่าความยาวคลื่นแสงที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 3.2eV ของวัสดุกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์คือ 388 nm ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต

2.9 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโลหะกึ่งตัวนำที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีช่วงของช่องว่างพลังงานที่กว้างเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะกึ่งตัวนำอื่น ๆ ยกเว้นโลหะกึ่งตัวนำชนิดที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ แต่เนื่องจากสังกะสีมีความเป็นพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย จึงไม่นิยมใช้ อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโลหะกึ่งตัวนำที่มีเสถียรภาพที่สุด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ และสามารถรีดักชันออกซิเจนได้ในด้านสิ่งแวดล้อมมีการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านการทำน้ำให้บริสุทธิ์ การบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคในน้ำ เป็นต้น (Hou et al., 2008, ฌรัฐญา, 2556)

2.9.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียม

ไทเทเนียมเป็นโลหะในกลุ่มทรานซิชันจัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลก และอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ ได้แก่ แร่รูไทล์ (rutile) และ แร่อิลเมไนต์ (ilmenite) แร่เหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเปลือกโลก พบมากในประเทศออสเตรเลีย มาเลเซีย ญี่ปุ่น แคนาดา ฟินแลนด์ แซมเบีย นอร์เวย์ โปรตุเกส เซเนกัล ศรีลังกา อาร์เจนตินา อียิปต์ บราซิล คองโก สเปน แอฟริกาใต้ และรัสเซีย (sellers., 2019) สำหรับประเทศไทยพบแร่อิลเมไนต์มากในแถบภาคใต้ ซึ่งเป็นแหล่งดิบมากก่อน ได้แก่ จังหวัดภูเก็ต พังงา ระนอง กระบี่ สงขลา และยะลา แร่อิลเมไนต์มีสูตรทางเคมีเป็น FeTiO_4 หรือ FeTiO_2 ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “กากแร่” ที่ได้หลังจากการแยกเอาดีบุกออกมาแล้วนำไปทำการสกัดเพื่อให้ได้ไทเทเนียมที่บริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอมเท่ากับ 22 และมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 47.867 รัศมีอะตอมไทเทเนียมเท่ากับ 147 พิโคเมตร มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดคือ 1666.7 องศาเซลเซียส และ 3285 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ 4.50 กรัมต่อเซนติเมตร และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 42.0 ไมโครโอห์มเซนติเมตร สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ทางเคมีที่มักเกิดขึ้นมากที่สุดคือ 4+ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาส เกิดขึ้นมากที่สุดคือโมเลกุลจำพวกไดออกไซด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น 4- ดังนั้น โครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นส่วนใหญ่ (พรพงศ์, 2551)

2.9.2 ลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

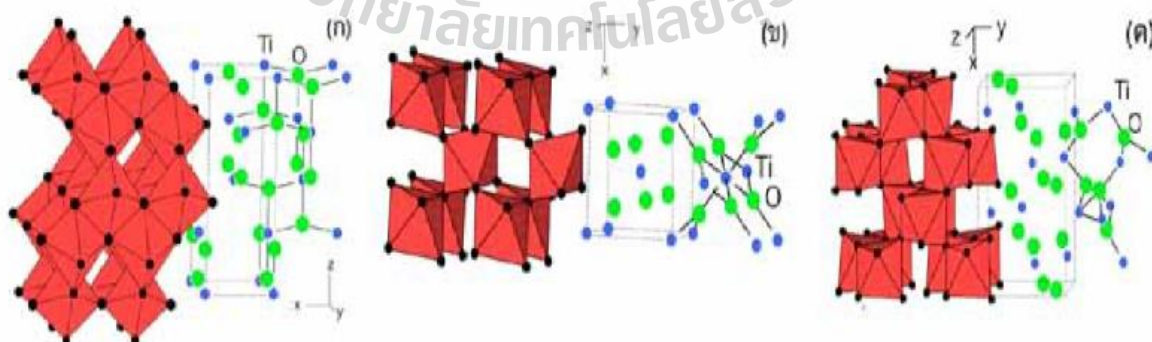
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งเป็นวัสดุนาโน โลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ 3 รูปแบบ (Fujishima et al., 2000) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ได้แก่

1) รูไทล์ (Rutile) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร เป็นต้น

2) อนาเทส (Anatase) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า รูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

3) บรูคไคท์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic)

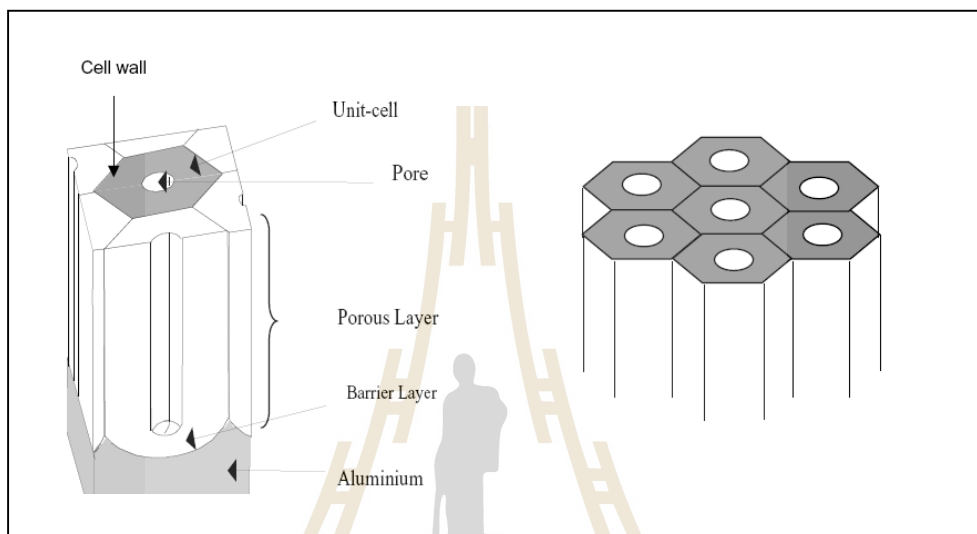
สำหรับโครงสร้างผลึกที่นำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิส นั่นคือ โครงสร้างผลึกแบบ อนุนาเทส และรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) และมีอะตอมของออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยที่มุมระหว่างแกนของออกตะฮีดรอล ในรูไทล์จะมีค่าเท่ากับ 90 องศา และ 81.21 องศา ในขณะที่อนุนาเทสนั้นจะมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 องศา และ 92.43 องศา จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์จะพบว่า มีพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า 889.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนุนาเทสที่มีค่าเท่ากับ -884.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนุนาเทสนั้น มีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าว จึงทำให้ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนุนาเทส นั้นมีค่าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานเพียง 3.00 อิเล็กตรอนโวลต์ (Bessekhouad et al., 2003) จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึก แบบอนุนาเทส มีสมบัติทางด้านความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และบรูคไคท์ ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ อิเล็กตรอน (e⁻) และโฮล (h⁺) ได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดติดผิวที่ต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนุนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนุนาเทสมากกว่าแบบอื่น (บุรภัทร, 2548)



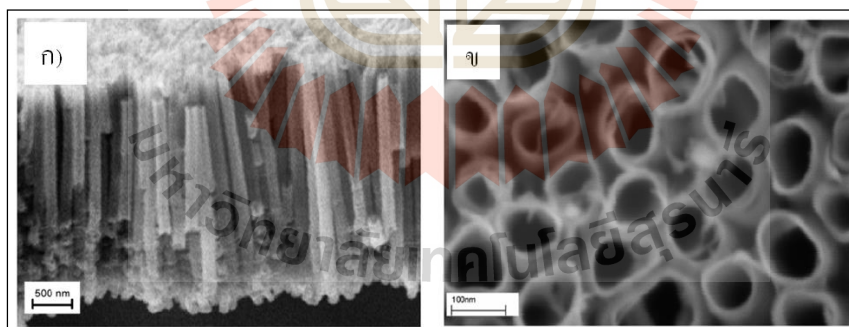
รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม (ก) แบบรูไทล์ (ข) อนุนาเทส และ (ค) บรูคไคท์ (White et al, 2003)

2.9.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization process)
กระบวนการแอโนไดซ์เซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะโดยใช้การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ (Working Electrode) ที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้าได้

(Electrolyte) กระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick et al., 1987) เริ่มแรกได้ทดลองใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูก (Substrate) ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยส่วนแรกคือ ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่า ชั้น Barrier ซึ่งชั้น Barrier มีความหนาประมาณ 0.1-2.0 % ของความหนาทั้งหมดของชั้นออกไซด์ ชั้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และส่วนที่สอง ได้แก่ ชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะเห็นได้ว่าการก่อตัวเป็นท่อซึ่งมีผนังท่อ (Cell wall) ให้เห็นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เซลล์โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wernick et al. 1987)

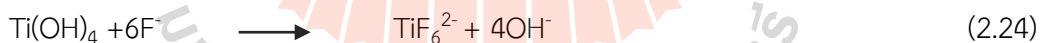
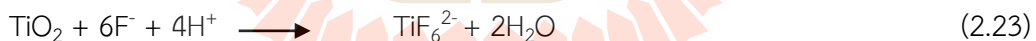
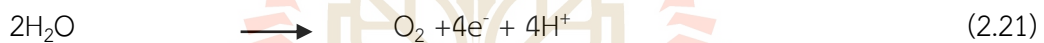


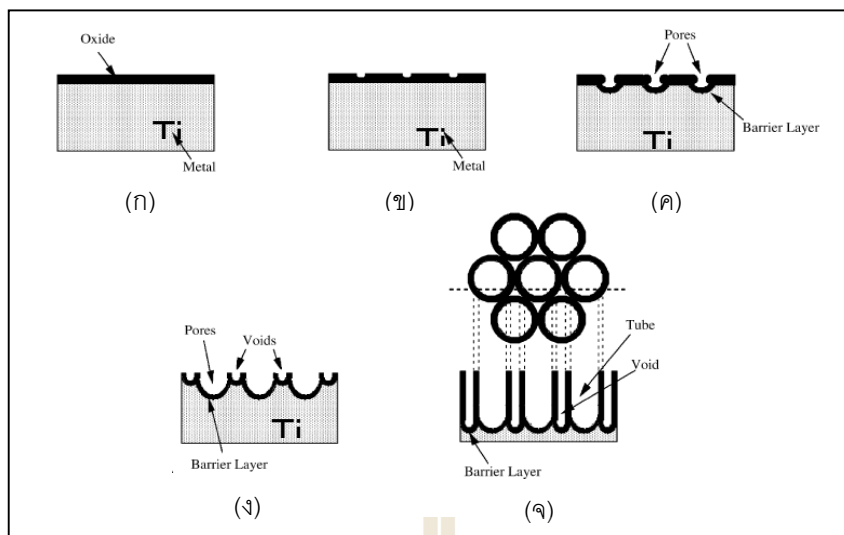
รูปที่ 2.10 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (ก) ภาพตัดขวางชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ลักษณะผิวหน้าออกไซด์ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (de Tacconi et al., 2006)

Mor et al. (2006) ได้เสนอว่าการก่อตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีรูพรุนนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันและเป็นพื้นฐานของการก่อตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน (TiO_2 nanotubes) กระบวนการแอโนไดซ์เซชันเริ่มโดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟาร่วม โดยใช้แผ่นโลหะเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า คือ โลหะไทเทเนียม และใช้กราไฟท์ เป็นขั้วไฟฟาร่วมต่อเข้ากับขั้วลบของ

แหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นโลหะ โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปแบบลักษณะแบบท่อมี่เส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูป 2.10

กลไกในการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแสดงดังรูป 2.11 โดยบนผิวของกราฟไฟท์จะเกิดไฮโดรเจนขึ้น (Liao et al., 2010) ดังสมการที่ 2.16 การก่อตัวของออกไซด์บนชั้นของผิวโลหะไทเทเนียมในช่วงแรกนั้นจะเกิดออกไซด์ขึ้นบนผิวโลหะก่อน เนื่องจากแรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนแผ่นไทเทเนียม โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำ (Mor et al., 2006, Choi et al., 2011, Liu et al., 2012) ดังสมการ 2.17 ถึง 2.22 หลังจากนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรเกิดขึ้นบนชั้นออกไซด์ เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลาย (สารละลายที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน (F^-)) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกัดกร่อนจะสลายตัวออกมารวมตัวกับฟลูออไรด์ไอออนในน้ำ (TiF_6^{2-}) ได้ดังสมการที่ 2.23 ถึง 2.25 ต่อมารูพรุนเหล่านี้จะเพิ่มความลึกขึ้นเรื่อย ๆ จนเป็นท่อที่มีขนาดนาโนเมตร โดยที่ท่อเหล่านี้จะเกิดขึ้นทั่วพื้นผิวไทเทเนียม ไดออกไซด์





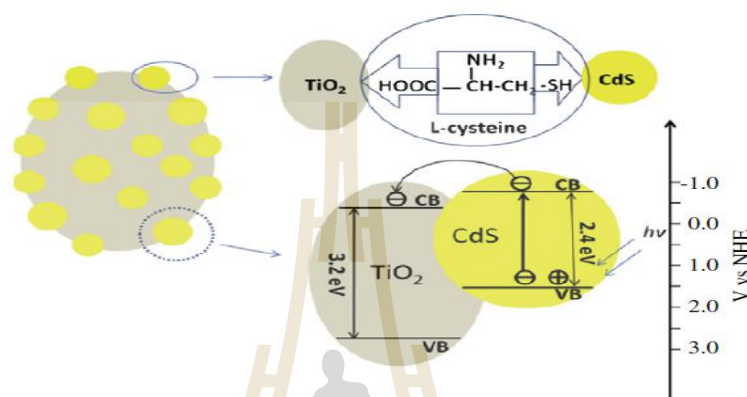
รูปที่ 2.11 การพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อขนาดนาโน (TiO_2 nanotubes) (Mor et al., 2006) (ก) การก่อตัวของชั้นออกไซด์ (ข) การเริ่มเกิดรูพรุนเล็กๆ บนชั้นออกไซด์ (ค) การเกิดชั้น Barrier (ง) การขยายขนาดของรูพรุนและเกิดเป็นผนังท่อ (จ) การพัฒนาอย่างสมบูรณ์ของไทเทเนียมรูปท่อขนาดนาโน (TiO_2 nanotubes)

2.9.4 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิล

จากพื้นฐานของการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต้องใช้พลังงานจากแสงนั้น ค่าพลังงานระหว่างช่องว่างของคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ประมาณ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับโครงสร้างผลึกรูทิล และ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับโครงสร้างผลึกอนาเทส ซึ่งค่าพลังงานดังกล่าว นั้นเป็นช่วงค่าพลังงานที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (<400 นาโนเมตร) ทำให้ในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นจะต้องใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นแหล่งพลังงาน ในการพัฒนาลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์จึงต้องคำนึงถึงประเด็นการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาและประหยัดค่าใช้จ่าย ทั้งนี้เนื่องจากในแสงอาทิตย์มีรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นส่วนประกอบเพียงร้อยละ 5 เท่านั้น ในขณะที่แสงวิซิเบิลมีร้อยละ 44 การที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงวิซิเบิลได้จึงต้องมีการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์โดยลดช่องว่างระหว่างคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ให้อยู่ในช่วงค่าที่สามารถดูดกลืนแสงวิซิเบิลได้ (400-700 นาโนเมตร) (พวงรัตน์, 2557)

การปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ตอบสนองต่อแสง visible มีวิธีการหลายวิธี เช่น การปะติดด้วยโลหะ (Metal Deposition) การเจือไอออน (Ion Doping) การเจือด้วยสี (Dye sensitization) และการสร้างวัสดุเชิงตัวนำประกอบเป็น Composite TiO_2 เช่นการปะติดด้วยโลหะ โลหะมีค่าต่าง ๆ เช่น Ru, Rh, Pd, Ag, Pt and Au จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากมีระดับ Fermi ต่ำกว่าคอนดักชันแบนด์ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากการได้รับพลังงานแสงจะถูกกักไว้ที่โลหะมีค่าต่าง ๆ เหล่านี้ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ลดการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและที่ว่างเดิมของอิเล็กตรอน (recombination) ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้มีศักยภาพที่จะทำปฏิกิริยากับสารที่มีอยู่ในระบบได้อย่างเต็มที่ ส่วนวิธีการสร้าง

วัสดุกิ่งตัวนำประกอบเป็น Composite TiO_2 ก็จะมีวัตถุประสงค์คล้ายๆกัน คือลดการเกิดการ recombination และเป็นการเพิ่มศูนย์กลางการทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ สารกิ่งตัวนำที่มีช่วงแถบพลังงาน (Band gap) กว้าง เช่น TiO_2 มาประกอบกับสารกิ่งตัวนำที่มีช่วง แถบพลังงานแคบ เช่น CdS (Gao et al., 2012) ซึ่งแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุ ประกอบ TiO_2/CdS แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งวัสดุประกอบ TiO_2/CdS มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อ ช่วงแสง visible ที่ดีกว่า TiO_2 และมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูง อีกทั้งยังช่วยลดการเกิด recombination ด้วย



รูปที่ 2.12 รูปจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงในวัสดุประกอบ TiO_2/CdS (Gao et al., 2012)

อย่างไรก็ตามในการปรับปรุงคุณสมบัติ ญัฐพล, (2554) ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย วิธี photo deposition, impregnation, chelating-photodeposition พบว่าเมื่อเตรียมด้วยวิธี photo deposition จะให้ผลค่าว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าวิธีอื่น ๆ เช่นเดียว Wang et al., (2008) วิธีการ photo deposition จะให้ขนาดของผลึกที่เล็กส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่ง Zhong et al., (2015) ใช้ Sb_2S_3 มาเป็นวัสดุประกอบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจาก Sb_2S_3 ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีเสถียรภาพสูง (Ail et al., 2015,) และมีแบนด์แกปที่เหมาะสมกับแสงวิสิเบิลเท่ากับ 2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ (Guilherme et al., 2013) ซึ่งการใช้ Sb_2S_3 มาเป็น วัสดุประกอบกับ TiO_2 ยังมีการศึกษาไม่มากนัก แต่ในงานวิจัยของ Zhong et al., (2015) ก็ได้แสดงให้เห็นว่า Sb_2S_3 จะช่วยให้ TiO_2 มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสงในช่วงแสง visible ได้มากขึ้น

2.9.5 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

ในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีด้วยกันอยู่หลายรูปแบบได้แก่

2.9.5.1 ผงไทเทเนียม การนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียใน น้ำ เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อด้อยหลายประการที่ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงมีขนาดอนุภาคในระดับนาโน เมื่ออยู่ในน้ำจะมีลักษณะ สมบัติใกล้เคียงกับคอลลอยด์ ในการนำมาใช้งานจึงเกิดการแขวนลอยในน้ำ ทำให้เกิดการบดบังแสงที่

ส่องผ่านเข้ามา ส่งผลต่อการได้รับพลังงานและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้การทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีประสิทธิภาพไม่สูงเท่าที่ควร นอกจากนี้หลังจากปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนที่ต้องดำเนินการต่อเนื่องคือการ แยกผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แม้ว่าผงไทเทเนียมนั้นจะมีพฤติกรรมที่รวมตัวกัน (aggregate) แต่อนุภาคก็ยังมีน้ำหนักเบากว่าที่จะจมตัวลงมาจากการแขวนลอยในลักษณะคอลลอยด์ จึงต้องใช้วิธีในการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำ เช่น การกรอง เป็นต้น

2.9.5.2 พิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ จากปัญหาการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงในการบำบัดมลพิษ ทำให้มีการพัฒนาวิธีในการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้งานโดยการเคลือบบนตัวกลาง เช่น แผ่นแก้ว แผ่นสแตนเลส และ แผ่นโลหะต่าง ๆ วิธีการเหล่านี้ได้รับการยอมรับว่ามีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส จากการพัฒนาของวิธีการนี้ส่งผลให้การดำเนินการของระบบโฟโตคะตะไลซิสเป็นไปได้ง่าย โดยการนำตัวกลางใส่ลงไปในน้ำและฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตไปยังตัวกลางทำให้ปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเกิดขึ้น นอกจากนี้จะสะดวกในการดำเนินการแล้ว ยังลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายของกระบวนการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำหลังจากการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นอีกด้วย

2.9.5.3 ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการพัฒนาวัสดุนาโนอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการขึ้นรูปท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการ แอโนไดซ์เซชัน เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดเป็นท่อนาโน ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้โดยง่าย และยังคงมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ในการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอน ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีกว่าฟิล์มบางนาโนที่มีรูพรุนสูง รวมทั้งฟิล์มบางมีโอกาสที่อิเล็กตรอนโฮลสามารถเกิดการรวมตัวกันได้ง่าย

จากการศึกษาถึงกลไกของการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับพลังงานแสงแล้วจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้น อนุมูลอิสระเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับเซลล์ของแบคทีเรีย งานวิจัยของ saito et al., (1992) ได้รายงานถึงการทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระเหล่านี้กับผนังเซลล์ โดยสามารถทำลายผนังเซลล์และทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนไฮดรอกซีออกซิเจนออกจากเซลล์ สามารถลดอัตราการรอดของเซลล์ได้สูง อีกทั้งอนุมูลอิสระยังเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบที่เป็นไขมันในส่วนของพอลิฟอสฟอไรด์ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเซลล์เช่น การหายใจ ส่งผลให้เซลล์ตาย เช่นเดียวกับ Mannes et al., (1999) ได้รายงานถึงการทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ของอนุมูลอิสระจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการทำลายชั้นไขมันโดยเฉพาะในส่วนของพอลิซัคคาไรด์ของผนังเซลล์ชั้นนอก และชั้นเพพทิโดไกลแคน

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิด

การเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโชน 1.5 เท่า (พวงรัตน์, 2557)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

จากทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน พบว่า ปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า สารละลายนำไฟฟ้า และระยะเวลา

ความต่างศักย์ไฟฟ้า สารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาในการสังเคราะห์ (Chen *et al.*, 2007) โดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำปฏิกิริยาให้เกิดออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำบนพื้นผิวโลหะ ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นบนพื้นผิวไทเทเนียม โดยมีการศึกษาการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความต่างศักย์ต่างกัน 5 10 15 และ 20 โวลต์ โดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า 0.5 โมลาร์ ในไฮโดรเจนฟลูออไรด์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ทุกสภาวะเกิดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุด คือ 100 นาโนเมตร (Brammer *et al.*, 2011)

สารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันนั้นโดยส่วนมากจะมีฤทธิ์กัดกร่อน โดยพบว่า สารเคมีที่มีฟลูออไรด์ไอออน (F⁻) ผสมอยู่จะทำให้เกิดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบท่อนาโน ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) และแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) เป็นต้น การใช้สารละลายที่มีฟลูออไรด์ไอออนเพียงอย่างเดียวจะทำให้ท่อที่เกิดขึ้นมีลักษณะการจัดเรียงของท่อไม่เป็นระเบียบมีการกระจุกตัวของท่อ การเกิดท่อซ้อนกัน และเกิดการสลายตัวของท่อในระยะเวลาการสังเคราะห์ไม่นาน (Chen *et al.*, 2007, Zhao *et al.*, 2005) จึงมีการใช้สารเคมีที่มีความหนืดสูงมาผสมลงไปในสารละลาย เช่น กลีเซอรอล และเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น เพื่อชะลอปฏิกิริยาของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความรุนแรงต่อการเกิดออกไซด์ ให้การก่อตัวของออกไซด์ช้าลง ทำให้ท่อเกิดขึ้นอย่างราบรื่น มีแนวสันท่อที่ชัดเจน พร้อมทั้งปรับปรุงพื้นผิวออกไซด์ให้ราบเรียบเป็นระเบียบ โดย ศรีัญญา, (2555) ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ NH₄ 0.30 โมลาร์โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง กลีเซอรอล:น้ำ (60:40) และ โพลีเอทิลีนไกลคอล:น้ำ (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า สารละลายที่ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีลักษณะผิวหน้าเรียงตัวกันสม่ำเสมอ มีลักษณะท่อชัดเจน ไม่มีการเชื่อมติดกันของผนังท่อคือสารละลายที่ใช้อัตราส่วน กลีเซอรอล:น้ำ (60 : 40) ระยะเวลาในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีความสำคัญมากต่อลักษณะโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยเมื่อใช้ระยะเวลานานขึ้นก็จะทำให้ความหนาของออกไซด์เพิ่มขึ้น และโครงสร้างเป็นแบบท่อจะชัดเจนขึ้น (Premchand *et al.*, 2006, Sun *et al.*, 2011) โดยจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ 0.067 โมลาร์ NH₄F ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 10 30

60 และ 120 นาที พบว่า ความหนาของออกไซด์มีค่าเท่ากับประมาณ 2 4 6.5 และ 9.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ที่เวลาในการสังเคราะห์ 10 30 และ 60 นาที ออกไซด์เป็นท่อนาโนที่มีที่มีผนังท่อติดกัน และที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 120 นาที จะเกิดเป็นท่อที่มีผนังท่อชัดเจนนอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการสังเคราะห์ที่ระยะเวลานานขึ้น ซึ่งถือว่าระยะเวลาในการสังเคราะห์ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Sun *et al.*, 2011) และมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 2 และ 4 ชั่วโมง ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.135 โมลาร์ NH_4F ในเอทิลีนไกลคอล ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า ความหนาของออกไซด์มีขนาด 7 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้นทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะท่อก็กยาวมากขึ้น (Kontos *et al.*, 2012)

2.10.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ปัจจุบันได้มีการนำเอากระบวนการโฟโตคะตะไลซิส มาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในน้ำเสียมากขึ้น ทั้งนี้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคของประเทศไทยจะทำการเติมคลอรีน ซึ่งเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำหรือน้ำเสียจะทำให้เกิดสารพลอยได้ (by-products) ที่อยู่ในรูปของไตรฮาโล-มีเทน และกรดฮาโลอะซิติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Frezze *et al.*, 2005, Paleologou *et al.*, 2007) ดังนั้น กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงมีการศึกษาอย่างแพร่หลายมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Bekbolet *et al.*, (1996) ในการกำจัด *E. coli* โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ ความเข้มแสง 5.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที พบประสิทธิภาพการกำจัด 90% และเมื่อเพิ่มเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอเป็น 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 97% และจากการศึกษาของ Ibanez *et al.*, (2003) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ ความเข้มแสง 5.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ 99.999% ในเวลา 40 นาที และยังมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสเตอร์ไรซ์อาหารและสิ่งแวดล้อมในโรงงานให้ปราศจากเชื้อ *Salmonella choleraesuis subsp.*, *Vibrio parahaemolyticus*, และ *Listeria monocytogenes* โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้แสงอัลตราไวโอเลตเอเป็นเวลา 30 นาที สามารถกำจัดเชื้อดังกล่าวได้ 62% 80% และ 35% ตามลำดับ โดย *Salmonella choleraesuis* และ *Vibrio parahaemolyticus* ถูกกำจัดได้ 99% เมื่อฉายแสงเป็นเวลา 3 ชั่วโมง Lonnen *et al.*, (2005)

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์กับวัสดุต่าง ๆ เช่น Yao *et al.* (2007) ทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซลเจล บนแผ่นกระจกฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ 360 นาโนเมตร เป็นเวลา 60 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *Enterobacter cloacae* และ *Erwinia carotovora subsp.* ได้ 99.5% และ 99.9% ตามลำดับ และเพื่อทำให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคสูงขึ้น Majeda *et al.*, (2015) ได้ใช้วิธีโซลเจล สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเจือคอปเปอร์ลงไป

บนตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้แสงความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่า สามารถยับยั้งเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^6 CFU/ml ได้ 100% ในเวลา 1 ชั่วโมง และ Yanan *et al.*, (2016) ได้ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทสังกะสี (Bi_2WO_6) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ทำการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^7 CFU/ml ใช้แสงซินนอน 300 วัตต์ สามารถยับยั้งเชื้อได้ 100% ในเวลา 1 ชั่วโมง และ Danae *et al.*, (2014) ได้ใช้วิธีการตกตะกอนร่วม ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพระหว่างการเจือโคบอลและแมงกานีส พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือแมงกานีส สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* 10^6 CFU/ml ในเวลา 10 นาที แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือโคบอลมีประสิทธิภาพ 95% ส่วนเชื้อ *K.pneumoniae* 10^5 CFU/ml พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เจือแมงกานีสและเจือโคบอลให้ประสิทธิภาพที่เท่ากันคือ 100% ในเวลา 10 นาที

การออกแบบการทดลองการฆ่าเชื้อแบบที่เรียที่ก่อให้เกิดโรคในน้ำหรือน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีหลากหลายกันไป โดย Deng *et al.*, (2007) ทำการเปรียบเทียบระหว่างการใส่สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 10% และ ผ้าฝ้ายที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการกำจัดเชื้อ *E.coli* พบว่าสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดจุลินทรีย์ได้ 96.1% ขณะที่ผ้าฝ้ายเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดได้ 93.7% และยังทดสอบกับเชื้อ *B. subtilis* พบว่าสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดได้ 91.6% และผ้าฝ้ายเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดได้ 88.9 % ในเวลา 24 ชั่วโมง Lee *et al.*, (2005) ได้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์มาเคลือบบนท่อนาโนคาร์บอน (TiO_2 -multiwall nanotube) เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผง P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *Bacillus Cereus* 90% ในเวลา 198 นาที ขณะที่ TiO_2 -multiwall nanotube ใช้เวลาเพียง 84 นาที ที่ความเข้มแสง 9.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการแต่ Alrousan *et al.*, (2009) ใช้น้ำผิวดินเปรียบเทียบกับน้ำกลั่นในการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เคลือบบนกระจก ฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นเวลา 90 นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อดังกล่าวในน้ำกลั่นเกิดขึ้นได้ 100% ขณะที่ในน้ำผิวดินประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์มีเพียง 75% เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับเชื้อ *E. coli* ลดลง เพราะเรดิคอลส่วนหนึ่งไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำ

บทที่ 3

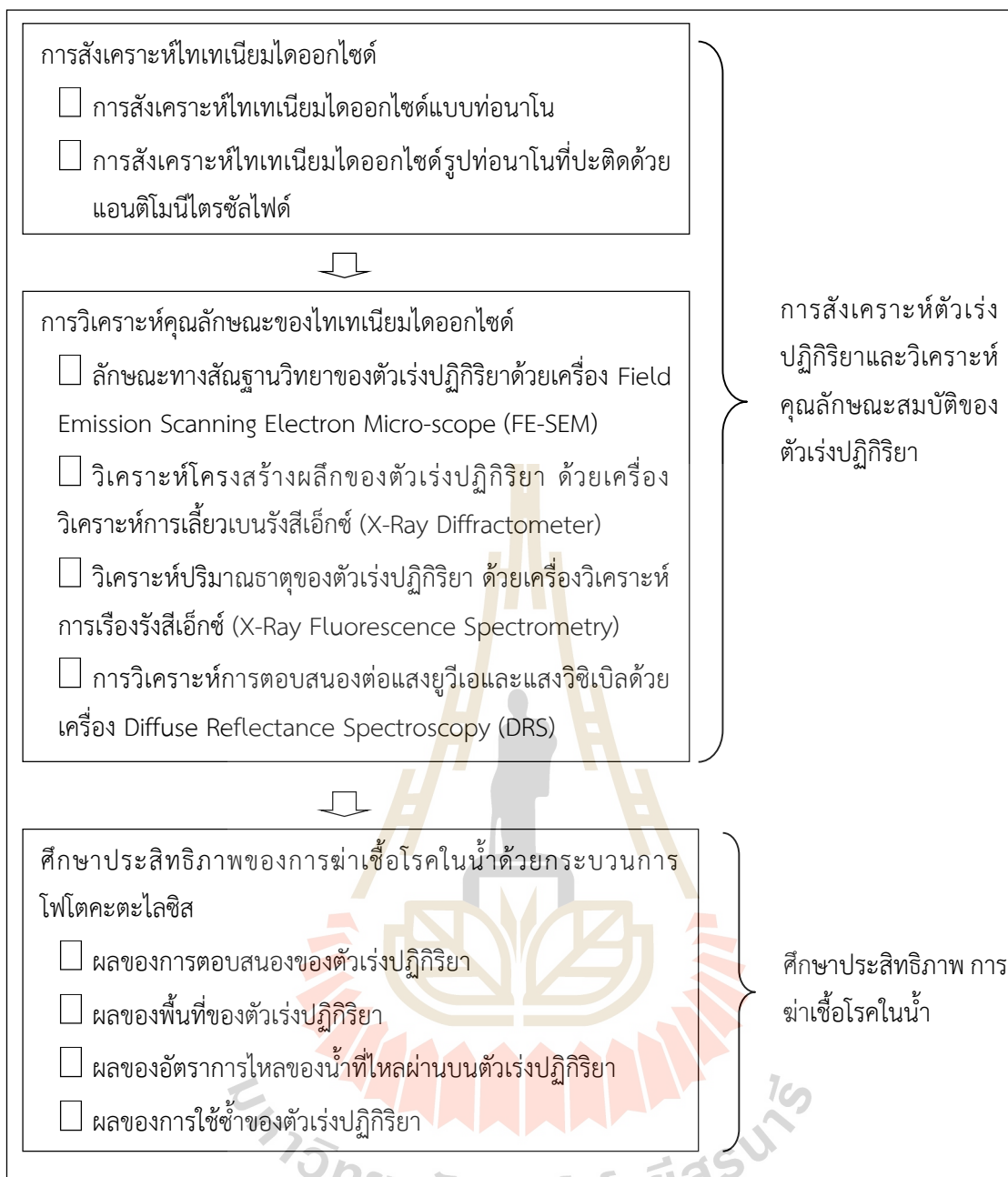
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อหาแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ซึ่งกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง ที่ได้รับความนิยมในงานหลายด้าน มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยา โดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารหรือเปลี่ยนความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลงจนถึงไม่มีความเป็นพิษเลย (พวงรัตน์., 2557) ในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นถึงการนำหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมาประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ เนื่องจากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยวิธีเดิมจะใช้กระบวนการเติมคลอรีนลงไปในน้ำ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน หรือกรดฮาโลอะซิติก ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสารอินทรีย์ในน้ำ สารเหล่านี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ มีผลต่อความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอดบุตร การไหลเวียนของโลหิต และส่งผลกระทบต่อวัยต่างๆ ภายใต้วงกาย

สถานที่ทำการศึกษานี้ได้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 11 และ อาคารศูนย์เครื่องมือ 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำหรับวิธีการวิจัยจะแบ่งเป็นสองส่วน ดังรูปที่ 3.1 ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และส่วนที่สองเป็นการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

3.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

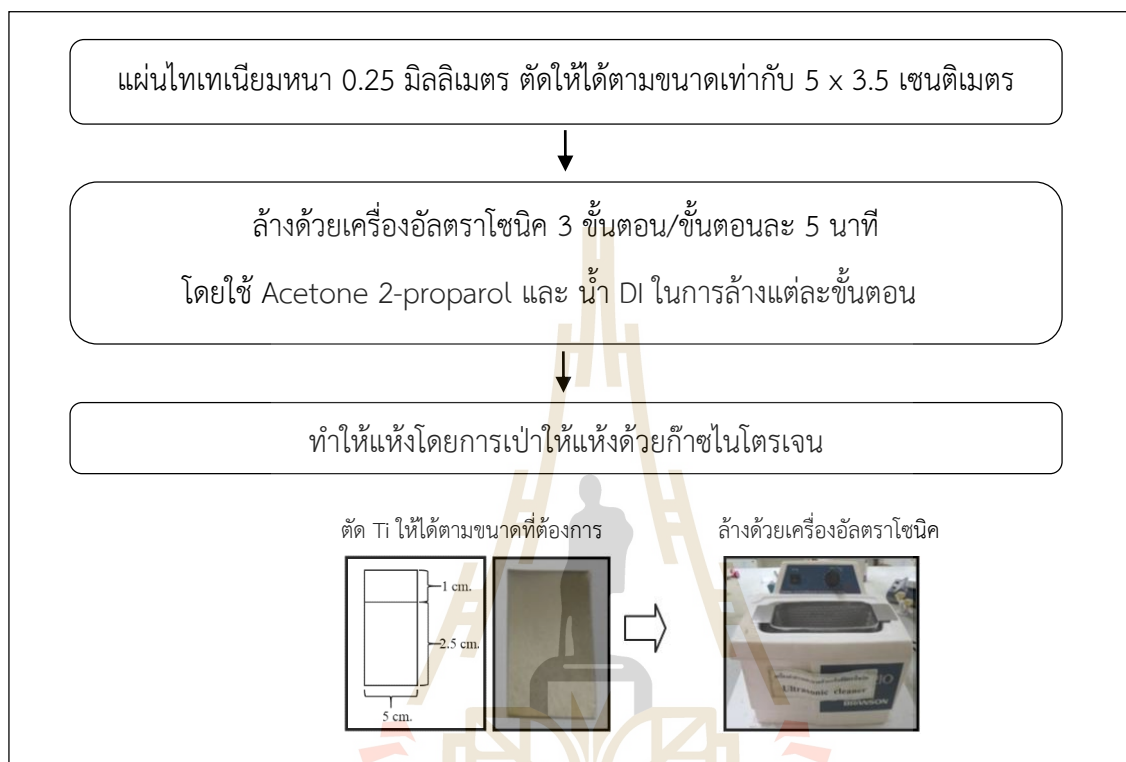
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาน สามารถทำได้โดยกระบวนการแอนโนดไดซ์เซชัน เป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียม มีลักษณะเป็นท่อนาน (Nanotubes) กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของแผ่นไทเทเนียม เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrodechemical cell) ซึ่งประกอบด้วยสอง ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นไทเทเนียม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

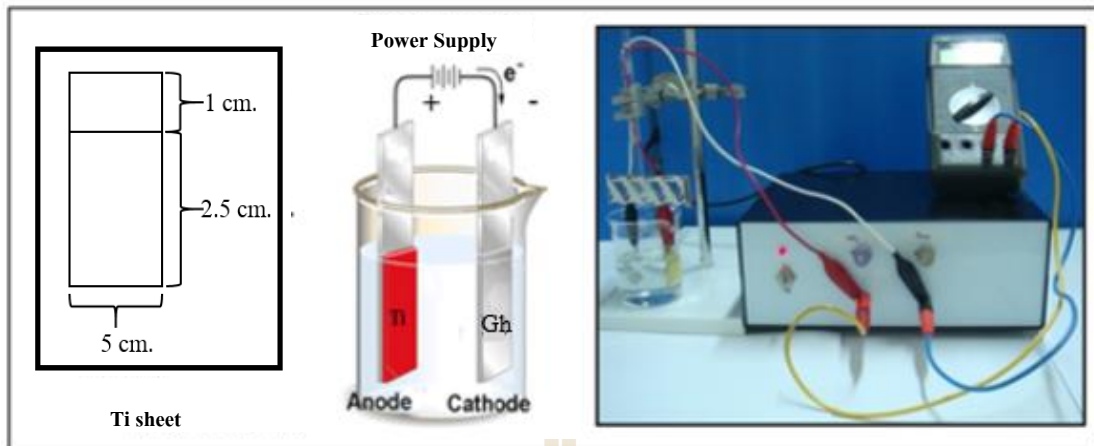
(1) ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันนั้น จะใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยกรรไกรให้ได้ขนาดที่ต้องการคือ ต้องการไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 12.50 ตารางเซนติเมตร ตัดแผ่นไทเทเนียมให้มีขนาด 5 x 3.5 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 17.50 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่สำหรับเกิดออกไซด์ขนาด 12.50 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลืออีก 5 ตารางเซนติเมตร จะใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ ในการทดลองแอนโนไดซ์เซชัน มีการควบคุมให้เกิดการแอนโนไดซ์เซชันเพียงด้านเดียว โดยทำการติดแคปตอนเทป (kapton tape) บนแผ่นไทเทเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดออกไซด์ โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ดังต่อไปนี้

การเตรียมแผ่นไทเทเนียม จะทำการเตรียมแผ่นไทเทเนียม ดังรูปที่ 3.2 โดยตัดแผ่นไทเทเนียมตามขนาดที่ต้องการคือ 5×3.5 เซนติเมตร นำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบนผิวหน้าแผ่นไทเทเนียมออก แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone แล้วล้างต่อด้วย 2-propanol และสุดท้ายล้างด้วยน้ำ DI ตามลำดับ จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้งเพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์อื่นบนพื้นผิวของไทเทเนียม

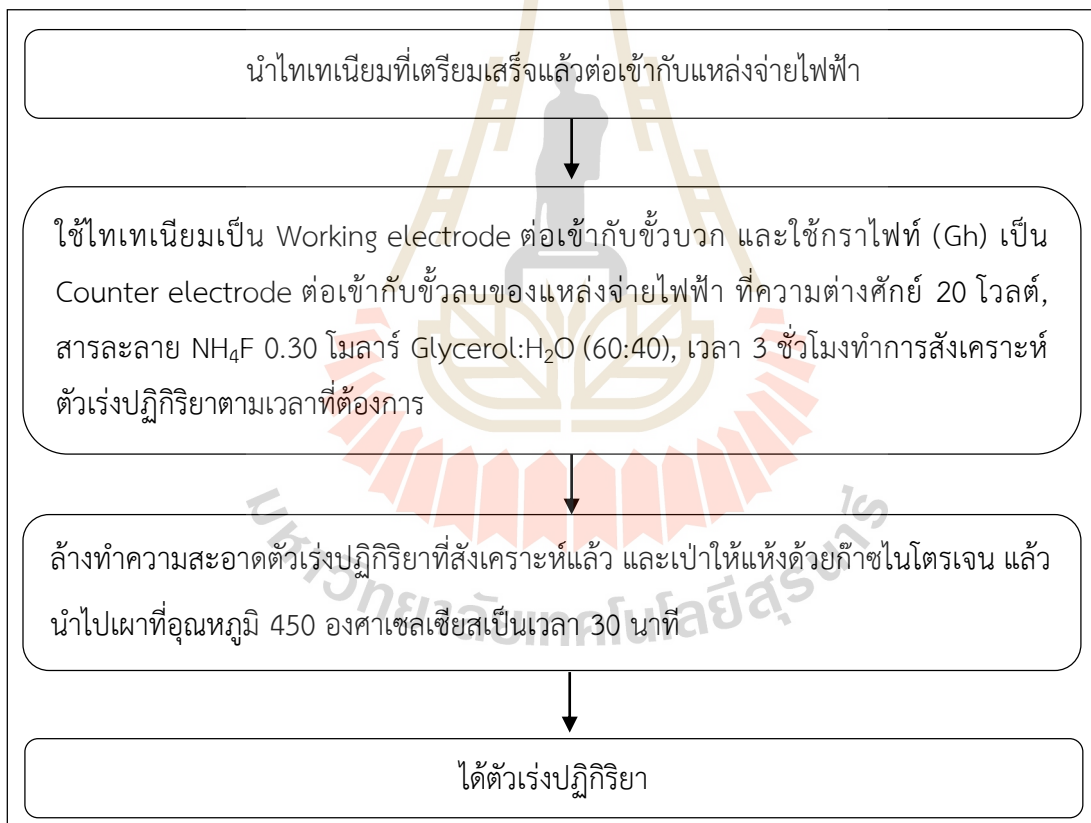


รูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

(2) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน มีลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โวลต์มิเตอร์ สายไฟ ไทเทเนียม (Ti) กราไฟท์ (Gh) สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารละลายนำไฟฟ้า คือ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นต้น ในการทดลองจะใช้แผ่นไทเทเนียมมาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และใช้กราฟไฟท์เป็นขั้วไฟฟาร่วม ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol: H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากที่สังเคราะห์เสร็จจะนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์อื่นบนพื้นผิวของไทเทเนียมหลังการสังเคราะห์ และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้คงคุณสมบัติของโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่มีลักษณะสัณฐานเป็นแบบอนาเทส (Anatase) (ศรัณญา, 2555) แสดงวิธีสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนดังรูปที่ 3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ จะนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสต่อไป

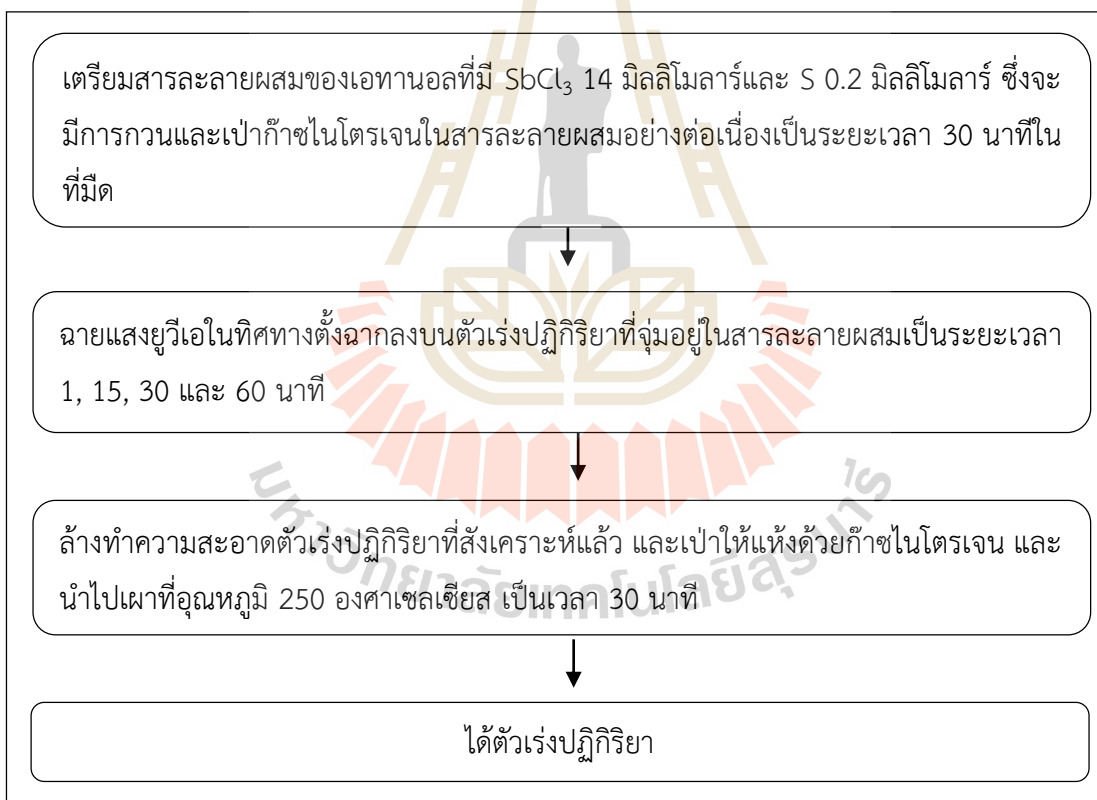


รูปที่ 3.3 ลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโอดิเซชัน



รูปที่ 3.4 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

(3) ขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานาเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล (visible) เพิ่มมากขึ้น จะใช้การปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (Sb_2S_3) กับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานา โดยประยุกต์ตามวิธีของ Zhong *et al.*, (2015) มีขั้นตอนดังนี้ หลังจากได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานาที่ทำการสังเคราะห์ตามวิธีข้างต้นเรียบร้อยแล้ว จะนำไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานา จุ่มลงในสารละลายผสมของเอทานอลที่มี SbCl_3 14 มิลลิโมลาร์และ Sb_2S_3 0.2 มิลลิโมลาร์ ซึ่งจะมีการกวนผสมและเป่าก๊าซไนโตรเจนในสารละลายผสมอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 นาทีในที่มืด จากนั้นทำการฉายแสงยูวีเอในทิศทางตั้งฉากลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานาที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยหลอดไฟฮาโลเจน (Philips floodlight 500W) และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์สำหรับการนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสต่อไป แสดงวิธีสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

หลังจากทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์แล้ว จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว (Morphology) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นโดยเครื่องมือจะบันทึกอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้และแปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์แสดงเป็นภาพบนหน้าจอ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเป็น 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) ร่วมด้วยเพื่อหาค่าองค์ประกอบของวัสดุชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่มีการตรวจวัด

3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นให้ไปกระทบกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่ถูกยิงออกไปยังมุมที่แตกต่างกัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการตรวจสอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้

3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

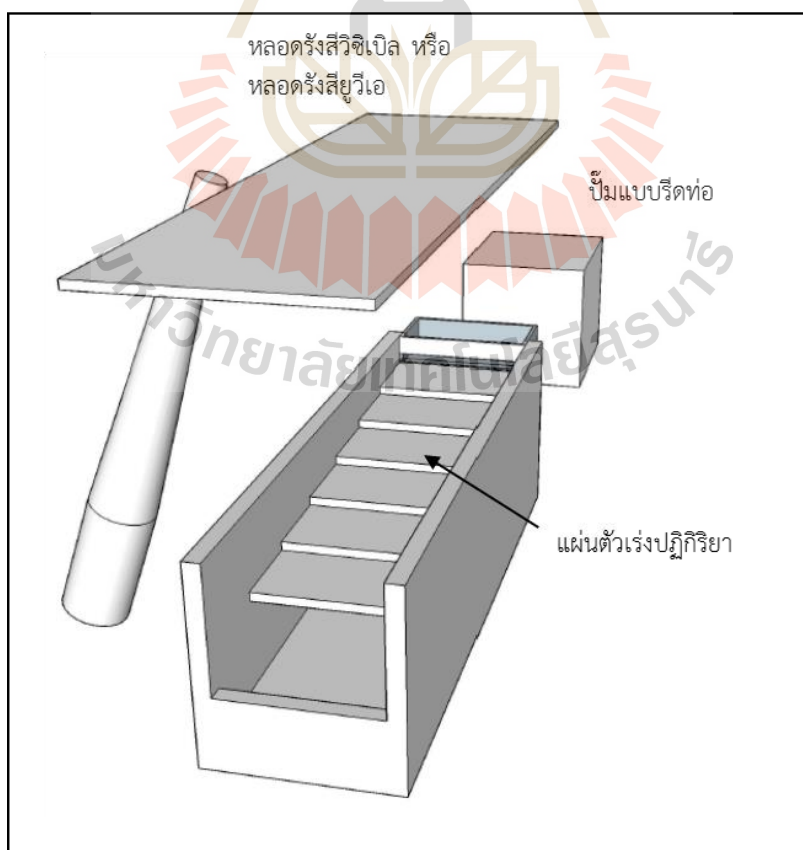
เครื่องมือ X-Ray Fluorescence Spectrometry สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เครื่องมือนี้ทำงานโดยใช้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิจากหลอดรังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนผิวตัวอย่าง เป็นผลทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกมาจากอะตอมในรูปแบบโฟโตอิเล็กตรอน ทำให้เกิดช่องว่างในวงอิเล็กตรอนชั้น อะตอมของวัสดุนั้นจะกลับเข้าสู่สภาวะเสถียร ทำให้มีการเปลี่ยนระดับพลังงานแทนช่องว่างนั้น เกิดการปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิ ซึ่งเรียกว่าฟลูออเรสเซนซ์ รังสีที่เกิดขึ้นนี้จะถูกตัวจับสัญญาณวัดค่าพลังงานออกมาทำให้ได้ข้อมูลของธาตุต่าง ๆ ที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.4 การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงยูวีเอและแสงวิซิเบิลด้วยเครื่อง Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

เครื่อง Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในช่วงคลื่นยูวีเอและช่วงคลื่นวิซิเบิลได้ โดยใช้คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีเอหรือช่วงรังสีวิซิเบิลที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า โดยจะแสดงผลออกมาเป็นค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ซึ่งสามารถระบุการตอบสนองต่อแสงยูวีเอและแสงวิซิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

3.3 ถังปฏิกิริยาสำหรับใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโตะตะไลซิส

สำหรับการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะใช้ชุดการทดลองหรือถังปฏิกิริยาในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโตะตะไลซิส ซึ่งถังปฏิกิริยามีส่วนประกอบดังนี้ (1) ภายในตัวถังปฏิกิริยาภายในด้านล่างจะมีไว้ใส่น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (2) พื้นผิวด้านบนที่เป็นชั้นบันไดจะมีไว้เพื่อวางแผ่นชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยาซ้อนกันหลายแผ่น (3) น้ำตัวอย่างจะถูกดูดโดยปั๊มชนิดรีดท่อให้ไหลบนแผ่นชิ้นงานที่วางอยู่บนชั้นบันได (4) ด้านบนเป็นอุปกรณ์จำลองแสงวิซิเบิลหรือแสงยูวีเอที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบการฆ่าเชื้อโรค

3.4 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้น้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นโดยใช้น้ำ D.I. ผสมกับเชื้อแบคทีเรียที่ทำการเติมลงไป ซึ่งเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ (1) แบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia Coli (E.coli)* และ (2) แบคทีเรียแกรมบวก *Fecal Streptococcus* ซึ่งมีวิธีการเตรียมเชื้อแบคทีเรียดังนี้

3.4.1 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของเชื้อแบคทีเรียกับความหนาแน่นของเซลล์

ในการเตรียมน้ำตัวอย่างที่จะใช้ในการทดลองนั้นจำเป็นต้องทราบปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นอย่างคร่าวๆ โดยจะต้องเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว จึงเลือกใช้วิธีการวัดจำนวนแบคทีเรียทางอ้อม ด้วยการใช้เครื่อง Spectrophotometer โดยวัดความขุ่นของเซลล์ (Cell Density) ที่เจริญอยู่ในน้ำตัวอย่างและแสดงผลออกมาเป็น Absorbance หรือ Optical density (O.D.) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้เชื้อแบคทีเรีย *E.coli* มาทำการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้หัวถ่ายเชื้อ เชื้อเชื้อ *E.coli* (ที่เลี้ยงไว้บน nutrient agar) ลงใน flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมี Nutrient Broth อยู่
- 2) เขย่า flask ด้วยเครื่องเขย่า ความเร็ว 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำเชื้อ *E.coli* ที่ได้ ปิเปตผสมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ D.I. ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 4) นำไปสร้างกราฟระหว่างความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม
- 5) นำไปสร้างกราฟระหว่างจำนวนเชื้อแบคทีเรียกับความหนาแน่นของเซลล์ (Optical Density) เพื่อเลือกปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่จะทำการทดลอง

3.4.2 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย *E.coil*

- 1) เริ่มจากการใช้หัวถ่ายเชื้อ เชื้อเชื้อ *E.coli* ที่เลี้ยงไว้ในบน nutrient agar ใส่ลงใน flask ที่มี อาหารเหลว (nutrient broth) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำเชื้อ *E.coli* ที่ได้ ปิเปตผสมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ D.I. ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ซึ่งจะเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบให้มีปริมาณตามที่ได้เลือกไว้ในหัวข้อ 3.4.1

3.4.3 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus*

- 1) เริ่มจากการใช้หัวถ่ายเชื้อ เชื้อเชื้อ *Fecal Streptococcus* ที่เลี้ยงไว้ในบน nutrient agar ใส่ลงใน flask ที่มี อาหารเหลว (nutrient broth) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3) นำเชื้อ *Fecal Streptococcus* ที่ได้ ปิเปตผสมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ D.I. ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ซึ่งจะเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบให้มีปริมาณตามที่ได้เลือกไว้ในหัวข้อ 3.4.1

3.5 การศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้น้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในหัวข้อ 3.4 โดยจะทำการศึกษากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำกับน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ดังนี้

3.5.1 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

1) น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ดังหัวข้อที่ 3.4.2 (*E.coli*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาปริมาตร 200 มิลลิลิตร

2) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองที่ 3.1 ติดตั้งลงบนชั้นบันไดทั้ง 6 ชั้น (6 แผ่น) ในถังปฏิกิริยา โดยมีสภาวะการทดลองดังแสดงตารางที่ 3.1 พลังงานแสงที่ใช้เป็นหลอดไฟแสงวิซิ-เบิล 10 วัตต์และแสงหลอดไฟยูวีเอ 10 วัตต์ กำหนดอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที

3) เก็บน้ำตัวอย่างทุก 10 นาทีเป็นเวลา 60 นาที

4) ทำการเจือจางแบคทีเรียด้วยวิธี Serial dilution และใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบด้วยวิธี Membrane Filter Technique (*Fecal Coliform*) โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมงและ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงอ่านผล

6) การอ่านผลจะทำการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อ *E.coli* ที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ โดยจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการ สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	แสงวิซิเบิล
	แสงยูวีเอ
	ไม่มีแสง
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูบท่อนานโน	แสงวิซิเบิล
	แสงยูวีเอ
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูบท่อนานโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์	แสงวิซิเบิล
	แสงยูวีเอ

3.5.2 การศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

1) น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ดังหัวข้อที่ 3.4.2 (*E.coli*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาปริมาตร 200 มิลลิลิตร

2) ในการทดลองจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.1 ซึ่งจะกำหนด อัตราการไหล 120 ลิตรต่อนาที โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.2

3) เก็บตัวอย่างน้ำทุก 10 นาทีในเป็นเวลา 60 นาที

4) ทำการเจือจางแบคทีเรียด้วยวิธี Serial dilution และใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบด้วยวิธี Membrane Filter Technique (Fecal Coliform) โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมงและ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงอ่านผล

6) การอ่านผลจะทำการนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นของเชื้อ *E.coli* บนจานเพาะเชื้อโดยจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการด้านล่าง

สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลา
นั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ	พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางเซนติเมตร)
มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	แสงวิซิเบิล	25 (2 แผ่น)
		50 (4 แผ่น)
		75 (6 แผ่น)

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.5.1

3.5.3 การศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

1) น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ดังหัวข้อที่ 3.4.2 (*E.coli*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาปริมาตร 200 มิลลิลิตร

2) ในการทดลองจะเลือกใช้พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาดีที่สุดในหัวข้อที่ 3.5.2 โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.3

3) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 10 นาทีในเป็นเวลา 60 นาที

4) ทำการเจือจางแบคทีเรียด้วยวิธี Serial dilution และใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบด้วยวิธี Membrane Filter Technique (Fecal Coliform) โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5) นำไปปั่นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมงและ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงอ่านผล

6) การอ่านผลจะทำการนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นของเชื้อ *E.coli* บนจานเพาะเชื้อ โดยจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการด้านล่าง

สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.3 สภาวะการทดลองการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coil*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ	อัตราการไหล มิลลิเมตร/นาที
มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	แสงวิซิเบิล	130
		200
		300
	แสงยูวีเอ	130
		300
		500

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.5.1 และเลือกใช้พื้นที่ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5.2

3.5.4 การศึกษาค่าผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coil*) ในน้ำ

ในการการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนการศึกษาถึงผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

3.5.4.1 ศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coil*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที

1) น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ตั้งหัวข้อที่ 3.4.2 (*E.coli*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาปริมาตร 200 มิลลิเมตร

2) ในการทดลองจะเลือกใช้สภาวะการทดลองและเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ผิว อัตราการไหลและแหล่งกำเนิดแสง ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.1, 3.5.2 และ 3.5.3 ตามลำดับโดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.4

3) ทำการเก็บตัวอย่างทุก 10 นาทีในเป็นเวลา 60 นาทีและทุก 60 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที

4) ทำการเจือจางแบคทีเรียด้วยวิธี Serial dilution และใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบด้วยวิธี Membrane Filter Technique (Fecal Coliform) โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมงและ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงอ่านผล

6) การอ่านผลจะทำการนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นของเชื้อ *E. coli* โดยจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการด้านล่าง

สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทดลองการศึกษาค่าผลของผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำกรณที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ	ระยะเวลา (นาที)
มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	มีแสง**	10
		20
		30
		40
		50
		60
		90
		120
		180
		240
300		

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาและแสงที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่

3.5.1 และเลือกใช้พื้นที่ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5.2

** แหล่งกำเนิดแสงและอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.3

3.5.4.2 ศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง

1) นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ดังหัวข้อที่ 3.4.2 (*E.coli*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาปริมาตร 200 มิลลิลิตร

2) ในการทดลองจะเลือกใช้สภาวะการทดลองและเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ผิว อัตราการไหลและแหล่งกำเนิดแสง ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.1, 3.5.2 และ 3.5.3 โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.5

3) ทำการเก็บตัวอย่างทุก 10 นาทีในเป็นเวลา 60 นาที โดยจะทำทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และจะใช้แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นเดิมในการทดลอง

4) ทำการเจือจางแบคทีเรียด้วยวิธี Serial dilution และใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบด้วยวิธี Membrane Filter Technique (Fecal Coliform) โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมงและ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงอ่านผล

6) การอ่านผลจะทำการนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้น ของเชื้อ *E.coli* บนจานเพาะเชื้อโดยจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการด้านล่าง

สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.5 สภาวะการทดลองการศึกษามผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง

ครั้งที่	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ	ระยะเวลา (นาที)
1	มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	มีแสง**	60
2	มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	มีแสง**	60
3	มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	มีแสง**	60

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาและแสงที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.5.1 พื้นที่ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5.2

** แหล่งกำเนิดแสงและอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.5.3

3.5.5 การศึกษาผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ

- 1) นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ดังหัวข้อที่ 3.4.3 (*Fecal Streptococcus*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกริยาปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 2) ในการทดลองจะเลือกใช้สภาวะการทดลองและเลือกใช้พื้นที่ผิว และอัตราการไหล และแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.2 และ 3.5.3 โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.6
- 3) ทำการเก็บตัวอย่างทุก 10 นาทีเป็นเวลา 60 นาที
- 4) ทำการเจือจางแบคทีเรียด้วยวิธี Serial dilution และใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบด้วยวิธี Membrane Filter Technique โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ KF STREPTO - COCCUS AGAR โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ
- 5) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 44-48 ชั่วโมง จึงอ่านผล
- 6) การอ่านผลจะทำการนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้น ของเชื้อ *Fecal Streptococcus* บนจานเพาะเชื้อและจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการด้านล่าง
 สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.6 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	ไม่มีแสง
	แสงยูวีเอ
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน	แสงยูวีเอ
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์	แสงยูวีเอ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส นั้น จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน และการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ด้วยวิธีโฟโตเดบโพสิชัน (photodeposition) ซึ่งเมื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเสร็จแล้วจะนำไปศึกษาคุณลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ (1) การศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา (2) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา (3) วิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา และ (4) การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังมีผลการทดลองดังนี้

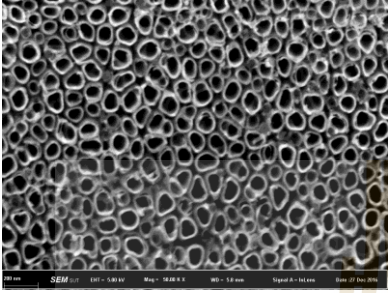
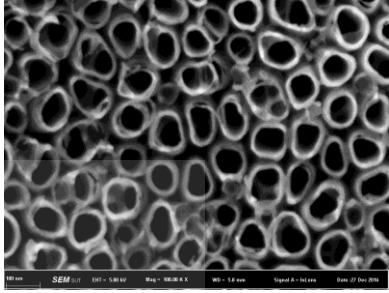
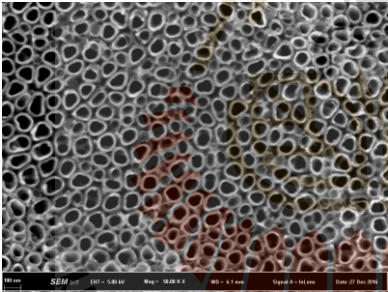
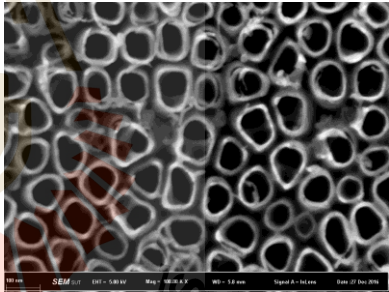
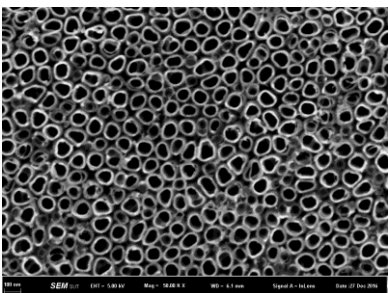
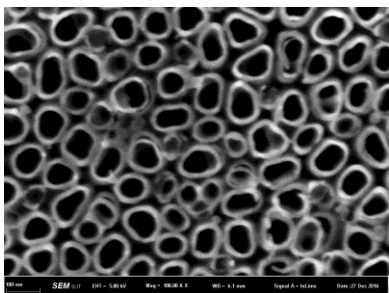
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา

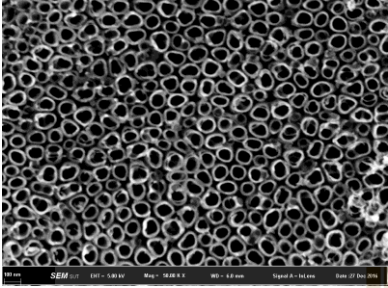
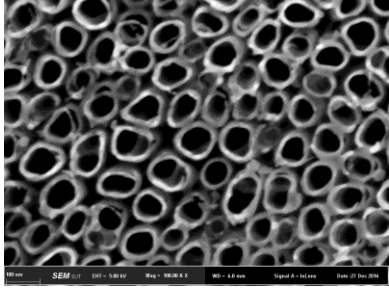
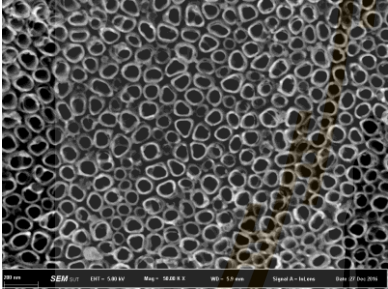
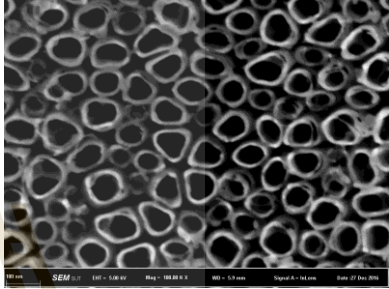
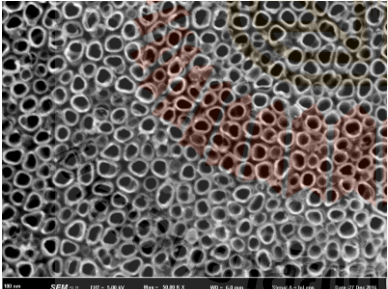
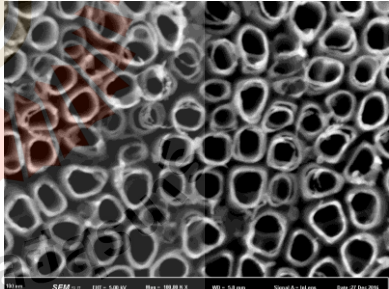
เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แบ่งการสังเคราะห์ออกเป็นการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน และการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนโดยการปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดบโพสิชัน ดังนั้นผลการศึกษาในกระบวนการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อดังนี้

4.1.1.1 ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันนั้น จะใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตรและกำหนดให้มีพื้นที่สำหรับเกิดออกไซด์ขนาด 12.50 ตารางเซนติเมตร โดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) 0.30 โมลาร์ ของ NH_4F , Glycerol : H_2O (60 : 40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นก็จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน จากนั้นจะนำไปศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้อง FE-SEM ได้ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM

แผ่นที่	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
1		
2		
3		

แผ่นที่	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
4		
5		
6		

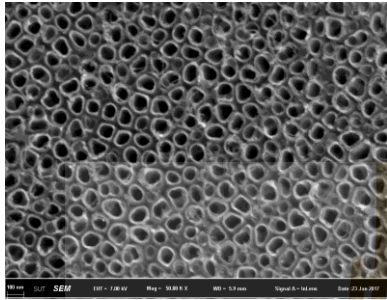
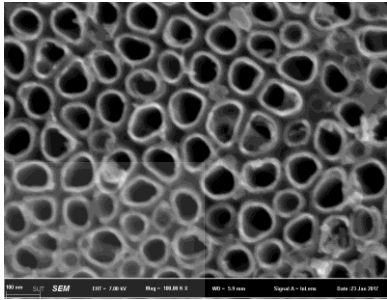
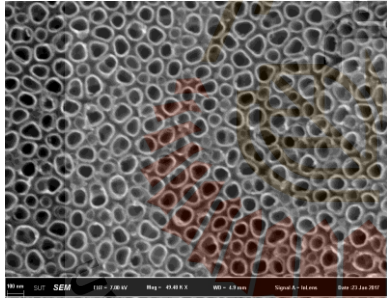
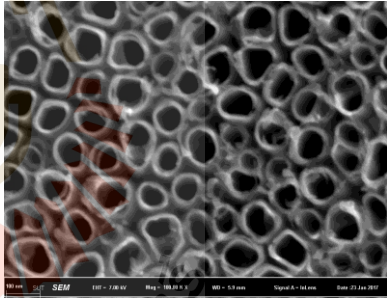
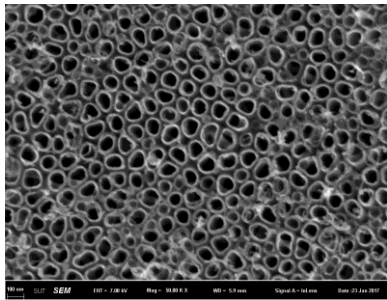
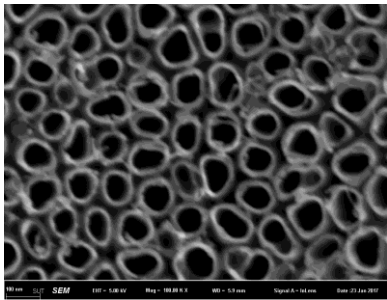
จากผลการทดลองในตาราง 4.1 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง FE-SEM ที่กำลังขยายของเครื่อง 50,000 เท่า พบว่าลักษณะออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นรูปร่างจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น มีลักษณะของท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า จะเห็นว่าลักษณะท่อที่เกิดขึ้นเป็นท่อที่แยกจากกันค่อนข้างชัด ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ ในการวิเคราะห์ FE-SEM ร่วมกับการใช้เทคนิค Tube Density จะพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอนโนไดซ์เซชัน โดยควบคุมสถานะในการสังเคราะห์ให้เหมือนกันทุกครั้งที่คือ ศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลา และความเข้มข้นของสารละลาย พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 6 แผ่น จะให้ลักษณะสัณฐาน

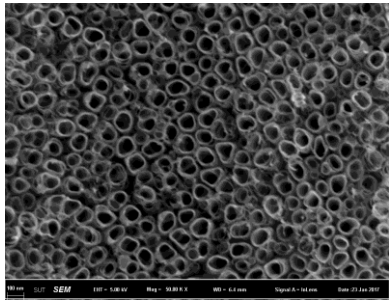
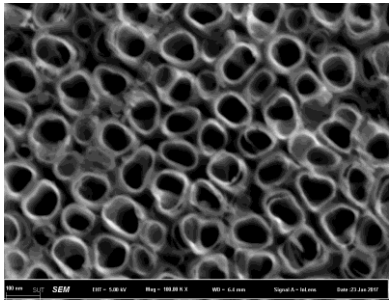
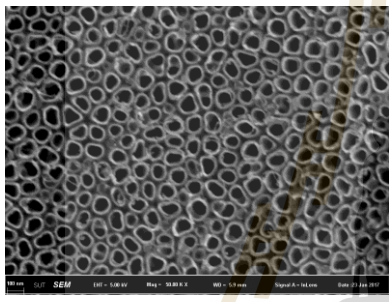
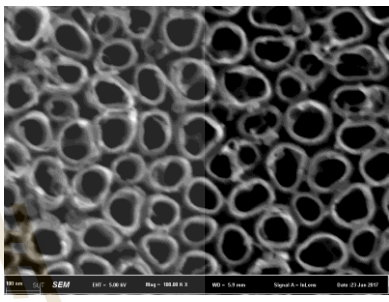
ของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่มีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด ซึ่งในขนาดพื้นที่ 8.86×10^5 ตารางนาโนเมตร จะเกิดจำนวนท่อของไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ 82 ± 5 ท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 20 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร สอดคล้องกับการศึกษาของ ศรีัญญา, (2555) ที่ทำการทดลองการแอโนไดซ์เซชันในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol : H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ มีลักษณะของท่อชัดเจน เป็นท่อที่แยกจากกันชัดเจนและมีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ การศึกษาของ Sun *et al.*, (2011) ได้ทำการทดลองแอโนไดซ์เซชันในสารละลาย 0.3 M NH_4F ใน ethylene glycol : H_2O (98 : 2) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ระยะเวลา 120 นาที จะทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานขึ้น และการศึกษาของ Kontos *et al.*, (2012) โดยมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชันในสารละลายนำไฟฟ้า 0.5 M NH_4F ใน ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า จะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาน โดยความหนาของออกไซด์มีขนาด 7, 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.1.1.2 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition)

ในขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล (visible) เพิ่มมากขึ้นด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน จะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ได้จากสังเคราะห์จากหัวข้อ 4.1.1.1 มาทำการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยจะนำไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานจุ่มลงในสารละลายผสมที่มี SbCl_3 14 มิลลิโมลาร์และ Sulfer 0.2 มิลลิโมลาร์ และทำการฉายแสงลงในทิศทางตั้งฉากบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ แล้วจึงนำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง FE-SEM ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM

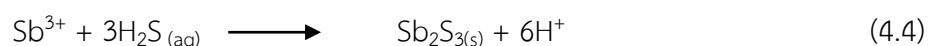
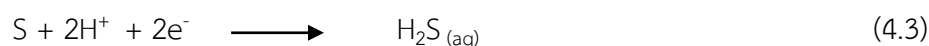
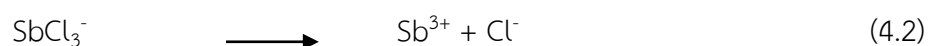
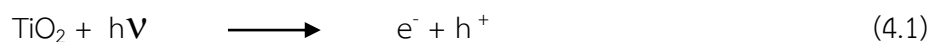
เวลา	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
0 นาที		
1 นาที		
15 นาที		

เวลา	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
30 นาที		
60 นาที		

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์รูพรุนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ด้วยกล้อง FE-SEM พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์รูพรุนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ทั้ง 6 แผ่น มีลักษณะที่คล้ายกันทั้งหมด และยังมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่คล้ายกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูพรุนนาโน ซึ่งในการใช้เทคนิค Tube Density ก็พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์รูพรุนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ให้ข้อมูลของ Tube Density ที่ใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูพรุนนาโน โดยที่ขนาดพื้นที่ 8.86×10^5 ตารางนาโนเมตร จะเกิดจำนวนท่อของไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ 80 ± 4 ท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 20 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Meng *et al.*, (2013) ที่เมื่อทำการปะติดแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัณฐานวิทยาเนื่องจากแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ปะติดลงไปมีขนาดเล็กมากไม่สามารถศึกษาได้ด้วยการใช้เทคนิค FE-SEM เพียงอย่างเดียว

ดังนั้นในขั้นตอนของการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาจะใช้เทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) เพื่อหาค่าประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่มีการตรวจวัด โดยผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูพรุนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จะเกิดตำแหน่งของธาตุ (จุดสีสว่างในพื้นที่สีดำ) Sb และ S กระจาย

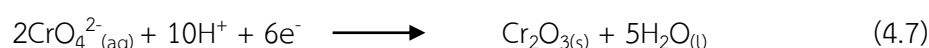
อยู่ที่พื้นผิวของของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ และจากการสังเกตจะพบว่าธาตุ Sb และธาตุ S จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากตามระยะเวลาในการฉายแสง ตั้งตั้งแต่ 1 นาทีถึง 60 นาที ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (Photodeposition) เกิดขึ้นดังนี้ (Avilez *et al.*, 2016)



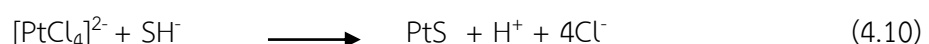
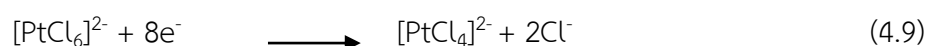
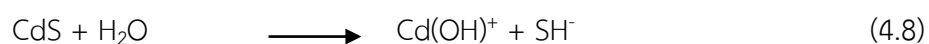
ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับพลังงานแสงก็จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังสมการที่ 4-1 ในสารละลายผสม (SbCl_3 และ S) สาร SbCl_3 จะเกิดการแตกตัวได้ Sb^{3+} และ Cl^- ดังสมการที่ 4.2 และสาร S รวมกับ H^+ ได้ H_2S ที่อยู่ในรูปสารละลายดังสมการ 4.3 ต่อมาจะเกิดการรวมกันของ Sb^{3+} และ H_2S ทำให้เกิดการปะติดด้วยแอนติโมนีลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนดังสมการที่ 4.4 ซึ่งตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนหลังจากการผ่านกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) แล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะคล้ายกับงานวิจัยของ Wenderich *et al.*, (2016) ที่อธิบายถึงกลไกของกระบวนการโฟโตเดโพสิชันว่าเกิดจากการที่สารที่เราต้องการให้ปะติดบนตัวเร่งปฏิกิริยามารับอิเล็กตรอน และเปลี่ยนสถานะจากสารละลายเป็นของแข็งติดอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ 4.5



ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Busser *et al.*, (2012) ที่ได้ทดลองทำให้โรเดียมและโครเมียมออกไซด์นั้นปะติดอยู่บนแคลเซียมออกไซด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชันดังสมการ 4.6-4.7

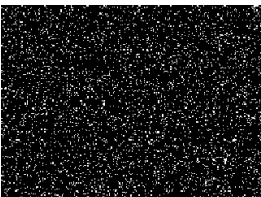
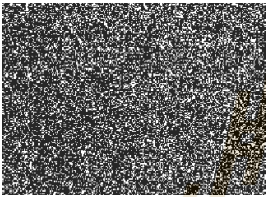

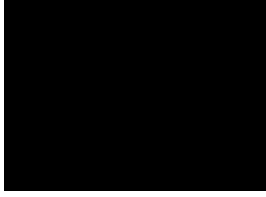
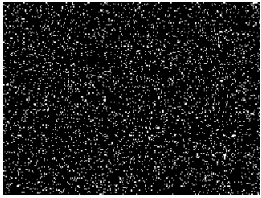
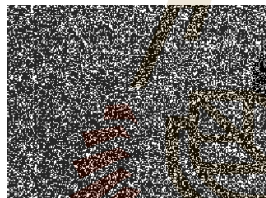
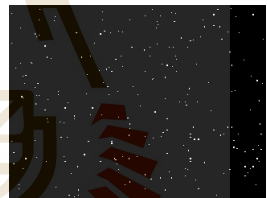

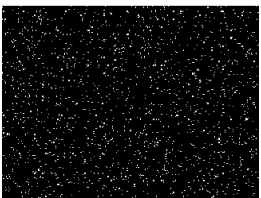
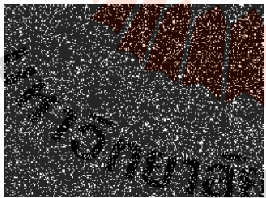




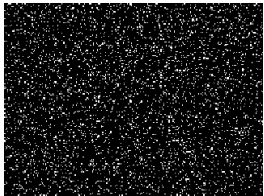
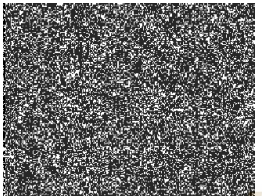
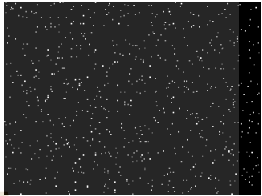

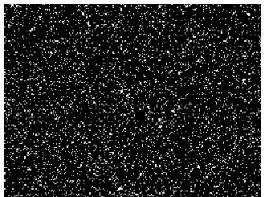
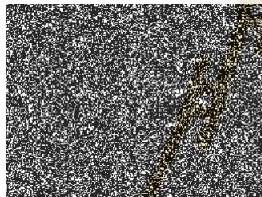
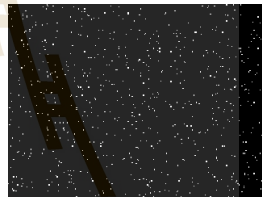

และคล้ายกับงานวิจัยของ jin *et al.*, (2015) ได้ทำการทดลองปะติด Pt ลงบน CdS โดยใช้สารละลาย $[\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชันดังสมการ 4.8-4.10

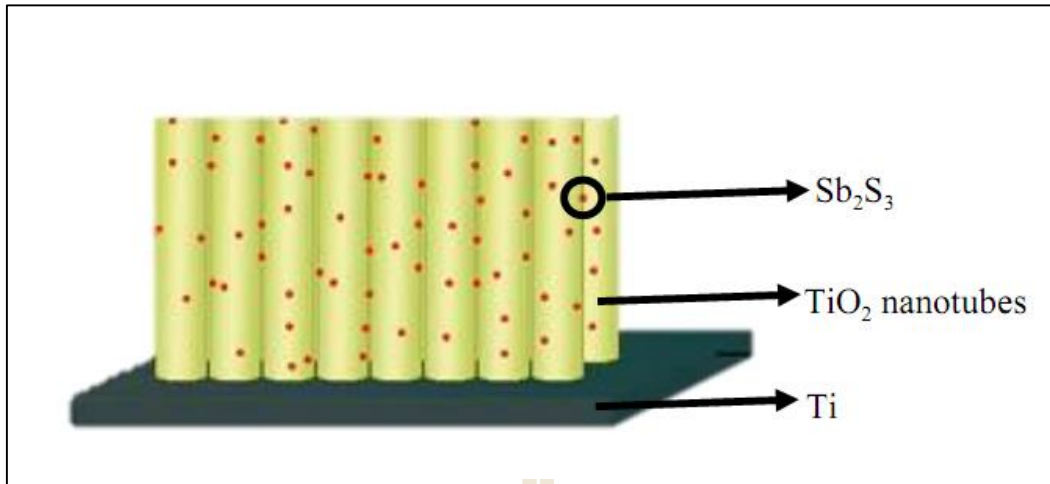




ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy)

ธาตุ เวลา	Ti	O	Sb	S
0 นาที				
1 นาที				
15 นาที				

ธาตุ เวลา	Ti	O	Sb	S
30 นาที				
60 นาที				



รูปที่ 4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry) จากตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) โดยการฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนมีปริมาณของไทเทเนียมอยู่ร้อยละ 59.950 และปริมาณออกซิเจนอยู่ร้อยละ 40.050 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จะมีปริมาณของแอนติโมนีเท่ากับร้อยละ 0.040, 0.062, 0.067, 0.070 ที่ระยะเวลาการฉายแสงเท่ากับ 1, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ ส่วนปริมาณของซัลเฟอร์เท่ากับร้อยละ 0.008, 0.011, 0.015, 0.019 ที่ระยะเวลาการฉายแสงเท่ากับ 1, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณของธาตุแอนติโมนีและธาตุซัลเฟอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 1 นาทีจนถึง 60 นาที แต่จากการสังเกตจะพบว่าปริมาณของธาตุแอนติโมนีและธาตุซัลเฟอร์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงนาที่ที่ 15 ถึงนาที่ที่ 30 (ปริมาณของธาตุแอนติโมนีเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.005) และนาที่ที่ 30 ถึงนาที่ที่ 60 (ปริมาณของธาตุแอนติโมนีเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.003) ในขณะที่จากนาที่ที่ 1 ถึงนาที่ที่ 15 ธาตุแอนติโมนีเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 0.022

ซึ่งระยะเวลาในการเกิดกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนจะมีผลกับการปะติดของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณของ Sb_2S_3 ก็จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ จนเต็มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานอ ดังนั้นจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ Sb และ S บนตัวเร่งปฏิกิริยาก็ จะสามารถคาดการณ์ได้ว่า ที่ระยะเวลาในการทำโฟโตเดบโพลีชันตั้งแต่ 15 นาที จนถึง 30 นาทีทำให้ ได้ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีธาตุ Sb และ S ไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ระยะเวลาการทำโฟโตเดบ โพลีชันเพียง 1 นาที จะทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีธาตุ Sb และ S ในปริมาณที่ต่างกันค่อนข้างชัดเจน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของธาตุ Ti, O, Sb and S ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานอ และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

Element Sample	Ti (%)	O (%)	Sb (%)	S (%)
TiO ₂ 0 min	59.950	40.050	None	None
TiO ₂ /Sb ₂ S ₃ 1 min	59.909	40.043	0.040	0.007
TiO ₂ /Sb ₂ S ₃ 15 min	59.889	40.038	0.062	0.011
TiO ₂ /Sb ₂ S ₃ 30 min	59.876	40.042	0.067	0.015
TiO ₂ /Sb ₂ S ₃ 60 min	59.875	40.036	0.070	0.019

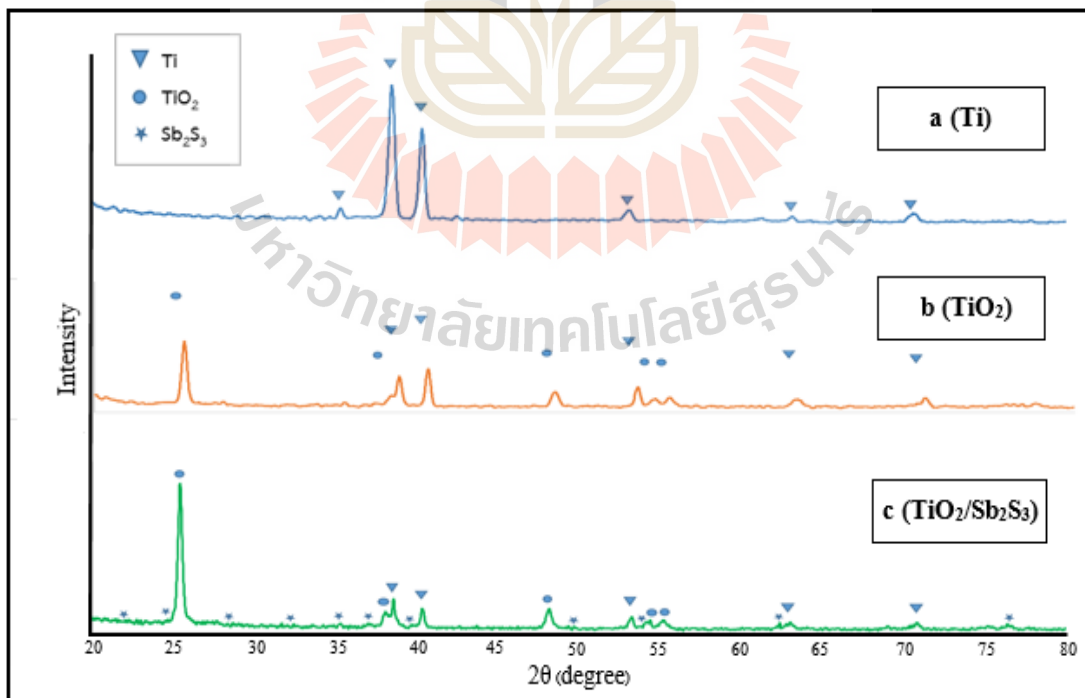
4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานอที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน และ ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานอที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จะใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, Rigaku D/ Max 2400) โดยใช้ Cu K α ($\lambda = 1.5406$) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ใช้การสแกนมุมละ 1.0 องศา ในโหมด angle 2Theta ที่ตำแหน่ง 20 - 80 องศา

จากผลการทดสอบจะพบ XRD pattern ของแผ่นไทเทเนียม (Substrate) แสดงดังรูปที่ 4.2 (a) แสดงลักษณะผลึกของแผ่นไทเทเนียม JPCDS NO. 44-1294 เท่ากับ 35.16°, 38.49°, 40.00°, 53.06°, 63.03° และ 70.68° (ให้สัญลักษณ์เป็นรูปสามเหลี่ยม)

จากรูปที่ 4.2 (b) แสดง XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดซ์เซชันใน สารละลายนำไฟฟ้า 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol: H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะให้ XRD pattern ที่เป็นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส (JPCDS NO. 21-1272) ปรากฏมุม 2θ เท่ากับ 25.15° , 37.88° , 48.12° , 53.90° และ 54.15° (ให้สัญลักษณ์เป็นรูปวงกลม) ซึ่งจากโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนี้ งานวิจัยหลายชิ้นได้นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปเนื่องจากสามารถให้การตอบสนองแสงได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น (Paola *et al.*, (2008), Reijnders *et al.*, (2008), Tian *et al.*, (2009), Shen *et al.*, (2011), Zeng *et al.*, (2011), Yu *et al.*, (2012))

จากรูปที่ 4.2 (c) แสดง XRD pattern ของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ โดยทำการฉายแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จาก XRD pattern (JCPDS No. 42-1393) จะปรากฏมุม 2θ เท่ากับ 25.06° , 28.68° , 32.29° , 35.59° , 37.12° , 39.49° , 50.97° , 54.22° , 62.26° และ 76.80° (ให้สัญลักษณ์เป็นรูปดอกจัน) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Zhong *et al.*, 2015 พบว่าการทำให้แอนติโมนีไตรซัลไฟด์เกิดเป็นผลึก (Crystallinity) จะทำให้การตอบสนองต่อแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นได้ดีกว่าแบบที่ไม่เกิดผลึกของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

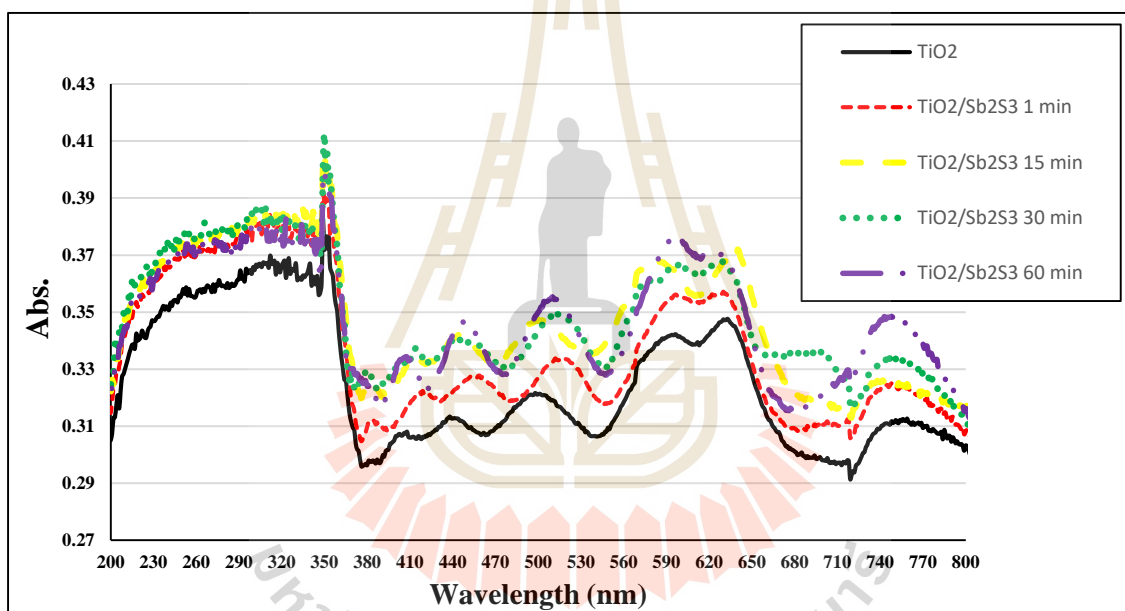
4.1.4 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาน และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะทำการตรวจวัดทั้งในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและช่วงคลื่นวิซิเบิล (200-800 นาโนเมตร) โดยใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectra (DRS) ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer, UV-2550 โดยมีผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 แบ่งเป็น รูปที่ 4.3 (a) เป็นการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาน, รูปที่ 4.3 (b) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ทำการฉายแสงเป็นเวลา 1 นาที, รูปที่ 4.3 (c) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ทำการฉายแสงเป็นเวลา 15 นาที และรูปที่ 4.3 (d) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ทำการฉายแสงเป็นเวลา 30 นาที

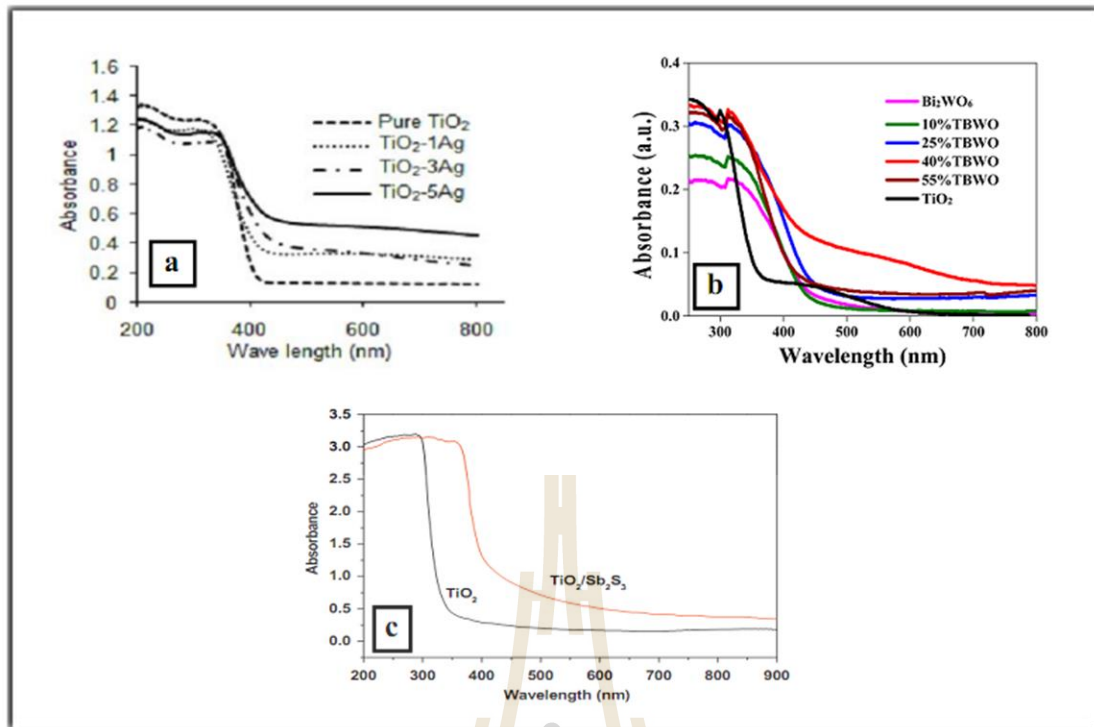
จากรูปที่ 4.3 (a) จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานจะให้การดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (ต่ำกว่า 380 นาโนเมตร) ซึ่งในช่วงแสงวิซิเบิล (380-800 นาโนเมตร) ก็ให้การดูดกลืนแสงเพียงเล็กน้อย แต่หลังจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานด้วยการปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ทำให้การดูดกลืนแสงทั้งในช่วงแสงยูวีและแสงวิซิเบิลเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาน และซึ่งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.3 (c), รูปที่ 4.3 (d), รูปที่ 4.3 (e) จะพบว่าการดูดกลืนแสงทั้งช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงวิซิเบิลที่เวลา 15 30 และ 60 นาที จะมีค่าดูดกลืนแสงของทั้ง 3 สภาวะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลของการหาปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF จากหัวข้อที่ 4.1.2 จะพบว่าการปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) ในเวลา 15 30 และ 60 นาทีจะมีปริมาณของธาตุ Sb และ S ที่ใกล้เคียงกันจึงเป็นผลที่ทำให้การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดมีค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกันไปด้วย ดังนั้นในการทดลองนี้จะเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) เป็นเวลา 15 นาทีเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้การดูดกลืนแสงที่สูง การให้การดูดกลืนแสงที่สูงก็หมายความว่า การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัยที่เลือกใช้เทคนิค DRS ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปเช่น งานวิจัยของกรกนก, (2016) ที่ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 , $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ ด้วยวิธี Sol-gel และได้เลือกตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2\text{-5Ag}$ ไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปเนื่องจากให้ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด ดัง

แสดงรูปที่ 4.4 (a) งานวิจัยของ Yanan *et al.*, (2016) ในรูปที่ 4.4 (b) ได้ทำการสังเคราะห์ TBWO ด้วยวิธี Hydrothermal พบว่า TBWO 40% ให้การดูดกลืนแสงที่มากที่สุดจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไปทำการทดลองขั้นตอนต่อไป และงานวิจัยของ Meng *et al.*, (2013) ในรูปที่ 4.4 (c) ได้ทำการสังเคราะห์ TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ด้วยวิธี Hydrothermal พบว่าการเติม Sb_2S_3 จะทำให้การดูดกลืนแสงทั้งในช่วงยูวีและวิสิเบิลนั้นเพิ่มมากขึ้น และจะเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ไปทำการศึกษาต่อเนื่องจากให้การดูดกลืนแสงที่มากกว่า TiO_2

สำหรับในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะเป็นการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะนำไปทดสอบการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมี 2 ชนิด คือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนและ (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.3 การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์



รูปที่ 4.4 งานวิจัยที่เลือกใช้เทคนิค DRS ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป (a) TiO₂ และ TiO₂-Ag (กรรณก, 2016), (b) TBWO (Yanan *et al.*, 2016), (c) TiO₂ และ TiO₂/Sb₂S₃ (Meng *et al.*, 2013)

4.2 การออกแบบถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

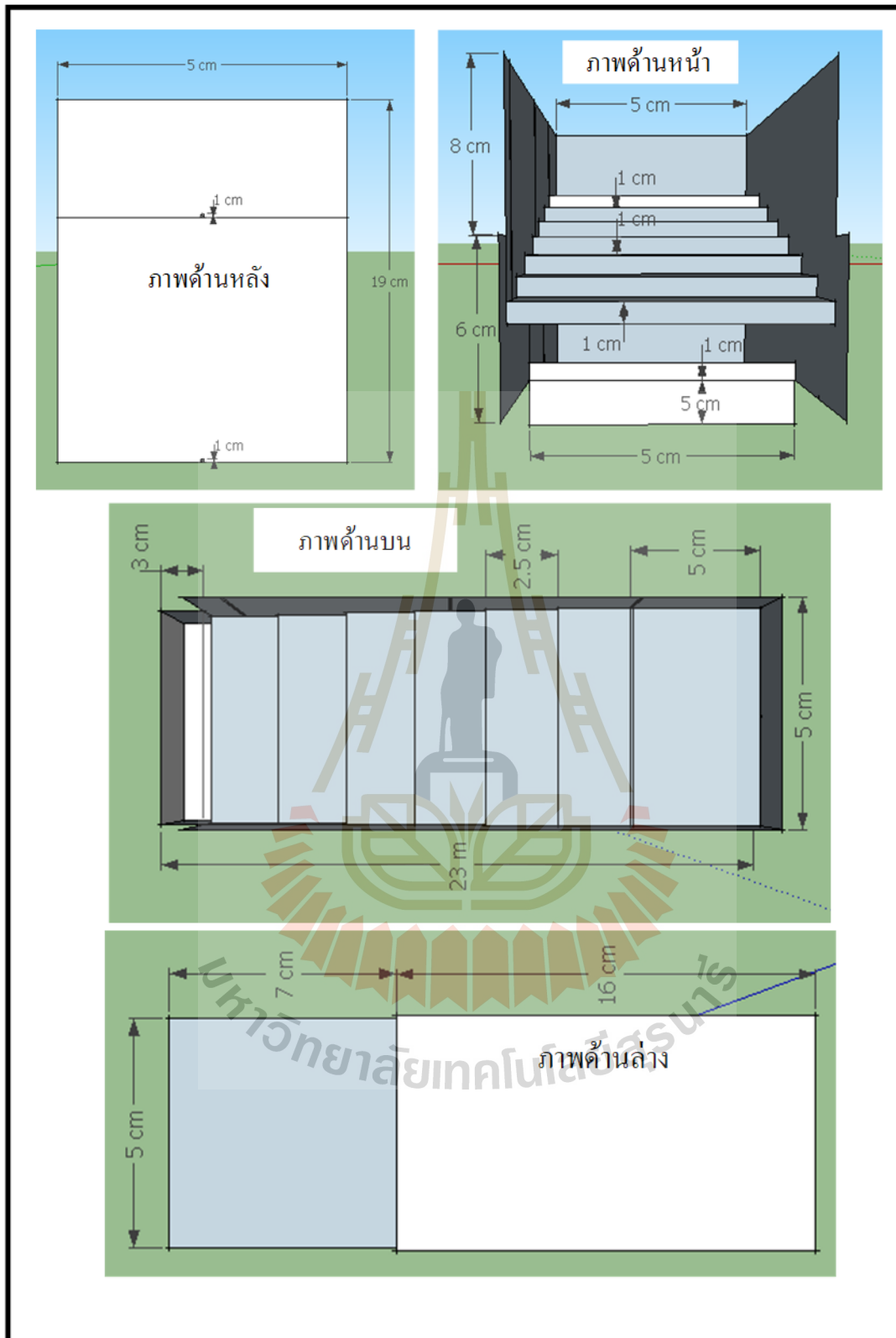
สืบเนื่องจากข้อจำกัดหลายด้านของการใช้ไทเทเนียมแบบผงในการทำปฏิกิริยาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.8.5 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จึงได้มีการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์จากรูปแบบผงมาเป็นแบบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนตัวกลาง นอกจากนี้จะสะดวกต่อการใช้งานแล้ว ยังสามารถทำได้ง่ายเมื่อต้องการเปลี่ยนวัสดุตัวกลาง เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการเสื่อมสภาพจากการใช้งานอีกด้วย สำหรับถังปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบชนิดฟิล์มบางจะนิยมใช้เป็นถังปฏิกิริยาแบบฟิกซ์เบด (Fix-bed photoreactor) โดยถังปฏิกิริยาแบบฟิกซ์เบดนี้จะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนผิวของโลหะและจะนำแผ่นโลหะนั้นมาวางไว้ในระนาบ 45 องศา โดยจะให้น้ำที่ต้องการบำบัดไหลผ่านจากบนลงล่างตามทิศทางที่กำหนดไว้ ซึ่งข้อควรระวังของการใช้ถังปฏิกิริยาแบบฟิกซ์เบด คืออัตราการไหลของน้ำที่สูงเกินไปจะทำให้มีการหลุดออกไปของฟิล์มบางระหว่างการบำบัดน้ำได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ความรู้พื้นฐานของถังปฏิกิริยาแบบฟิกซ์เบดมาเป็นแนวคิดในการดัดแปลงรูปร่างของถังปฏิกิริยา โดยจะให้การไหลของน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบขึ้นบันได เพื่อชะลอและลดความเร็วการไหลของน้ำลงได้ ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

- 1) วัสดุที่ใช้ทำ reactor คือ Stainless Steel เนื่องจากในการทดลองทุกครั้งต้องทำการอบฆ่าเชื้อโรคที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จึงต้องการวัสดุที่สามารถทนความร้อนและแรงดันที่สูงได้
- 2) ขนาดของ reactor มีขนาด 5 เซนติเมตร x 23 เซนติเมตร x 19 เซนติเมตร เนื่องจากถูกจำกัดด้วยความกว้างของเครื่อง Autoclave ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงขนาด 30 เซนติเมตร
- 3) ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่จะวางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีแนวคิดจะทำการออกแบบเป็นชั้นบันไดเนื่องจากจะช่วยชะลอความเร็วของน้ำ เพื่อลดผลกระทบของความเร็วของน้ำที่ทำให้เกิดการหลุดของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับส่วนของชั้นบันไดจะออกแบบให้แต่ละชั้นจะกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร เท่าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์จากขั้นตอนที่ 4.1 ซึ่งขนาดของแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร จะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4) ความสูงของแต่ละชั้นบันไดห่างกัน 1 เซนติเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้วัสดุ Stainless Steel ที่ผู้รับเหมาแจ้งว่าต้องการจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมของ Stainless steel เพราะจะเกิดการรั่วภายหลังจากการใช้งานได้ง่าย จึงจะหันมาใช้เป็นการการปะของ Stainless steel เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความกว้างที่สามารถพบได้คือ 1 เซนติเมตร
- 5) ส่วนที่ 3 จะออกแบบให้มีความยาว 15 เซนติเมตร (วางตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งหมด 6 แผ่น) เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดความยาวของหลอดไฟ UVA 10 วัตต์ที่มีความยาวเพียง 15 เซนติเมตร ปริมาณความเข้มแสงของแผ่นที่ 1 ถึงแผ่นที่ 6 เท่ากับ 0.00695-0.00903 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร
- 6) ส่วนที่ 4 มีขนาด 7 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร และมีช่องเปิด 3 เซนติเมตร สำหรับใช้เปิดดูน้ำตัวอย่างออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์
- 7) ส่วนที่ 2 มีขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร สำหรับกักเก็บน้ำและกระจายน้ำ เนื่องจากเหลือพื้นที่ความยาวเพียง 5 เซนติเมตร
- 8) ส่วนที่ 1 มีขนาด 16 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร สำหรับใส่น้ำตัวอย่าง ซึ่งสามารถใส่น้ำสูงสุด 400 มิลลิลิตร
- 9) ปริมาณน้ำต่ำสุดคือ 200 มิลลิลิตร เป็นปริมาณน้ำต่ำสุดที่เมื่อทำการทดลองจะทำให้ น้ำไหลเต็มแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 10) อัตราการไหลต่ำสุดคือ 130 มิลลิลิตร/นาที เป็นอัตราการไหลที่น้ำจะสามารถไหลทั่วพื้นผิวแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาได้
- 11) อัตราการไหลสูงที่สุดในการออกแบบคือ 500 มิลลิลิตร/นาที เนื่องจากปั๊มที่ใช้ในการทดลองเป็นปั๊มรีดมีอัตราการไหลสูงที่สุด 500 มิลลิลิตร/นาที

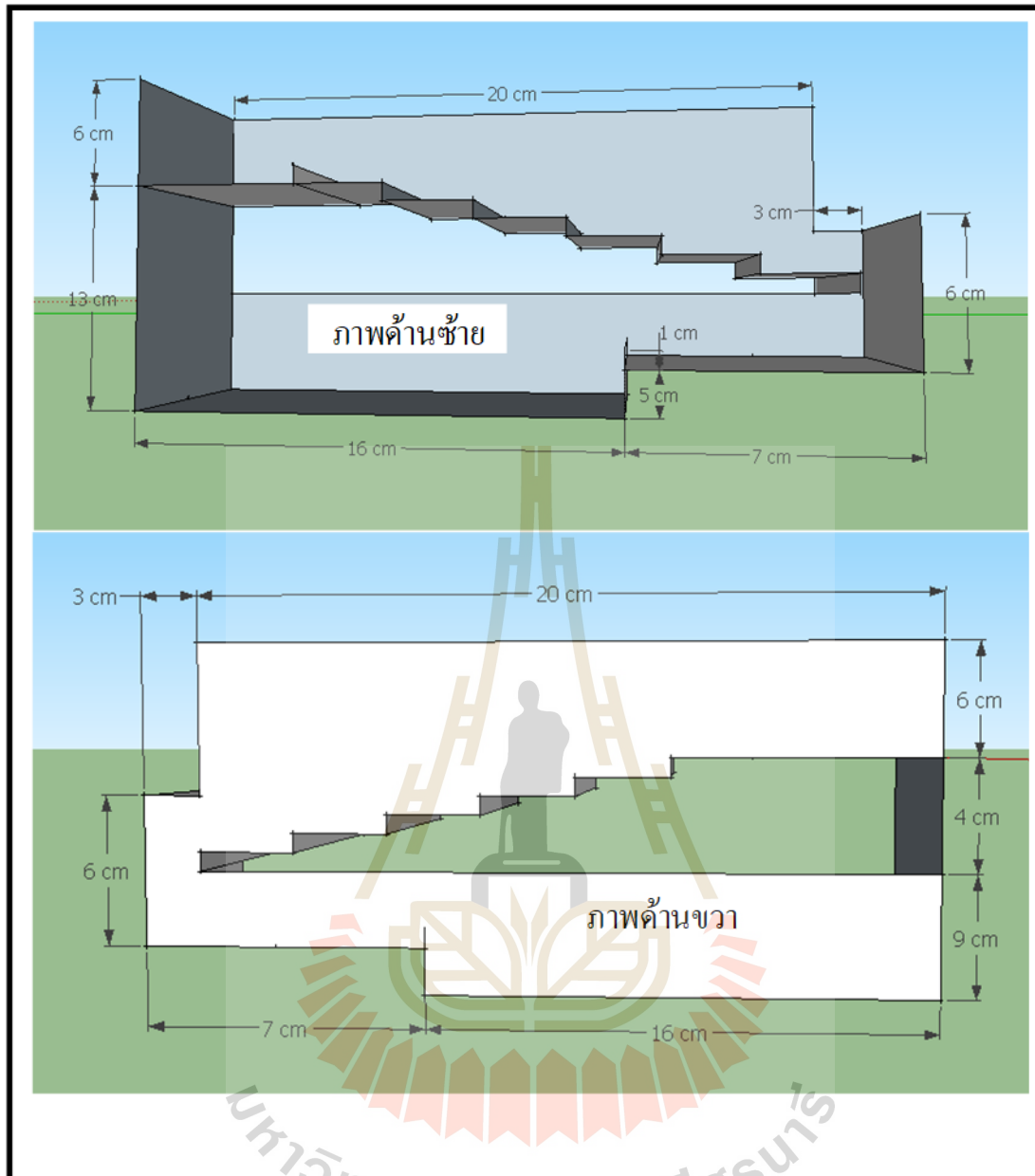
12) ลำดับการไหลของน้ำจะไหลวนเป็นลูป (loop) โดยเริ่มจากการใส่น้ำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ลงไปในส่วนที่ 1 เป็นส่วนกักเก็บน้ำ ซึ่งในช่องนี้จะใช้สายยางต่อจากช่องด้านหลังและมีปั๊มรีดเพื่อดึงน้ำจากด้านล่างเข้าสู่ด้านบนคือ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่กักเก็บน้ำและมีเวียร์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการกระจายน้ำให้ไหลทั่วผิวแผ่นของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 3 เป็นส่วนชั้นบันไดสำหรับวางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป และส่วนที่ 4 เป็นส่วนกักเก็บน้ำซึ่งมีช่องเปิดสำหรับใช้ปีเปตดูดน้ำตัวอย่างออกมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งน้ำจะไหลกลับจากส่วนที่ 4 และเข้าสู่ส่วนที่ 1 อีกครั้ง

จากรายละเอียดการออกแบบสามารถแสดงแบบแปลนพร้อมรายละเอียดขนาดของถังปฏิกิริยาที่ตั้งแสดงในรูปที่ 4.5 และการไหลวนของน้ำในถังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.6 และถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแสดงดังรูปที่ 4.7

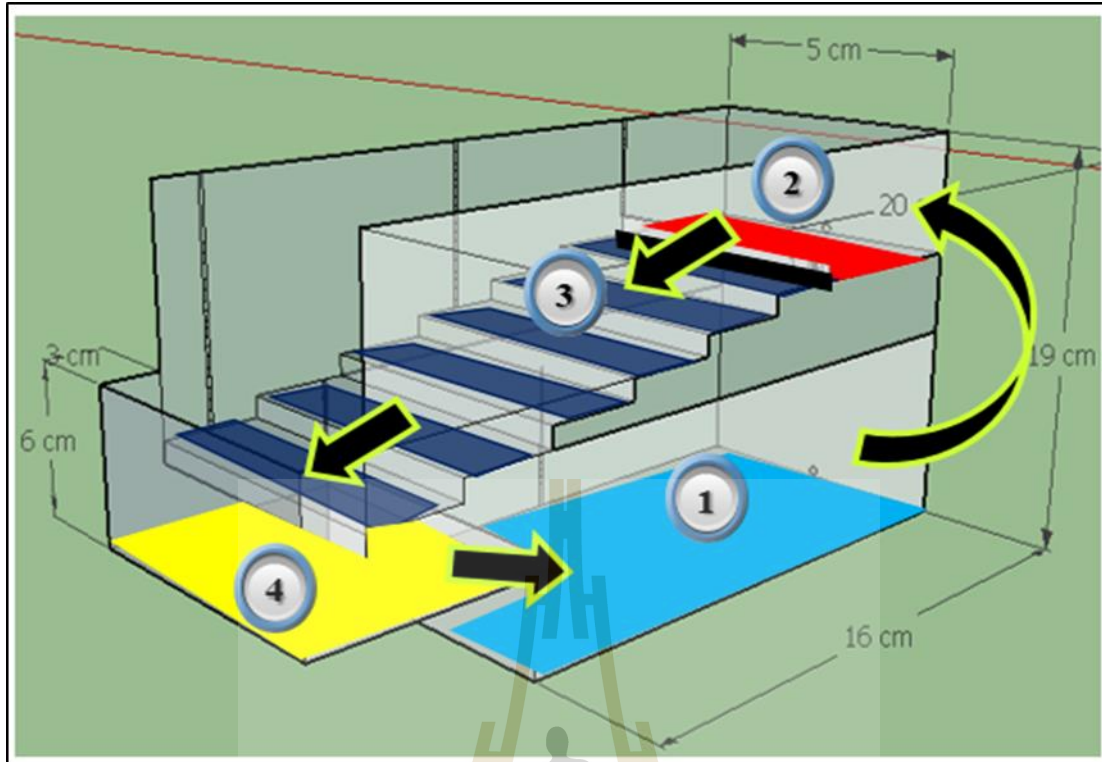




รูปที่ 4.5 แบบแปลนพร้อมขนาดของการออกแบบถังปฏิบัติการ



รูปที่ 4.5 แบบแปลนพร้อมขนาดของการออกแบบดังปฏิกิริยา (ต่อ)



รูปที่ 4.6 การไหลวนของน้ำในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.7 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

หลังจากการออกแบบถังปฏิกรณ์แล้ว ผู้ทำการทดลองได้คำนวณการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลวนครบ 1 รอบ โดย ผู้ทำการทดลองได้จำลองสภาวะของการทดลองโดยใช้อัตราไหลเท่ากับ 130 มิลลิลิตร/นาที และใช้น้ำที่อยู่ในถังด้านล่าง (ช่วงที่ 1) เท่ากับ 200 มิลลิลิตรพบว่าน้ำไหลครบ 1 รอบ จะใช้เวลา 1 นาที 48 วินาที ตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างการคำนวณการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลวนครบ 1 รอบ

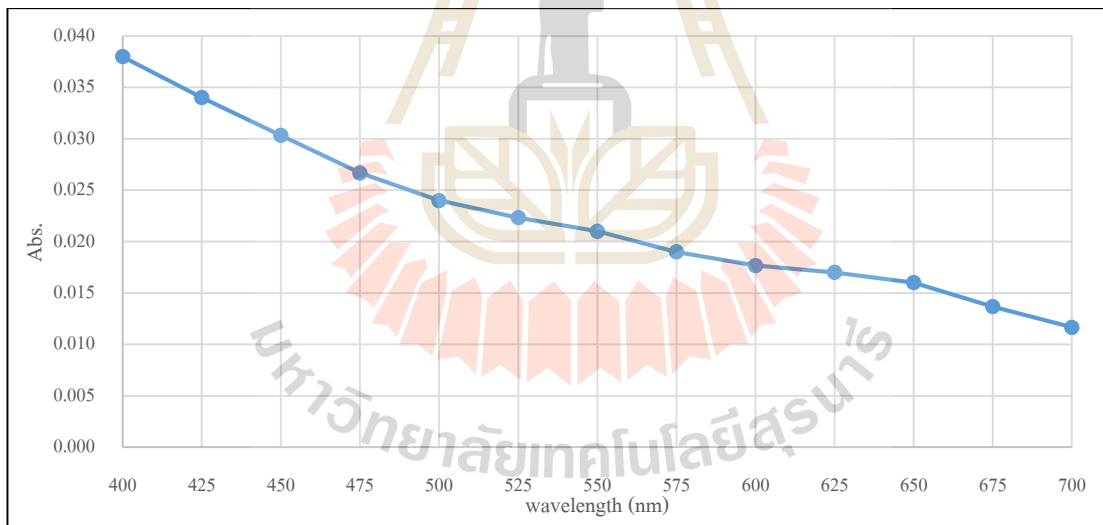
หา HRT ช่วงที่ 1					
Volume(V) = $16 \times 5 \times$ (1.85)	147	มิลลิลิตร			
Q (Flow)	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	67.97	วินาที	→	1.13	นาที
หา HRT ช่วงที่ 2					
V = $yx \times h \times s = 3.5 \times 5 \times (1)$	17.5	มิลลิลิตร			
Q	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	8.06	วินาที	→	0.13	นาที
หา HRT ช่วงที่ 3					
V = $15 \times 5 \times (0.45)$	33.75	มิลลิลิตร			
Q	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	15.55	วินาที	→	0.26	นาที
หา HRT ช่วงที่ 4					
V = $7 \times 5 \times (1)$	35	มิลลิลิตร			
Q	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	16.13	วินาที	→	0.27	นาที
น้ำไหลวนครบ 1 รอบใช้เวลา	107.72	วินาที	→	1.48	นาที

4.3 ผลของการเตรียมน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง

ในการเตรียมน้ำตัวอย่างในการทดลองนั้น จะต้องทำการเตรียมน้ำตัวอย่างเพื่อให้ทราบจำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นอย่างคร่าว ๆ จึงจำเป็นจะต้องใช้วิธีที่ตรวจวัดได้รวดเร็ว จึงเลือกใช้วิธีการวัดเชื้อแบคทีเรียทางกายภาพ คือการวัดความขุ่นของเซลล์ (Cell Density) หรือที่เรียกว่า การวัดค่า O.D. (Optical Density) ของเซลล์แบคทีเรียที่เจริญอยู่ในน้ำตัวอย่าง ด้วยการใช้เครื่อง Spectrophotometer โดยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลของการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม

ในขั้นตอนแรกหลังจากที่ผสมน้ำ D.I. กับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* แล้ว จำเป็นจะต้องหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับแบคทีเรียโดยจะใช้เครื่อง Spectrophotometer, Spectro SC 2101 Labbo Med,inc ที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าความยาวคลื่นที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า Absorbance ของการวัดแบคทีเรียลดลงไปด้วย ซึ่งความยาวคลื่นที่ 400 นาโนเมตร ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะใช้ความยาวคลื่นที่ 400 นาโนเมตร

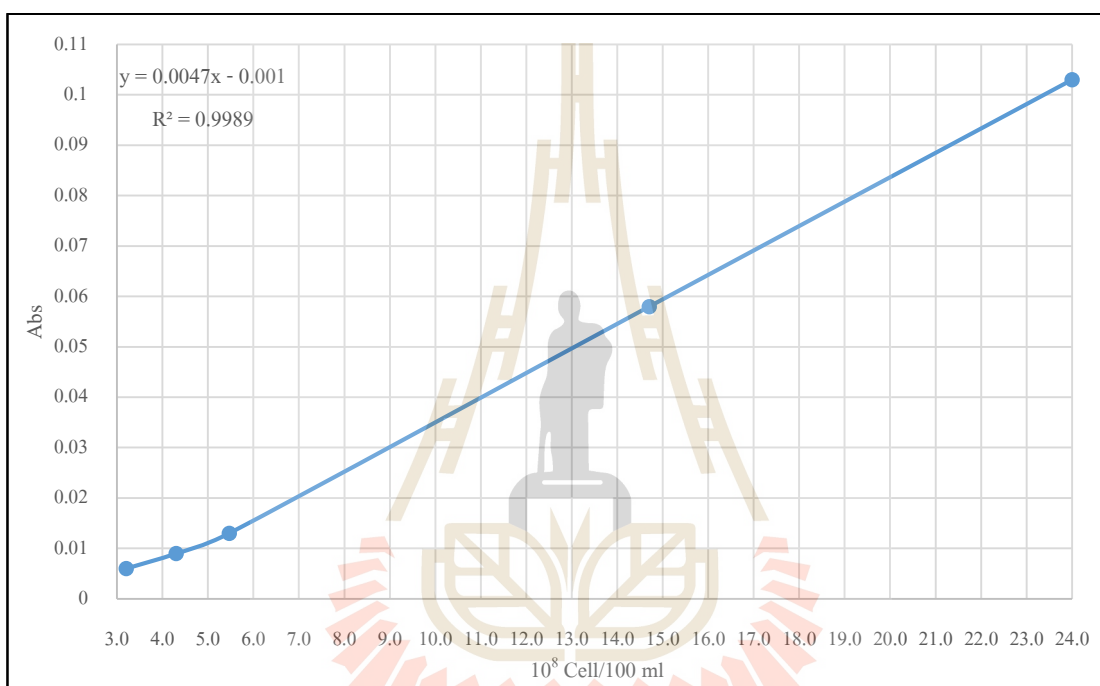


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของจำนวนแบคทีเรียกับความยาวคลื่น

4.3.2 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่า O.D. กับปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย

จากความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 4.3.1 ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า O.D. กับ จำนวนแบคทีเรีย โดยจะทำการผสมน้ำ D.I. กับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ให้มีค่า Absorbance เท่ากับ 0.006 0.009 0.013 0.058 และ 0.103 หลังจากนั้นใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Membrane Filter Technique และนับจำนวนแบคทีเรียที่เกิดขึ้น ซึ่ง

ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับจำนวนแบคทีเรีย จากงานวิจัยของสิทธิชัย., (2549) พบว่า ปริมาณของโคลิฟอร์มในแม่น้ำใกล้แหล่งเกษตรกรรม ชุมชน สถานที่พักผ่อนหย่อนใจ จะอยู่ในช่วง 10^4 - 10^8 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นในการทดลองจะเลือกใช้ ปริมาณของจำนวนแบคทีเรียสูงสุด คือ 10^8 เซลล์/100 มิลลิลิตร โดยแทนในสมการเส้นตรง $y = 0.0047x - 0.001$ จะทำให้ได้ ค่า O.D. เท่ากับ 0.022 ที่ 400 นาโนเมตร มีปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น ประมาณ 5×10^3 เซลล์/100 มิลลิลิตร ซึ่งจะใช้สภาวะนี้ในการเตรียมน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้ในการ ทดลองขั้นต่อไป



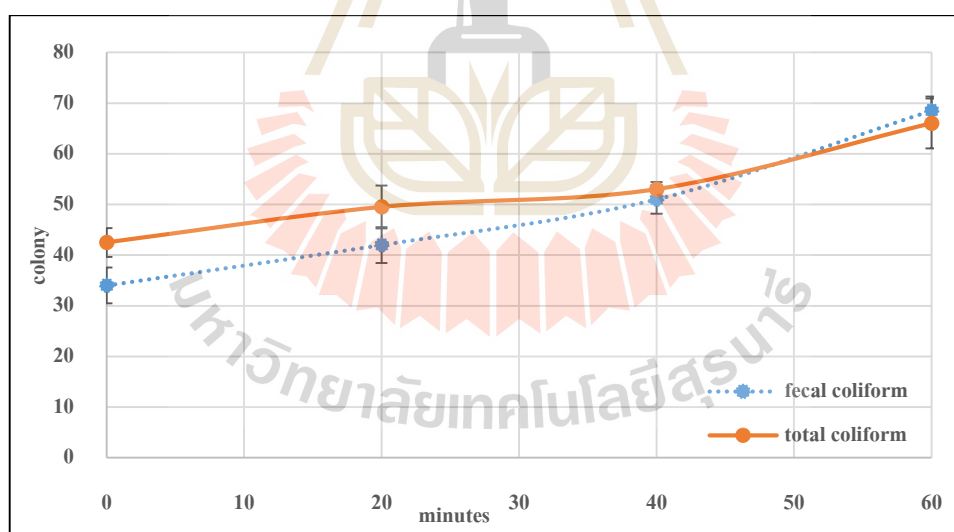
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับจำนวนแบคทีเรีย

4.4 ผลการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

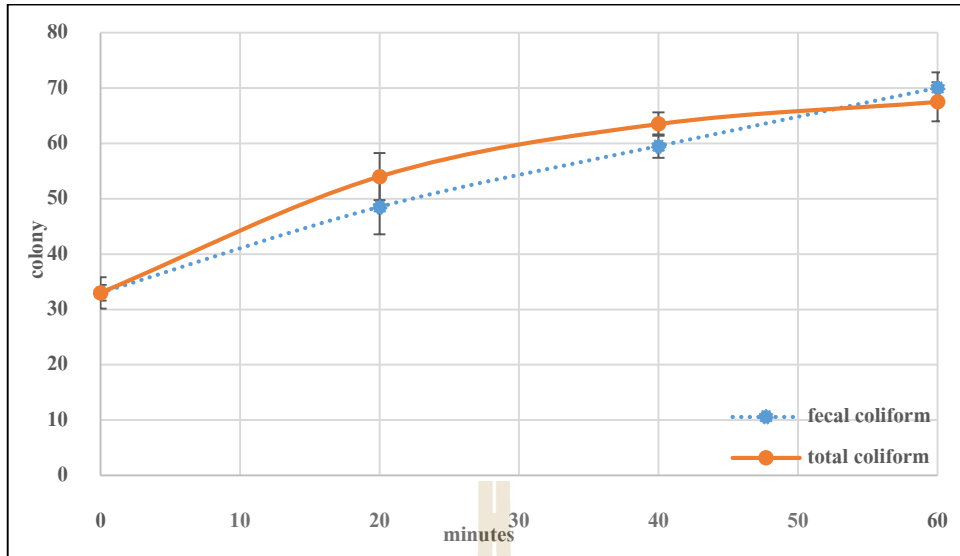
ในขั้นตอนของการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนั้นจะใช้เทคนิค การหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Membrane Filter Technique ซึ่งจะมีการทดลองเบื้องต้นคือ การศึกษาการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E. coli* โดยทำการเปรียบเทียบการตรวจนับโดยการใช่ (1) วิธีการตรวจนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและ (2) การตรวจนับจำนวนแบคทีเรียฟัลโคลิ ฟอร์ม โดยมีผลการทดลองดังแสดงรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4.10 พบว่า จำนวนของโคโลนีที่ตรวจพบเริ่มต้น (นาที่ที่ 0: วิธี fecal coliform 34 โคโลนี, วิธี total coliform 42.5 โคโลนี) เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียเพิ่มมาก (นาที่ที่ 60: วิธี fecal coliform 68.5 โคโลนี, วิธี total coliform 66 โคโลนี) รูปที่ 4.11 จำนวนของโคโลนีที่ตรวจพบเริ่มต้น (นาที่ที่ 0:

วิธี fecal coliform 33 โคโลนี, วิธี total coliform 33 โคโลนี) จะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป (นาทีที่ 60: วิธี fecal coliform 68.5 โคโลนี, วิธี total coliform 66 โคโลนี) รูปที่ 4.12 จำนวนของโคโลนีที่ตรวจพบเริ่มต้น (นาทีที่ 0: วิธี fecal coliform 33.5 โคโลนี, วิธี total coliform 37 โคโลนี) จะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป (นาทีที่ 60: วิธี fecal coliform 68 โคโลนี, วิธี total coliform 69.5 โคโลนี)

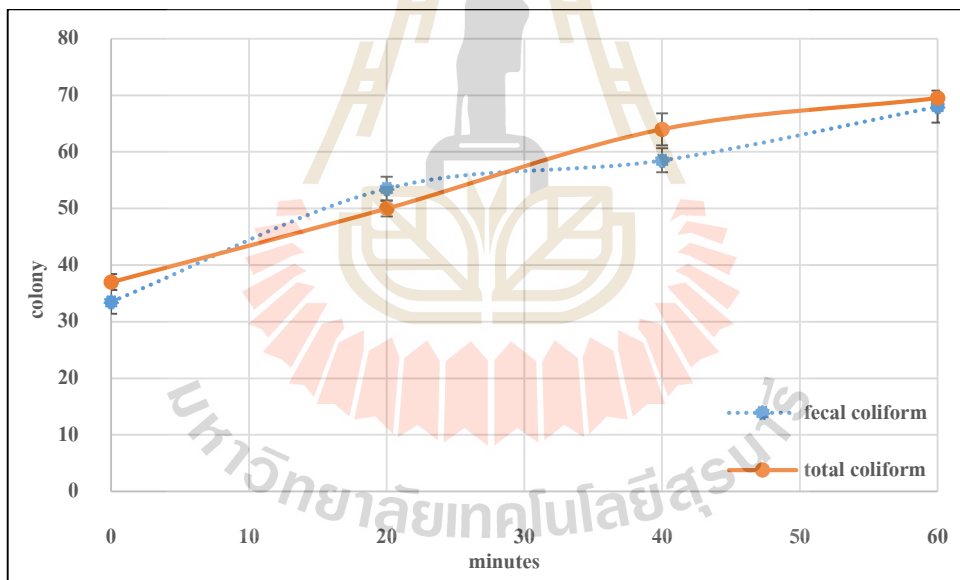
จากการทดลองทั้ง 3 ครั้งพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นและวิธีการตรวจนับทั้ง 2 วิธี (วิธีตรวจนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและวิธีตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม) ในแต่ละซ้ำของการทดลองจะมีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้การทดสอบทางสถิติ ด้วยวิธี pair sample t-test ของการตรวจนับทั้ง 2 วิธี พบว่าการตรวจนับแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและการตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% และมีจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* (เฉลี่ยของทั้งสองวิธีรวมกัน) เริ่มต้นนาทีที่ 0, เท่ากับ $3.55 \times 10^8 \pm 0.4$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และนาทีที่ 60, เท่ากับ $6.83 \times 10^8 \pm 0.3$ เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนต่อไป จะใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียเทคนิค Membrane Filter Technique ด้วยการตรวจนับเพียงแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์มเท่านั้น



รูปที่ 4.10 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.11 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 2



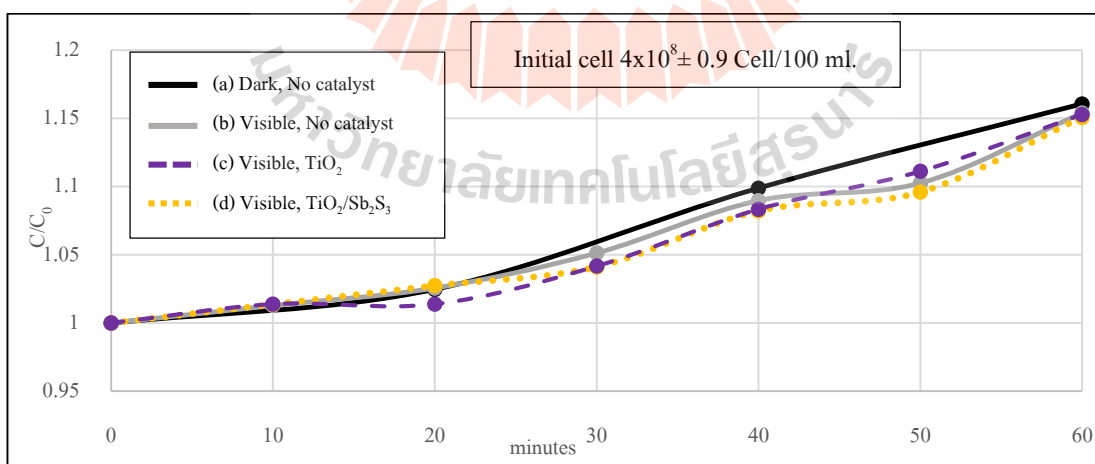
รูปที่ 4.12 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3

4.4.1 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในขั้นตอนของการการศึกษาการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ต้องการที่จะเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากหัวข้อที่ 4.1 คือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนและ (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่งคือ หลอดไฟแสงวิซิเบิล 10 วัตต์ และหลอดไฟแสงยูวีเอ 10 วัตต์ โดยกำหนดอัตราการไหลเท่ากับ 130 มิลลิลิตร/นาที่ น้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร) โดยมีผลการศึกษาดังนี้

4.4.1.1 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

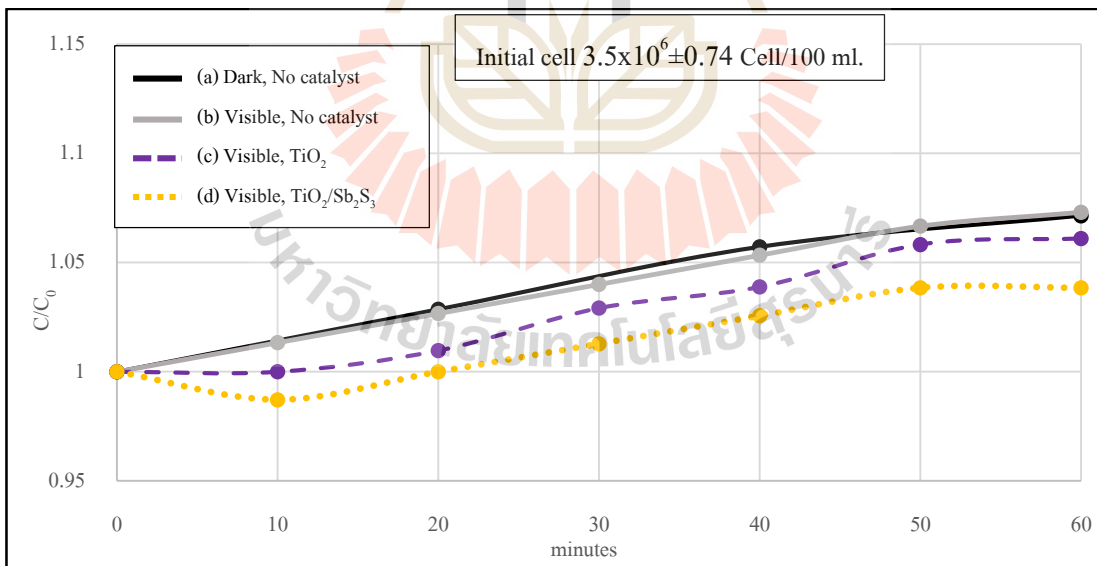
ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาทั้งหมด 4 สภาวะ มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยรูปที่ 4.13 (a) จะเป็นสภาวะคอนโทรลคือไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้น โดยที่ระยะเวลา 60 นาที จะมีจำนวนแบคทีเรียมากขึ้นถึงร้อยละ 16 จากเวลาเริ่มต้นที่มีเชื้อแบคทีเรียประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และ 3 สภาวะถัดมาคือ รูปที่ 4.13 (b) สภาวะที่มีแสงวิซิเบิล ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, รูปที่ 4.13 (c) สภาวะมีแสงวิซิเบิล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน, และ รูปที่ 4.13 (d) สภาวะมีแสงวิซิเบิล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ทั้ง 3 สภาวะเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น อีกทั้งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.13 เส้นกราฟทั้ง 4 เส้น มีความใกล้เคียงกันมาก ไม่พบความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการตอบสนองของแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร)

จากปัญหาดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นมีปริมาณที่มากเกินไปทำให้การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระบบมากกว่าอัตราการทำลายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นจึงได้แก้ปัญหาโดยการลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เริ่มต้นลดลง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1 จะพบว่าปริมาณจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินในแม่น้ำสายสำคัญในประเทศไทย จะอยู่ในช่วง $10^1 - 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะลดปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เริ่มต้นลงให้มีเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร โดยมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14

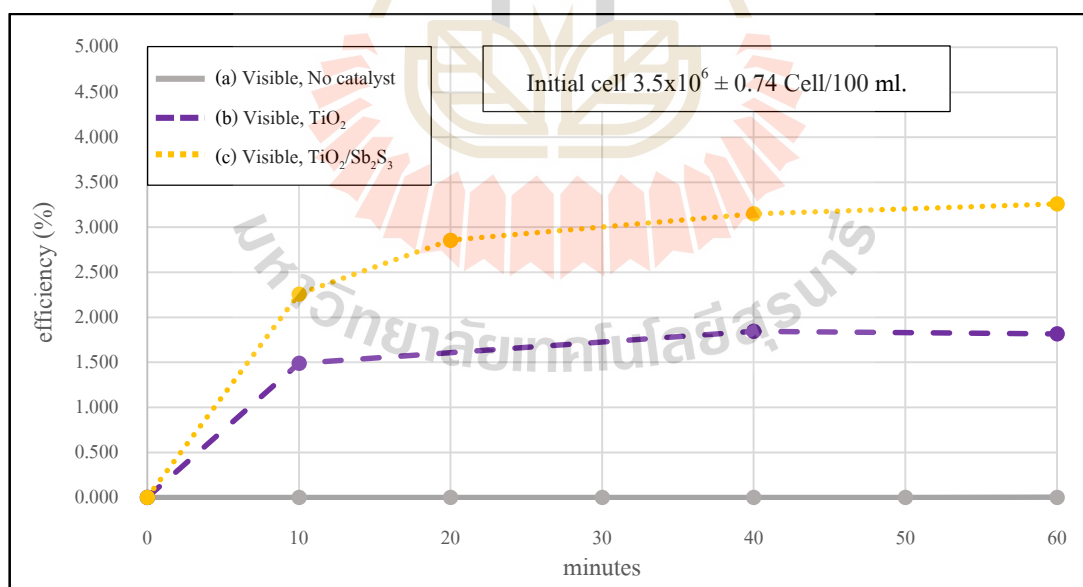
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.14 (a) ปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ในสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ 60 นาทีจะเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้นเป็นร้อยละ 8 จากเวลาเริ่มต้นที่มีเชื้อแบคทีเรียประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และ 3 สภาวะถัดมาคือ รูปที่ 4.14 (b) สภาวะที่มีแสงวิชิเบล ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, รูปที่ 4.14 (c) สภาวะมีแสงวิชิเบล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา, รูปที่ 4.14 (d) สภาวะมีแสงวิชิเบล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ในแต่ละสภาวะเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ระยะเวลา 60 นาที มีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้นเป็นร้อยละ 7.1, 5.8, และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการตอบสนองต่อแสงวิชิเบลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร)

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่เรี่ยนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 นาที จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปประกอบการกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.15

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.15 (a) สภาวะที่ใช้แสงวิซิเบิลเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 0 % ที่ระยะเวลา 60 นาที รูปที่ 4.15 (b) สภาวะที่ใช้แสงวิซิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 1.8 % และรูปที่ 4.15 (c) สภาวะที่ใช้แสงวิซิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรอไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 3.3%

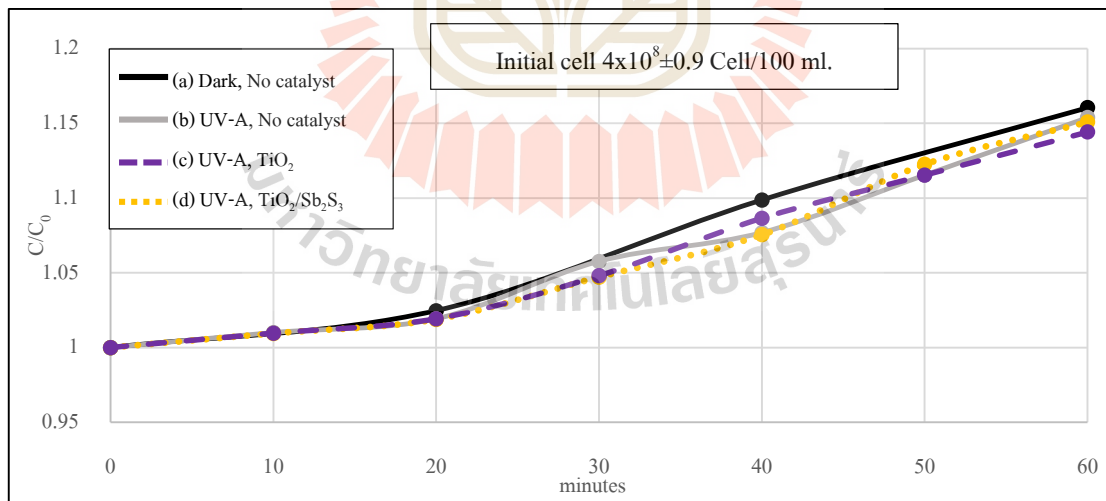


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* ตามระยะเวลากับการตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร)

จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่มีความสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้มากที่สุด ดังนั้นจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ไปทำการศึกษาในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนต่อไป

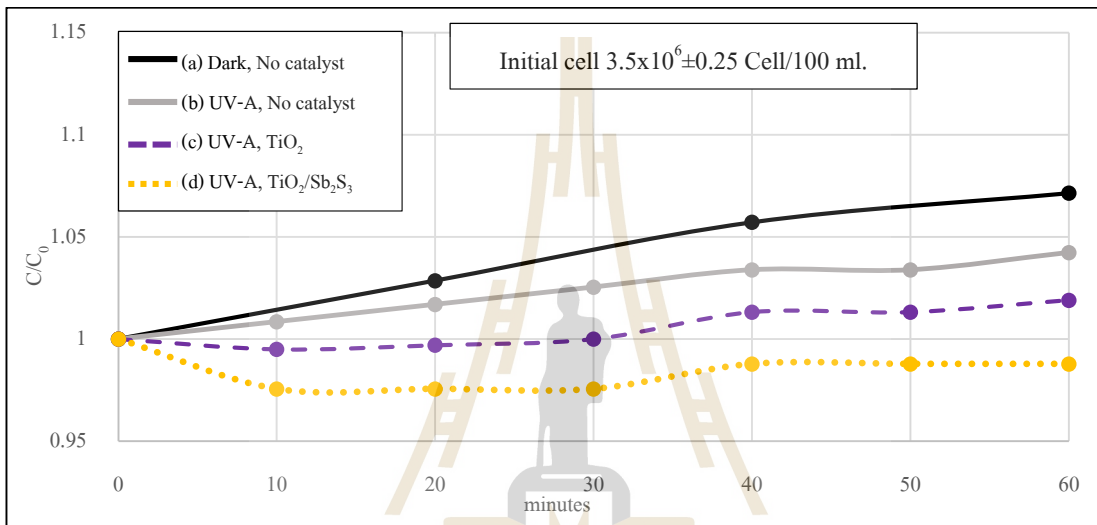
4.4.1.2 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาทั้งหมด 4 สภาวะ มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยรูปที่ 4.16 (a) สภาวะแรกจะเป็นสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ 60 นาทีจะเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้นเป็นร้อยละ 16 จากเวลาเริ่มต้นที่มีเชื้อแบคทีเรียประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และ 3 สภาวะถัดมาคือ รูปที่ 4.16 (b) สภาวะที่มีแสงยูวีเอ ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, รูปที่ 4.16 (c) มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน, รูปที่ 4.16 (d) สภาวะแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ทั้ง 3 สภาวะ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น อีกทั้งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.16 เส้นกราฟทั้ง 4 เส้น มีความใกล้เคียงกันมาก ไม่พบความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร)

จากปัญหาดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นมีปริมาณที่มากเกินไปทำให้การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระบบมากกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นจึงได้แก่ปัญหาโดยการลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เริ่มต้นลดลง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1 จะพบว่าปริมาณจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินในแม่น้ำสายสำคัญในประเทศไทย จะอยู่ในช่วง $10^1 - 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะลดปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เริ่มต้นลงให้มีเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร โดยมีการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17

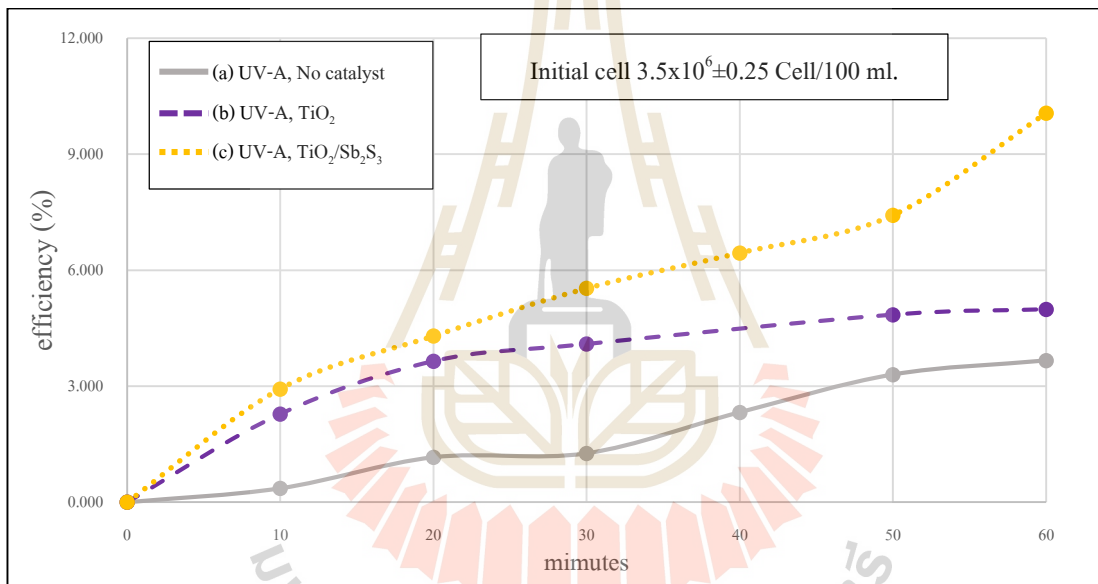


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E. coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 (a) ปริมาณของแบคทีเรีย *E. coli* ในสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ 60 นาทีจะเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้นเป็นร้อยละ 8 จากเวลาเริ่มต้นที่มีเชื้อแบคทีเรียประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และ 3 สภาวะถัดมาคือ รูปที่ 4.17 (b) สภาวะที่มีแสงยูวีเอ ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, รูปที่ 4.17 (c) มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาน, รูปที่ 4.17 (d) สภาวะแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานที่ประดับด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E. coli* ในสภาวะ (b) มีแสงยูวีเอ ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะ (c) มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาน เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของจำนวนแบคทีเรียมากขึ้นโดยที่ระยะเวลา 60 นาที มีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียเป็นร้อยละ 4.0, 2.6 ตามลำดับ ต่างกับสภาวะ (d) ที่มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียม

ไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของเชื้อแบคทีเรียจะลดลง โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของจำนวนแบคทีเรียลดลงจากเริ่มต้นร้อยละ 3

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสถานะที่ทำการทดลองเพียงสถานะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อในสถานะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 นาที จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสถานะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* ตามระยะเวลากับการตอบสนองต่อแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.18 (a) สถานะที่ใช้แสงยูวีเอเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 3.6 % รูปที่ 4.18 (b) สถานะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 5% และรูปที่ 4.18 (b) สถานะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนี

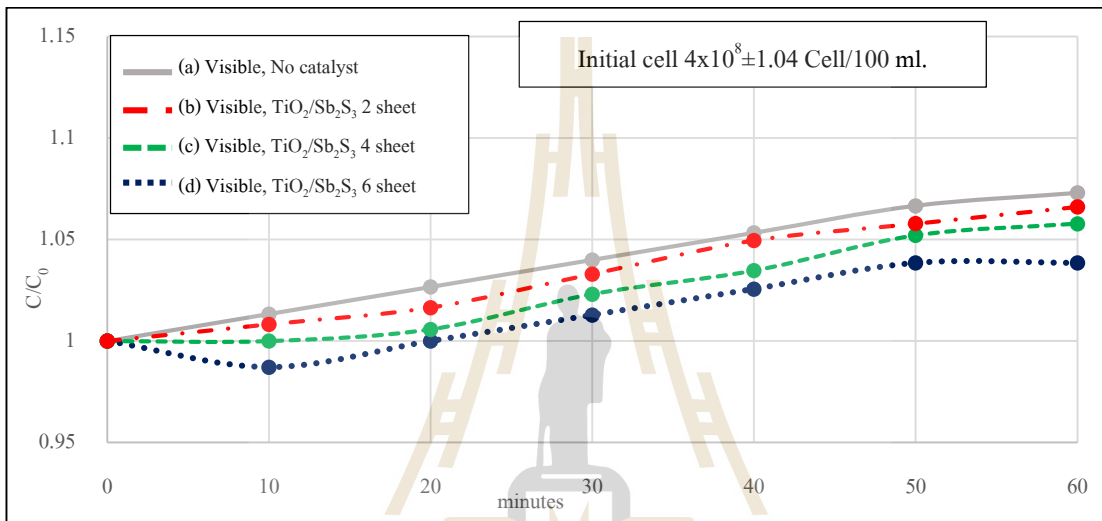
ไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 10%

จากข้อมูลข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้มากที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ เนื่องจากมีความสามารถที่จะตอบสนองต่อแสงได้มากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโน เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงจะทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้น นั้นจะหมายถึงการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลที่มากขึ้น เมื่อไฮดรอกซิลเรดิคัลมากขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จึงสูงตามไปด้วย ดังนั้นจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ไปทำการศึกษาในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนต่อไป

จากที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดแล้ว ข้อมูลข้างต้นสามารถเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ใช้ร่วมกับแสงยูวีเอ และแสงวิซิเบิล (จากการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1.1) โดยใช้การทดสอบทางสถิติ วิธี pair sample t-test ของประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองแหล่งกำเนิดแสงจะพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองแหล่งกำเนิดแสงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในสภาวะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จะให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ร่วมกับแสงวิซิเบิล สาเหตุเนื่องมาจากพลังงานของแสงที่แตกต่างกัน โดยแหล่งพลังงานแสงวิซิเบิลนั้น จะมีความยาวคลื่นมาก พลังงานน้อย พลังงานในการกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจึงน้อยกว่าแสงยูวีเอ ที่มีความยาวคลื่นสั้น พลังงานสูง พลังงานในการกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นจึงมาก การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลก็มาก ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงมากขึ้นตามไปด้วย

4.4.2 ผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในการศึกษาผลของพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1 โดยจะนำมาศึกษากับการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ตั้งแต่ 0-75 ตารางเซนติเมตรโดยกำหนดอัตราการไหลเท่ากับ 130 มิลลิลิตร/นาที่ น้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร แหล่งกำเนิดแสง คือ หลอดไฟแสงวิซิเบิลขนาด 10 วัตต์ เตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 1.04$ เซลล์/100 มิลลิลิตร มีผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.19

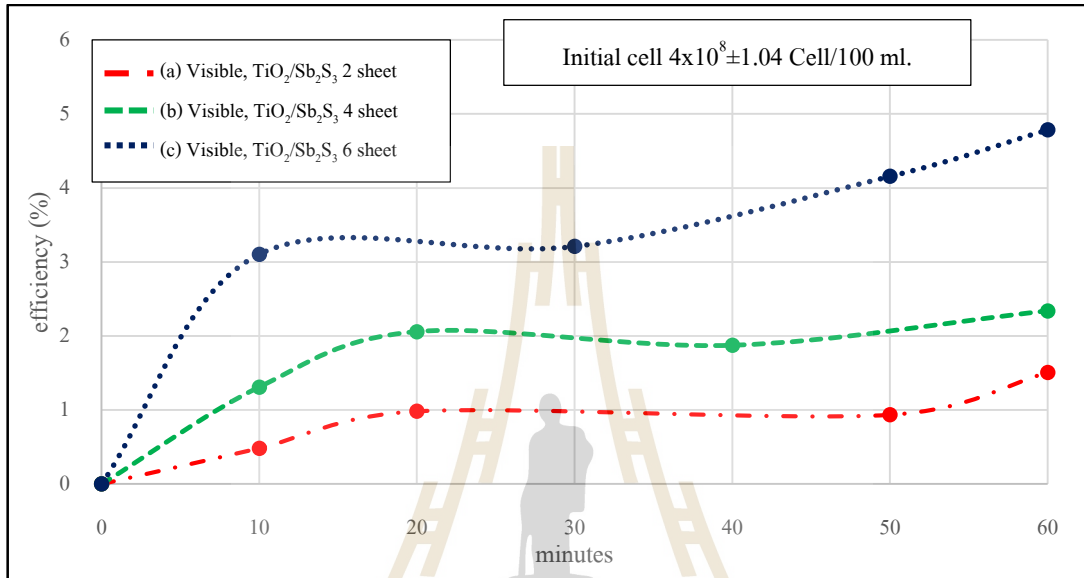


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลา กับพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

จากผลการทดลองทั้ง 4 สภาวะ คือ รูปที่ 4.19 (a) สภาวะมีแสงวิซิเบิลเพียงอย่างเดียว ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, รูปที่ 4.19 (b) สภาวะมีแสงวิซิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จำนวน 2 แผ่น พื้นที่ 25 ตารางเซนติเมตร, รูปที่ 4.19 (c) สภาวะมีแสงวิซิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จำนวน 4 แผ่น พื้นที่ 50 ตารางเซนติเมตร และ รูปที่ 4.19 (d) สภาวะมีแสงวิซิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จำนวน 6 แผ่น พื้นที่ 75 ตารางเซนติเมตร พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนมากขึ้น โดยที่ ระยะเวลา 60 นาทีจะมีปริมาณของจำนวนแบคทีเรียร้อยละ 7.1, 6.6, 5.7 และ 3.3 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีน้น้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษาการ

เจริญเติบโตของเชื้อในสถานะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 นาที จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบกับสถานะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* ตามระยะเวลา กับพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.20 (a) สถานะที่ใช้พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร หรือ 2 แผ่น พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 1.5% รูปที่ 4.20 (b) สถานะที่ใช้พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา 50 ตารางเซนติเมตร หรือ 4 แผ่น พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 2.3% รูปที่ 4.20 (c) สถานะที่ใช้พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา 75 ตารางเซนติเมตร หรือ 6 แผ่น พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 4.8%

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ยังมีปริมาณของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์มากขึ้น พื้นที่สำหรับการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลก็จะมากขึ้น การเกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่มาก ไฮดรอกซิลเรดิคัลก็จะมากขึ้น ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะ

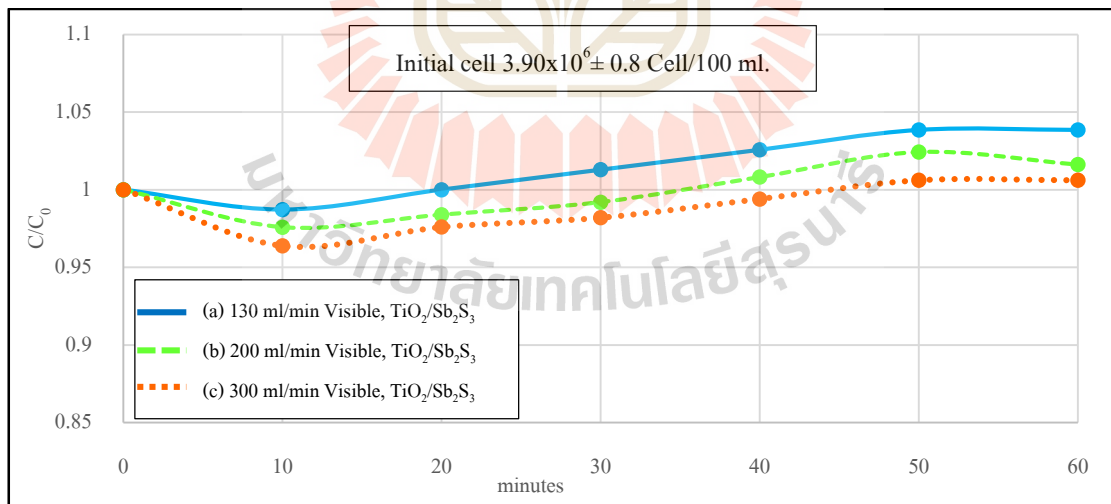
สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่มีพื้นที่ผิว 75 ตารางเซนติเมตร หรือ 6 แผ่น

4.4.3 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

ในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1 และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.2 โดยจะนำมาศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

4.4.3.1 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

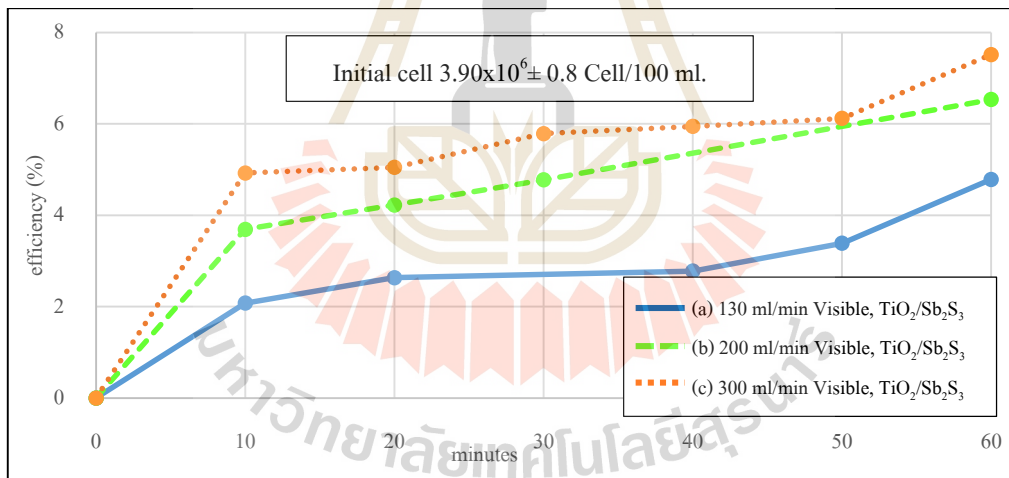
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ เพื่อให้ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษาผลของอัตราการไหลนี้จึงมุ่งเน้นไปศึกษาที่แสงวิซิเบิล โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสง คือหลอดไฟแสงวิซิเบิลขนาด 10 วัตต์ โดยเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.90 \times 10^6 \pm 0.8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และจะแปรเปลี่ยนอัตราการไหลเท่ากับ 130, 200 และ 300 มิลลิลิตร/นาที โดยมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล

จากผลการทดลองของ 2 สภาวะ คือ รูปที่ 4.21 (a) สภาวะอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ และรูปที่ 4.21 (b) สภาวะอัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่ เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นตามระยะเวลา โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของจำนวนเซลล์แบคทีเรียเท่ากับร้อยละ 3 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 4.21 (c) สภาวะอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์ของแบคทีเรียจะลดลง โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของจำนวนแบคทีเรียลดลงเท่ากับร้อยละ 0.6

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 นาที จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตรดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบกับสภาวะ อื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.22



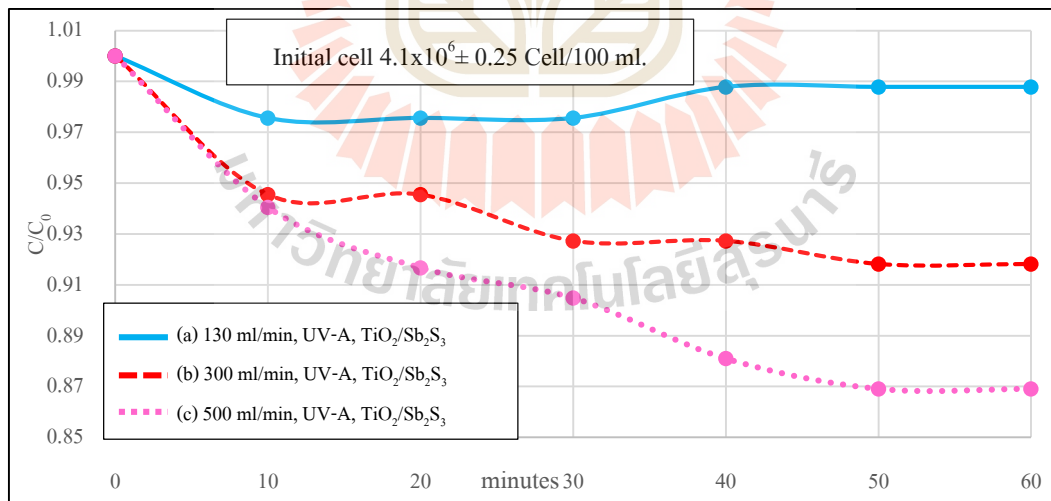
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* ตามระยะเวลากับการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.22 (a) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 4.7% รูปที่ 4.22 (b) สภาวะที่ใช้ใช้อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 6.5% รูปที่

4.21 (c) สภาวะที่ใช้ใช้อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 7.5% ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่มากที่สุดคืออัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตร/นาที

4.4.3.2 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

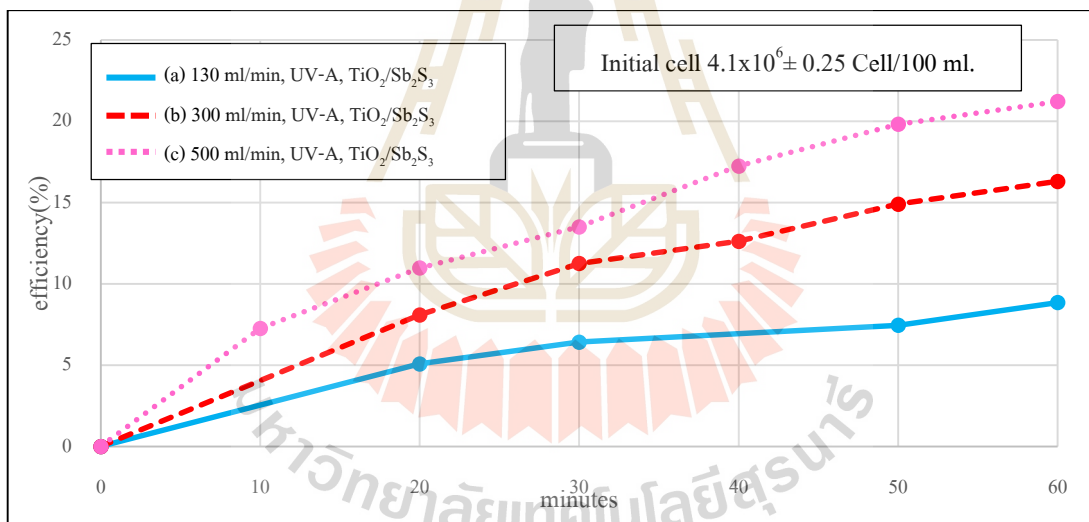
จากข้อมูลในหัวข้อ 4.4.3.1 จะทำให้ทราบว่าอัตราการไหลที่ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ดีที่สุดคืออัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตร/นาที แต่ความแตกต่างของประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 130 200 และ 300 มิลลิลิตร/นาที จะยังไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะเพิ่มอัตราการไหลให้มากขึ้นเพื่อให้เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ประกอบกับการทดลองในขั้นตอนที่ 4.4.1.1 ที่พบว่า การใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จะให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำสูงกว่าการใช้แสงยูวีเอในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ดังนั้นในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ จะกำหนดอัตราการไหลเท่ากับ 130, 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที โดยเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4.1 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ

จากการผลการทดลองทั้ง 3 สภาวะคือ รูปที่ 4.23 (a) สภาวะอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ , รูปที่ 4.23 (b) สภาวะอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ และ รูปที่ 4.23 (c) สภาวะอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์ของแบคทีเรียจะลดลงตามระยะเวลา โดยระยะเวลาที่ 60 นาที ปริมาณของจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะลดลงเป็นร้อยละ 0.7, 8.2 และ 13.1 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษากการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 นาที จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตรดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบกับสภาวะ อื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* ตามระยะเวลากับการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.24 (a) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 8.8% รูปที่ 4.24 (b) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 16.2% รูปที่ 4.21

(c) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 21.2%

นอกจากนี้ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพของอัตราการไหลน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้การทดสอบทางสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐานว่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของอัตราการไหลที่ 130 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที มีความแตกต่างกันจริง โดยจะใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ 2 วิธีคือ 1. ใช้วิธี pair sample t-test เพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหล 3 คู่ คือ อัตราการไหล 130 กับ 300 มิลลิลิตร/นาที อัตราการไหล 300 กับ 500 มิลลิลิตร/นาที และ อัตราการไหล 130 กับ 500 มิลลิลิตร/นาที 2. วิธี ANOVA ใช้ในการเปรียบเทียบตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม จากการทดสอบด้วยวิธี pair sample t-test ของทั้ง 3 คู่ พบว่าให้ผลการทดสอบที่เหมือนกันคือ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที แตกต่างกับ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที แตกต่างกับ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% และ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที แตกต่างกับ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% การทดสอบด้วยวิธี ANOVA พบว่า ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของทั้ง 3 อัตราการไหล มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติทั้ง 2 วิธี (ANOVA และ pair sample t-test) ก็ให้ผลการทดสอบที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และจากผลการทดสอบ ANOVA เมื่อดูจากค่าเฉลี่ยเลขที่คณิต (mean) สามารถบอกได้กว่าประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหลที่ 500 มิลลิลิตร/นาที มีค่าสูงสุดสุด รองลงมาเป็นอัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตร/นาที และต่ำสุดคืออัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมากขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที > ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที > ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงจะทำให้จำนวนรอบที่น้ำไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมากขึ้นตามไปด้วย จากการคำนวณพบว่า อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ใน 1 ชั่วโมงน้ำจะไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 75.2 รอบ ในขณะที่การใช้อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที ใน 1 ชั่วโมงน้ำจะไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 15.55 รอบ ซึ่งจำนวนรอบที่ไหลเวียนที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลกับการที่น้ำสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการ

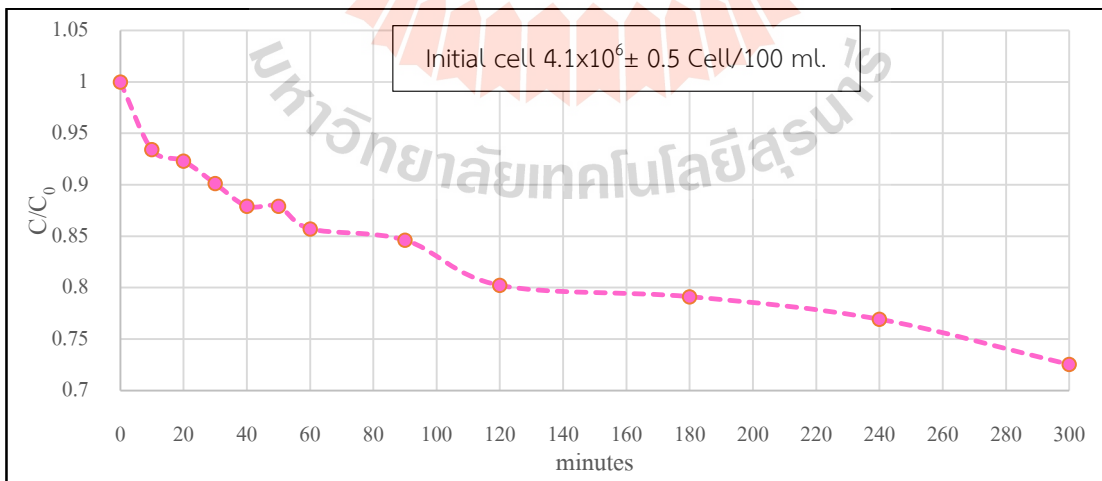
ทดลองขั้นตอนต่อไปจะใช้อัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำสูงที่สุดคือ อัตราการไหลที่ 500 มิลลิลิตร/นาที

4.4.4 ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในการศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.2 อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.3 โดยมีผลการทดลองดังนี้

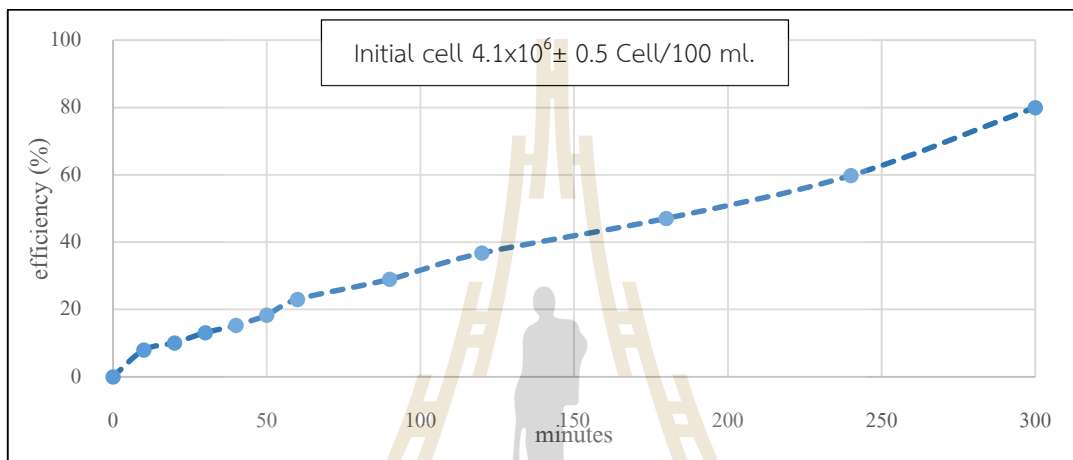
4.4.4.1 ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที

เนื่องจากในการศึกษาขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาถึงการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นระยะเวลานาน ซึ่งข้อจำกัดในการทดลองนี้คือ ในระหว่างการทดลอง จะไม่สามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เกิดขึ้นในการทดลองได้เลย โดยการทดลองจะต้องมีการเก็บน้ำตัวอย่าง และนำไปหาปริมาณเซลล์แบคทีเรียด้วยวิธี Membrane Filter ที่จะต้องบ่มเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงจะสามารถนับปริมาณโคโลนีที่เกิดขึ้น ถึงจะทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการกำหนดระยะเวลาในการศึกษาต่อเนื่องกันทั้งหมด 300 นาที และในการศึกษาขั้นตอนนี้จะทำการเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4. \times 10^6 \pm 0.5$ เซลล์/100 มิลลิลิตร มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องในระยะเวลา 300 นาที

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงตามระยะเวลา โดยระยะเวลาที่ 300 นาที ปริมาณของจำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงจากเริ่มต้นเป็นร้อยละ 26.5 ซึ่งในการทดลองนี้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียวได้ จะต้องคำนึงถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบกับสภาวะในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.26

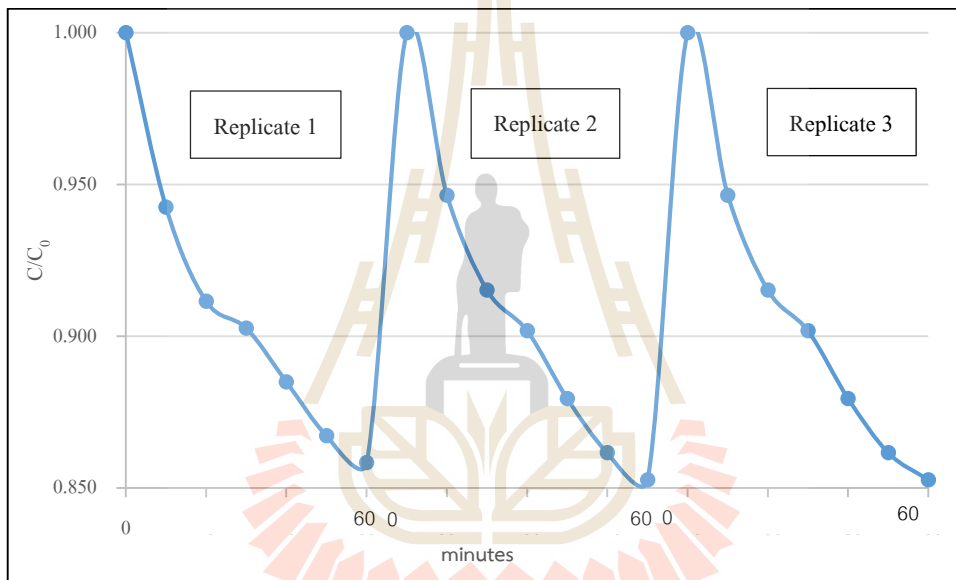


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* ตามระยะเวลาที่บรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำใน กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.26 จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ 300 นาที มีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำถึง 80% นอกจากนี้ยังได้มีการนำน้ำตัวอย่างที่เวลา 60 และ 300 นาทีไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-MS พบว่า ไม่พบการหลุดของธาตุ Ti Sb และ S ในน้ำหลังจากผ่านการบวนการโฟโตคะตะไลซิส ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลานาน โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งานและไม่มีการหลุดของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากผ่านการบวนการโฟโตคะตะไลซิส

4.4.4.2 ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง

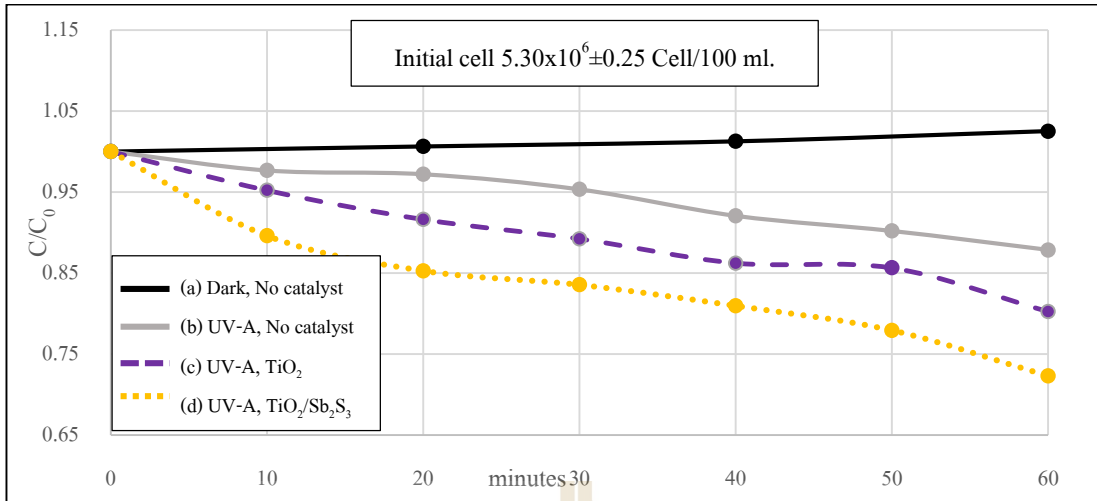
ในการศึกษาขั้นตอนนี้จะทำการเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $7.53 \times 10^6 \pm 0.4$ เซลล์/100 มิลลิลิตร ใช้ระยะเวลาในการศึกษา 60 นาที โดยจะทำทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และจะใช้แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาชุดเดิมในการทดลอง มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงตามระยะเวลา โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของจำนวนเซลล์แบคทีเรีย ในซ้ำที่ 1 2 และ 3 ลดลงใกล้เคียงกันทั้ง 3 ซ้ำ โดยลดลงจากเริ่มต้นเป็นร้อยละ 14.2, 14.7 และ 14.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนี ไตรซัลไฟด์สามารถใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งาน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลา กับจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 3 ครั้ง

4.4.5 ผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (Fecal Streptococcus) ในน้ำ

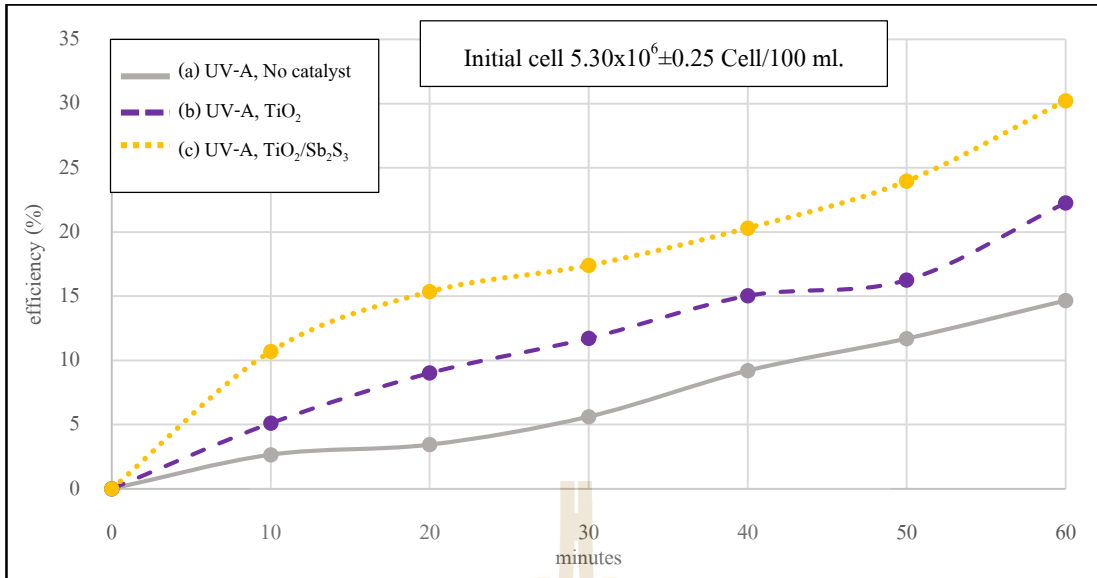
ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนนี้จะใช้แบคทีเรียแกรมบวกคือ แบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* และจะใช้สภาวะที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดจากการทดลองกับเชื้อ *E.coli* คือ การใช้แสงยูวีเอ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร) อัตราการไหลเท่ากับ 500 มิลลิลิตร/นาที โดยมีผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลากับการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.28 (a) สภาวะแรกจะเป็นสภาวะคอนโทรลคือไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณของเซลล์แบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ระยะเวลา 60 นาที จะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นเท่ากับร้อยละ 2.5 จากเวลาเริ่มต้นที่มีเชื้อแบคทีเรียประมาณ $5.30 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร สภาวะต่อมาอีก 3 สภาวะ คือ รูปที่ 4.28 (b) สภาวะที่มีแสงยูวีเอ เพียงอย่างเดียว ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, รูปที่ 4.28 (c) สภาวะมีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน, รูปที่ 4.28 สภาวะมีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จะพบว่าปริมาณของเซลล์แบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ทั้ง 3 สภาวะ เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะลดลงตามระยะเวลา โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของเซลล์แบคทีเรียจะลดลงจากเริ่มต้นเป็นร้อยละ 12.2, 19.7 และ 22.2 ตามลำดับ

ซึ่งในการทดลองในขั้นตอนนี้ จะไม่สามารถทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียวได้ จะต้องคำนึงถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.29



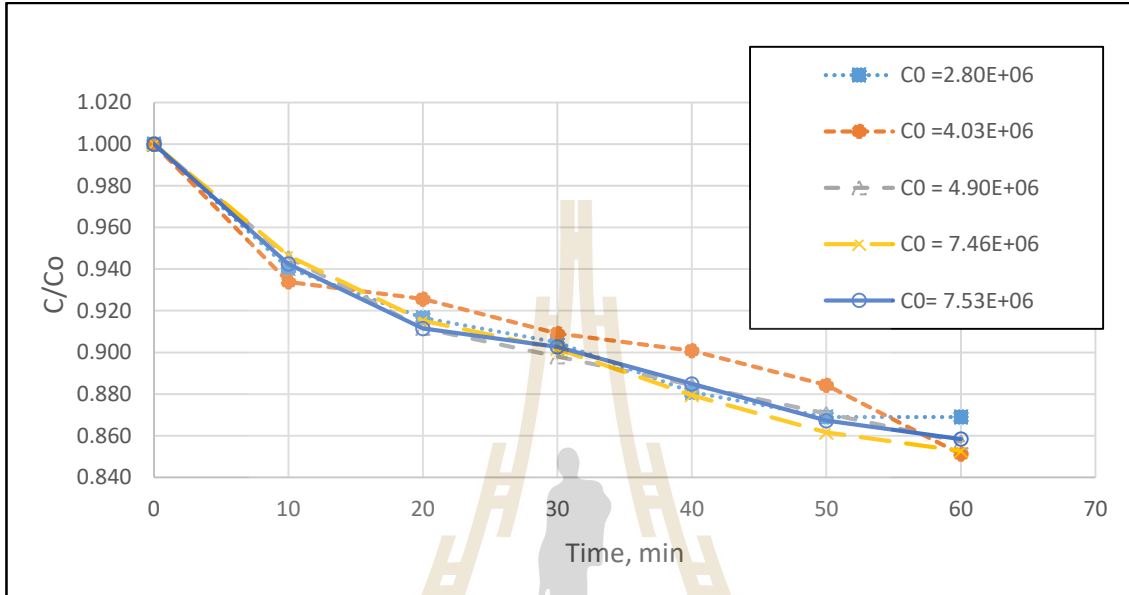
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ตามเวลา กับการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.29 พบว่า รูปที่ 4.29 (a) สภาวะที่ใช้แสงยูวีเอเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 14.6 % รูปที่ 4.29 (b) สภาวะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 22.2% และรูปที่ 4.29 (c) สภาวะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 30.2% ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้

4.5 ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกันคือ 2.80×10^6 , 4.03×10^6 , 4.90×10^6 , 7.47×10^6 , และ 4.53×10^6 เซลล์/100มิลลิลิตร เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ขนาด 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร) พลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอขนาด 10 วัตต์ ที่อัตราการ

ไหล 500 มิลลิลิตร/นาที พบว่า ในปริมาณของเชื้อเริ่มต้นในแต่ละค่า เมื่อเวลาผ่านไปมีการลดลงของปริมาณเชื้อโรคร้อยละอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 2.80×10^6 , 4.03×10^6 , 4.90×10^6 , 7.47×10^6 , และ 4.53×10^6 เซลล์/100 มิลลิลิตร ระยะเวลา 60 นาที คือร้อยละ 13.1, 14.9, 14.3, 14.7 และ 14.2 ตามลำดับ

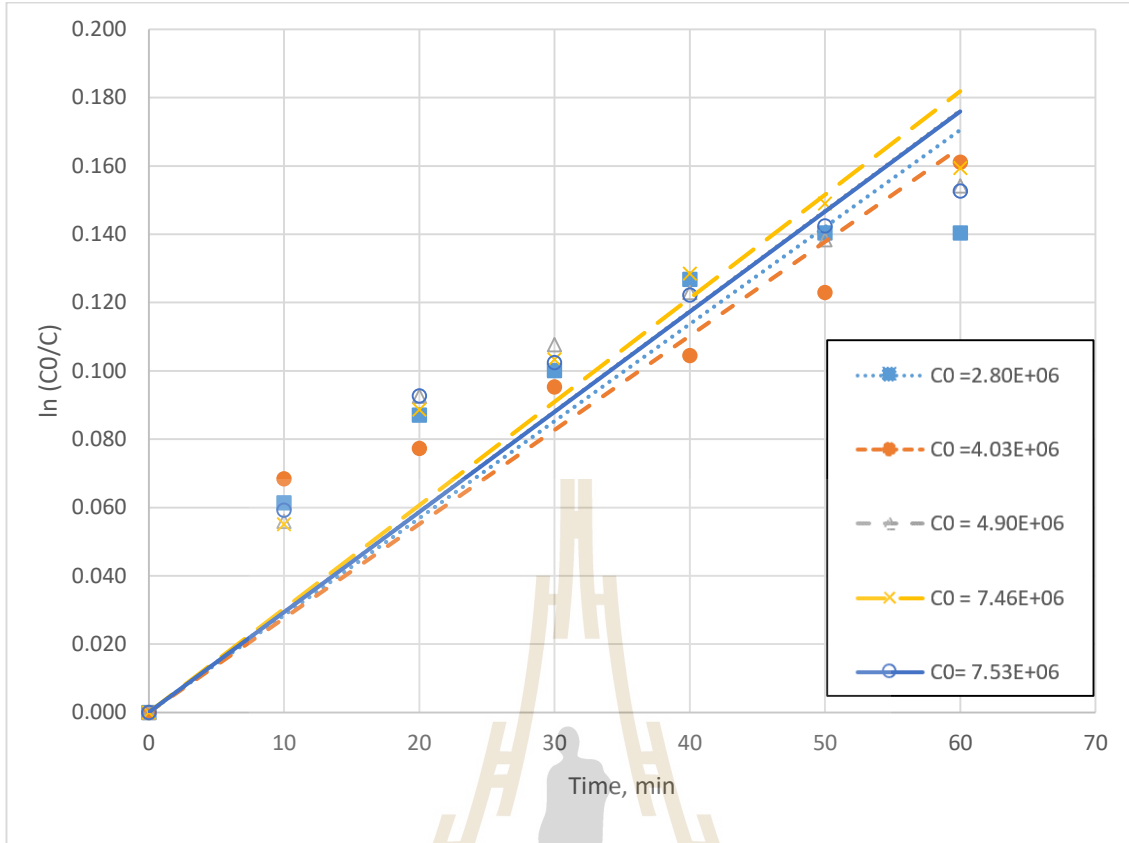


รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกัน

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.10 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง และค่า $\ln(C_0/C)$ มีจุดตัดแกนที่ (0, 0) ได้แสดงดังรูปที่ 4.31 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($k' = k_{app}$) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า Initial reaction rate (r_0) ได้จากสมการที่ 4.11 และตารางที่ 4.6

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_A}\right) = k't \quad (4.10)$$

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.31 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order)

ตารางที่ 4.6 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ที่แตกต่างกัน

C_0 (เซลล์/ 100 มิลลิลิตร)	k_{app} (นาที)	Initial reaction rate, (r_0) (เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที)	$1/r_0$	$1/C_0$
2.80E+06	0.0028	7.84E+03	3.57E-07	1.28E-04
4.03E+06	0.0028	1.13E+04	2.48E-07	8.85E-05
4.90E+06	0.0029	1.42E+04	2.04E-07	7.04E-05
7.47E+06	0.003	2.24E+04	1.34E-07	4.46E-05
7.53E+06	0.0029	2.18E+04	1.33E-07	4.58E-05

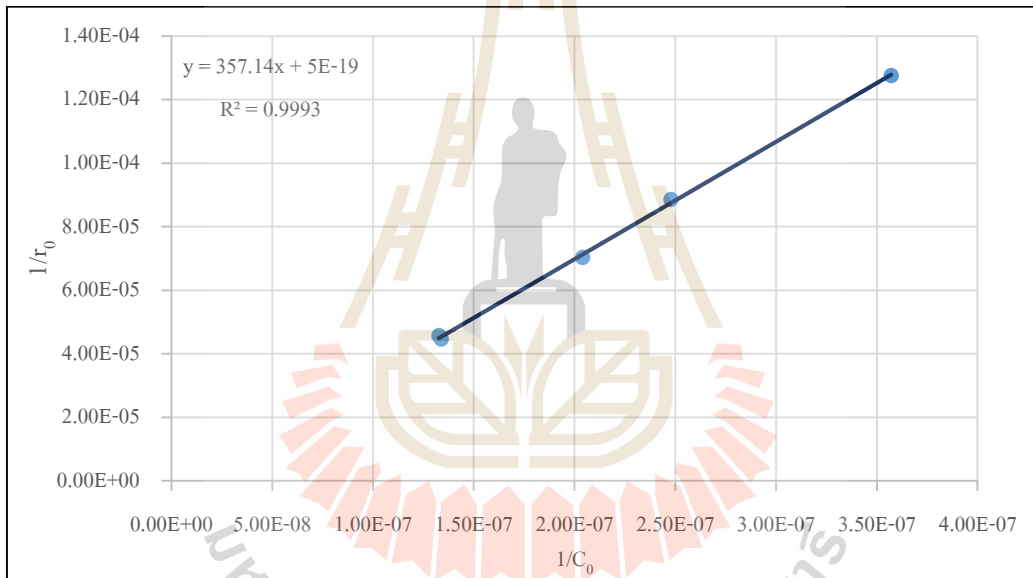
สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เป็นสมการที่อาศัยหลักการของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียมประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการแลงเมียร์ ดังสมการที่ 4.12 ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* เริ่มต้น (C_0) กับค่าอัตราเร็ว

ของการเกิดปฏิกิริยา r_0 ได้ตั้งสมการที่ 4.13 และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ตั้งสมการที่ 4.14 ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C_0$ กับ ค่า $1/r_0$ แสดงดังรูปที่ 4.32

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k'C_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1 + K_L C} \quad (4.12)$$

$$r_0 = \left(-\frac{dC_{ads}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{k_r K_L C_0}{1 + K_L C_0} \quad (4.13)$$

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K_L} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \quad (4.14)$$



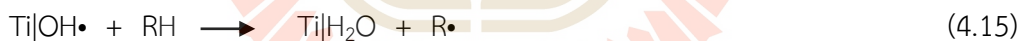
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.31 ได้กราฟเส้นตรง มีสมการเส้นตรง คือ $y = 357.14x + 5 \times 10^{-19}$ มีความชันของกราฟ คือ $\frac{1}{k_r K_L}$ มีค่าเท่ากับ 357.14 และ จุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{k_r}$ มีค่าเท่ากับ 5×10^{-19} ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 2.5×10^5 เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที่ และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 1.4×10^{-21} เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที่

4.6 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

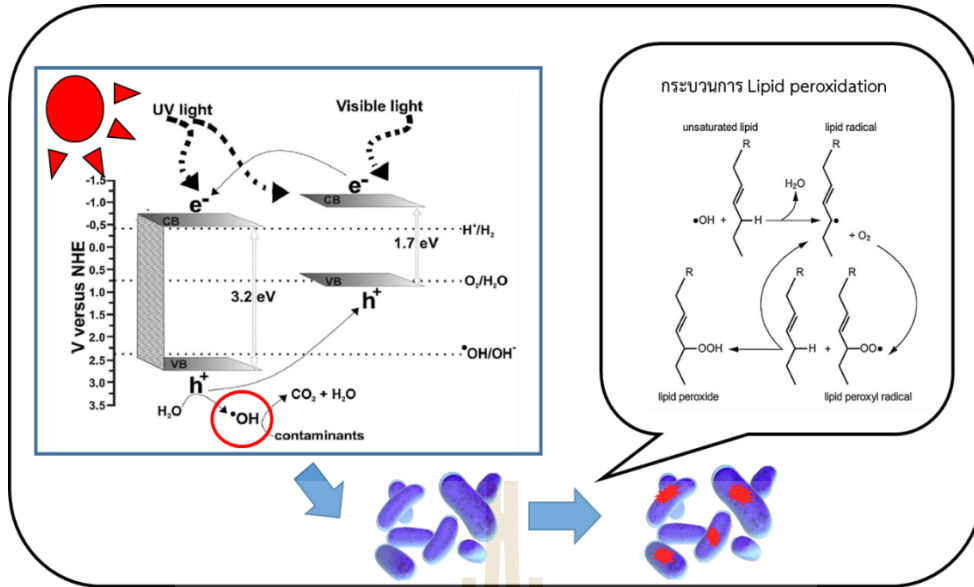
จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กลไกหลักในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมาจากการเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งเกิดหลังจากที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงแล้ว โดยมี $\text{OH}\cdot$ เข้าทำปฏิกิริยาเซลล์ของจุลินทรีย์ โดย *saito et al.*, (1992), *Chun et al.*, (2007) ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระเหล่านี้กับผนังเซลล์ของเชื้อ *E.coli* โดยอนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถทำลายผนังเซลล์และทำให้เกิดการรั่วไหลของโพตัสเซียมไอออน (K^+) ออกจากเซลล์ สามารถลดอัตราการรอดของเซลล์ที่สูง อีกทั้งอนุมูลอิสระยังเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบที่เป็นไขมันในส่วนของฟอสโฟลิปิดที่ไม่อิ่มตัว (polyunsaturated phospholipid) ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเซลล์ส่งผลให้เซลล์ตาย คล้ายกับ *Mannes et al.*, (1999), *Hinthong et al.*, (2010) ได้กล่าวถึงการทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ (*E.coli*) ของอนุมูลอิสระจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการทำลายชั้นไขมันโดยเฉพาะในส่วนของลิพอโพลิซัคคาไรด์ (lipopolysaccharides layer) ของผนังเซลล์ชั้นนอก และชั้นเพปทิโดไกลแคน (peptidoglycan layer) อีกทั้ง พวงรัตน์, (2557) และ *Omatoyo et al.*, (2010) ได้กล่าวถึงกลไกของฆ่าเชื้อโรคโดยเรียกกระบวนการนี้ว่า Lipid oxidation แสดงดังสมการที่ 4.15 -4.17 และรูปที่ 4.33 ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรก ขั้น Initiation คือ การที่อนุมูลไฮดรอกซิล ($\text{Ti|OH}\cdot$) จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน โดยดึงไฮโดรเจนจากกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (RH) ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระของกรดไขมัน ($\text{R}\cdot$) หรือเรียกว่า lipid radical ดังสมการที่ 4.15



ขั้นตอนที่สอง ขั้น Propagation คือ การที่ lipid radical ($\text{R}\cdot$) ไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) เกิดเป็น lipid peroxy radical ($\text{ROO}\cdot$) และตัว lipid peroxy radical ($\text{ROO}\cdot$) จะสามารถไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (RH) อีกครั้งซึ่งผลิตภัณฑ์คือ lipid peroxide (ROOH) และ lipid radical ($\text{R}\cdot$) ดังสมการที่ 4.16, สมการ 4.17 และ lipid radical ($\text{R}\cdot$) จะสามารถเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่แบบนี้ไปเรื่อยๆ จนนำไปสู่การทำลายชั้นลิปิดในผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ถูกทำลาย และเกิดการแตกออกของผนังเซลล์ได้





รูปที่ 4.33 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนให้ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิล แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อใช้ศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ คือ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา และแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน คือ แสงยูวี และแสงวิซิเบิล 2) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 3) อัตราการไหลผ่านของน้ำบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และ 4) การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1.1 สรุปผลการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโน

1) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนด้วยวิธีแอนโนดไดซ์เซชันในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol : H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่าลักษณะของออกไซด์ที่ได้เป็นรูปร่างเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น เห็นลักษณะท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และในการวิเคราะห์ ร่วมกับการใช้เทคนิค Tube Density จะพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอนโนดไดซ์เซชัน โดยการควบคุมสถานะในการสังเคราะห์ให้เหมือนกันทุกครั้งที่ค่า ศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลา และ ความเข้มข้นของสารละลาย จะมีลักษณะของออกไซด์ที่เกิดขึ้นคล้ายกันทั้งหมด

2) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าเกิดเป็นโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส ซึ่งให้การตอบสนองต่อแสงได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น

3) ในการหาปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่าปริมาณของธาตุ ไทเทเนียม และ ออกซิเจน เป็นร้อยละ 59.950 และ 40.050 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโนจากแผ่นไทเทเนียมได้

4) ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโน โดยใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectra (DRS) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างนาโน จะให้การดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต คือต่ำกว่า 380 นาโนเมตร ส่วนแสงวิซิเบิลที่สูงกว่า 380 นาโนเมตร สามารถดูดกลืนได้เพียงเล็กน้อย

5.1.2 สรุปผลการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

1) การปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนเป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนให้มีการตอบสนองต่อแสงวิชิเบิลเพิ่มมากขึ้น โดยจะนำไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโน จุ่มลงในสารละลายผสมของเอทา-นอลที่มี SbCl_3 14 มิลลิโมลาร์และ Slufer 0.2 มิลลิโมลาร์ พร้อมทั้งฉายแสงลงในทิศทางตั้งฉากกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่า การปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ไม่ได้ทำให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนนั้นเปลี่ยนแปลงไป และในการวิเคราะห์ร่วมกับการใช้เทคนิค Tube Density จะพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์มีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด นอกจากนี้ยังได้ใช้เทคนิค EDX เข้ามาเพื่อศึกษาตำแหน่งของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ซึ่งพบว่าธาตุแอนติโมนีและซัลเฟอร์ได้กระจายอยู่ทั่วผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

2) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าเกิดเป็นโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ซึ่งให้การตอบสนองต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ดีกว่าโครงสร้างของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ไม่เกิดผลึก

3) ในการหาปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) โดยการฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะพบปริมาณของธาตุแอนติโมนีและซัลเฟอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ โดยจะมีปริมาณของธาตุแอนติโมนีและซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา

4) ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectra (DRS) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์โดยการฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าทุกสภาวะจะให้การดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิชิเบิล (ความยาวคลื่นมากกว่า 380 นาโนเมตร) เพิ่ม

มากขึ้น เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา โดยการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิชิเบิลตั้งแต่ 15 นาที่ขึ้นไป จะมีค่าดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกัน

5.1.3 สรุปผลการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

1) จากการศึกษาการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยการทดลองที่กำหนดอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ ในสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสงไม่มีแผ่น ทำให้ทราบว่าเมื่อเวลาผ่านไปทุก 10 นาที่ ปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* จะเพิ่มจำนวนประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร จากจำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร เมื่อทำการเปลี่ยนสภาวะโดยการใช้แสงวิชิเบิลเพียงอย่างเดียวมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคเพียง 0% และสภาวะการใช้แสงยูวีเอเพียงอย่างเดียวสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 3.6% ที่ระยะเวลาการฉายแสง 60 นาที่

2) ในสภาวะการใช้แสงวิชิเบิลร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาในการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ พบว่าสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 1.8% และสภาวะใช้แสงวิชิเบิลร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ถึง 5% ที่เวลา 60 นาที่

3) ในสภาวะการใช้แสงยูวีเอร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (*E.coli*) พบว่าสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 3.3% และสภาวะใช้แสงยูวีเอร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ถึง 10% ที่เวลา 60 นาที่ และเมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที่ สามารถกำจัดเชื้อโรคในน้ำได้ถึง 80%

4) ในการศึกษาพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (*E.coli*) พบว่าการเพิ่มปริมาณของพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่มากขึ้น ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยการใช้แสงวิชิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 4.8% ที่เวลา 60 นาที่

5) ในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ พบว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ ของการใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 21.2% ที่เวลา 60 นาที่

6) ในการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนี ไตรซัลไฟด์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนี ไตรซัลไฟด์สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลานาน ใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งาน

7) ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ที่ใช้แสงยูวีเอขนาด 10 วัตต์ อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณของเชื้อ *Fecal Streptococcus* เริ่มต้นประมาณ $5.30 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร พบว่าในสภาวะการฉายแสงยูวีเอเพียงอย่างเดียวสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 14.6% ส่วนการใช้แสงยูวีเอร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานที่สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำลงได้ 22.2 % และการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนี ไตรซัลไฟด์ร่วมกับแสงยูวีเอจะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำลงได้ 30.2% ที่เวลา 60 นาที

8) จากการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) พบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 2.5×10^5 เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที และค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 1.4×10^{-21} เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที :ซึ่งการที่ค่า $K_L > k_r$ ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานที่ปะติดด้วยแอนติโมนี ไตรซัลไฟด์หมายถึงในระบบนี้จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มากกว่าปฏิกิริยาการดูดซับนั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำไปใช้ประโยชน์

ในการทดลองนี้เป็นเพียงการทดลองขั้นเริ่มต้นซึ่งหากจะต้องนำไปใช้งานจริงจะต้องมีการนำผลการศึกษาไปต่อยอดสำหรับทดลองในขั้นตอนต่อไป อย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษาวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ในการศึกษาขั้นต่อไปได้เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลได้ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมกกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาน สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลานาน ใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งาน และไม่มีการหลุดของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพอาจมีการใช้โลหะผสมตัวอื่นใส่เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพของในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมากขึ้น เช่นงานวิจัยของ Feng Yang *et al.*, (2015) ได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuI}/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ เพื่อไปทดสอบการเป็น Photovoltaic cell พบว่า $\text{CuI}/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 95% ในขณะที่ $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ และ TiO_2 ให้ประสิทธิภาพเพียง 66% และ 7% ตามลำดับ

2) จากการศึกษาพื้นที่ผิวตั้งแต่ 0 – 75 ตารางเซนติเมตร พบว่าพื้นที่ผิวที่ 75 ตารางเซนติเมตรจะให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงที่สุด หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมกขึ้นต้องเพิ่มพื้นที่ผิวให้ที่มากกว่า 75 ตารางเซนติเมตร (ต้องมีการออกแบบ reactor ใหม่) ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวนั้นจะส่งผลกับการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่จะมีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้น เมื่อคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้น การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอลก็สูงขึ้น การฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

3) จากการศึกษาอัตราการไหลตั้งแต่ 130 – 500 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่าอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคืออัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้นนั้นอาจจะต้องมีการศึกษาในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากอัตราการไหลที่มากขึ้นย่อมส่งผลต่อความหนาชั้นฟิล์มของน้ำที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา และอาจจะมีผลกับการส่องผ่านของแสงลงไปไม่ถึงตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้นลดลง

5.2.2 ประเด็นที่ควรทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

- 1) ควรมีการเพิ่มความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของแสงวีซีบีและแสงยูวีที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
- 2) ควรทำการศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยกระบวนการโฟคะตะไลซิส เช่น ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส คลอไรด์ ความกระด้าง เป็นต้น
- 4) อาจมีการศึกษากับน้ำเสียจริง โดยใช้น้ำที่ออกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค

รายการอ้างอิง

- กรกนก อุบลชลเขต. (2559). การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนคอมโพสิตด้วยกรรมวิธีโซล-เจลและการตกตะกอน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ฉบับที่ 23 หน้า 1-7
- กรมควบคุมมลพิษ. (2561). มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินและหลักเกณฑ์ในการพิจารณากำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำ. ได้จาก: <http://www.pcd.go.th/>
- กรมชลประทาน. (2558). แผนการจัดสรรน้ำและเพาะปลูกพืชฤดูฝนในเขตชลประทาน พ.ศ. 2558 กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2551). รายงานฉบับสมบูรณ์ เล่มที่ 7/10 โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะสำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ (พิมพ์ครั้งที่ 6) กรุงเทพฯ:สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ
- กองสุขาภิบาลอาหารและสิ่งแวดล้อม. 2549. คู่มือปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์และสุขาภิบาล. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ
- เกรียงศักดิ์ อุดมโรจน์ศิลป์. (2544). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 1 กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์
- เกรียงศักดิ์ อุดมโรจน์ศิลป์. (2547). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 5 กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์
- เกรียงศักดิ์ อุดมโรจน์ศิลป์. (2557). วิศวกรรมประปา พิมพ์ครั้งที่ 4 (ฉบับปรับปรุง) กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์
- ชัยชาญ ฤทธิเกริกไกร. (2547). น้ำประปากับการอนุรักษ์พลังงาน. วารสารโลก ปีที่ 7 ฉบับที่ 44 มกราคม - มีนาคม 2547.
ได้จาก: <http://teenet.cmu.ac.th/emac/journal/2004/22/04.php>
- ชินจิตต์ บุญเฉิด. (2554). เทคนิคพื้นฐานด้านจุลชีววิทยา ชีวเคมีและพันธุวิศวกรรม. สำนักพิมพ์สมาคมเทคโนโลยีชีวภาพแห่งประเทศไทยถาวร วงศ์สันติธรรมนุกูล. คู่มือวิชาการสุขาภิบาลอาหารในชุมชน : โรคและโทษที่เกิดจากการไม่ปฏิบัติตามหลักสุขาภิบาลอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก
- เชษฐพันธ์ กาฬแก้ว, สุวรรณ เตียรสุวรรณ และ นิรุติ คุณผล. (2538). การฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล โดยใช้เครื่องกำเนิดแสงอุลตราไวโอเลต กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข

- ณัฐพล สุ่มนางศ์. (2554). การออกซิเดชันแบบเลือกเกิดของคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระไฮโดรเตตระเซม
ชั้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/CeO_2 . วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์
ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 110 น.
- ณัฐพันธุ์ ศุภกา. ไซปรีศานาโนเทคโนโลยี. สมบัติทางแม่เหล็กอันแปลกประหลาด. ศูนย์นาโน
เทคโนโลยีแห่งชาติ. จาก <http://vcharkarn.com/varticle/324>
- ถาวร วงศ์สันติธรรมนกุล. (2529). คู่มือวิชาการสุขาภิบาลอาหารในชนบท : โรคและโทษที่เกิดจากการ
ไม่ปฏิบัติตามหลักสุขาภิบาลอาหาร ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหาร
ผ่านศึก
- ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล. (2554). วิศวกรรมประปา กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. (2541). จุลชีววิทยาทั่วไป. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ, ปรีชา สุวรรณพินิจ. (2548). จุลชีววิทยาทั่วไป กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร. (2548). การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมได
ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 72 น.
- ประกอบ วิโรจน์กัญ. (2539). อุทกวิทยาของน้ำผิวดิน ขอนแก่น:คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ประพัฒน์ เป็นตามวา. (2555). การประชุมชนเมืองและชนบท นครราชสีมา: สาขาวิชานามัย
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล. (2557). นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม (environmental
nanotechnology). (พิมพ์ครั้งที่ 1). พิษณุโลก. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
- พิชิต สกมลพรหมณ์.. (2525) สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ บารมีการพิมพ์
- มันสิน ตัลทุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมประปา เล่มที่1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วัฒนาลัย ปานบ้านเกร็ด. (2554). หนังสือชุดเทคโนโลยีชีวภาพ เรื่อง เทคนิคพื้นฐานด้านจุลชีววิทยา
ชีวเคมีและพันธุวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สมาคมชีวภาพแห่งประเทศไทย
- วิรัช มณีสาร. (2538). ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะอากาศตามฤดูกาลของภาคต่าง ๆ ในประเทศ
ไทย. เอกสารวิชาการเลขที่ 551.582-02-2538, ISBN: 974-7567-25-3
- วีระชัย โชคดีบุญ. (2530). เทคนิคการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอ
เดียนสโตร์

- ศรีสัญญา ทองอ่อน. (2555). การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 79 น.
- ศุภยงค์ วรภูมิคุณชัย. (2547). **การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแบคทีเรียกรัมบวกและกรัมลบ** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สำนักอนามัยและสิ่งแวดล้อม. (2551). **คู่มือวิชาการอนามัยสิ่งแวดล้อมพื้นฐานสำหรับเจ้าพนักงานสาธารณสุข** กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก
- สิทธิชัย ต้นธนะสฤกษ์ดี. (2549). **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำ** กรุงเทพฯ : ภาควิชาอนุรักษ์วิทยาศาสตร์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สุจิตรา นาวารัตน์. (2553). การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส การใช้รังสีไวโอเล็ตซีและการเติมคลอรีน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**. 88 น.
- สุวีลักษณ์ รอดทอง. (2540). **ปฏิบัติการจุลชีววิทยาส่งแวดล้อม**. สาขาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุวณี สุขเวชย์, มาลัย วรจิตร. (2536). **แบคทีเรียพื้นฐาน** พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ศิริยอด
- อุดร จารุวัฒน์, จารุรัตน์ สรณิสากุล. (2537). **วิศวกรรมประปา** พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์
- Ali Mansoori. , Alireze Khataee. (2015). **TiO₂ Nanostructured Materials: Synthesis, Properties, and Applications**. **World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.** H.C. Liang.
- Alrousan, D.M.A. , Dunlop, P.S.M. McMurray, T.A. , Byrne, J.A. (2009). Photocatalytic inactivation of E.coli in surface water using immobilised nanoparticle TiO₂ films. **Water Research** 43: 47-54.
- American Public Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. (1998). **Standard Methods for the Examination of water and wastewater Analysis 20th ed.** United States of American. Washington, D.C.American Public Health Association Inc.
- Arslan I. , I.A. Balcioglu, D.W. Bahnemann. (2000). Heterogeneous photocatalytic treatment of simulated dyehouse effluents using novel TiO₂- photocatalysts. **Appl. Catal.B** 26:193–206.

- Avilez Garcia R.G., Meza Avendano C.A., Mou Pal., Praguay Deleado F., Mathews N.R. (2016). Antimony sulfide (Sb_2S_3) thin films by pulsed electrodeposition: Effect of thermal treatment on structural, optical and electrical properties. **Materials Science in Semiconductor Processing** 44: 91-100
- Bekbolet, M., Araz, C.V. (1996). Inactivation of Escherichia coli by photocatalytic oxidation. **Chemosphere** 3(5): 359-965
- Bessekhouad, Y., Robert, D. and Weber, J. V. (2003). Synthesis of photocatalytic TiO_2 nanoparticles: Optimization of the preparation conditions. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** 157(1): 47-53.
- Boyle, M., Sichel, C., Fernandez-Ibanez, P., Arias-Quroz, G. B., Iriarte-Puna, M., Mercado, A., Ubomba-Jaswa, E., and McGuigan, K. G. (2008). Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight condition. **Appl. Environ. Microbiol.** 69: 4549-4555.
- Brammer K. S., Moon K-S., Bae J-M., and Jin S. (2011). Influence of sterilization methods on cell behavior and functionality of osteoblasts cultured on TiO_2 nanotubes. **Materials Science and Engineering C** 31: 873 – 879.
- Busser, G. W.; Mei, B.; Muhler, M. (2012). Optimizing the deposition of hydrogen evolution sites on suspended semiconductor particles using on-line photocatalytic reforming of aqueous methanol solutions. **ChemSusChem** 5(11): 2200–2206.
- Chen, S. C., Lin, S. S. and Hung, Y. H. (2009). TiO_2 nanoceramic films prepared ion beam assisted evaporation for optical application. **Ceramics International** 35(4): 1581-1586.
- Chen, X., Schriver, M., Suen, T. and Mao, S. S. (2007). Fabrication of 10 nm diameter TiO_2 nanotube arrays by titanium anodization. **Thin Solid Films** 515: 8511 – 8514.
- Choi, W-Y., Chung, J., Cho, C-H. and Kim, J-O. (2011). Fabrication and photocatalytic activity of a novel nano structured TiO_2 metal membrane. **Desalination** 279: 359 – 366.
- Chun Hu., Jian Guo., Jihui Qu., and Xuexiang Hu. (2007). Photocatalytic Degradation of Pathogenic Bacteria with AgI/ TiO_2 . under Visible Light Irradiation. **Langmuir** 23: 4982 4987

- Cohen, J., and Shuval, H. I. (1973). Coliform, Fecal Coliform and Fecal streptococci as Indicator of Water Pollution Water, **Air and Soli Pollution** 2: 85-95
- Danae Venieri., Antonia Fraggadaki., Maria Kostadimaa, Efthalia Chatzisymeona., Vassilios Binasb., Apostolos Zachopoulosb., George Kiriakidisb., Dionissios Mantzavinos. (2014). Solar light and metal-doped TiO₂ to eliminate water-transmitted bacterial pathogens: Photocatalyst characterization and disinfection performance. **Applied Catalysis B: Environmental** 154–155: 93–101
- Deng, H., Cheuk, K., Zheng, W.N., Wen, C., Xiao, C.F. (2007). Low temperature preparation of nano Titanium dioxide and its application as antibacterial agents. **Trans nonferrous Metals Society of China**. 17: 700-703.
- DeTacconi, N. R., Chenthamarakshan, C.R., Yogeewaran, G., Watcharenwong, A., de Zoysa, R.S., Basit N.A. and Rajeshwar, K. (2006). Nanoporous TiO₂ and WO₃ films by anodization of titanium and tungsten substrates: Influence of process variables on morphology and photoelectrochemical response. **Journal of Physical Chemistry** 110: 25347 - 25355.
- Di-shun, Z., Jia-lei, W., Xue-heng, Z. and Juan Z. (2009) TiO₂ composites as photocatalyst for degradation of O-methoate. **Chemical Research in Chiness Universities** 25: 543.
- Feng Yang., Jinfang Xi., Li-Yong Gan., Yushu Wang., Shuangwei Lu., Wenli Ma., Fanggong Cai., Yong Zhang., Cuihua Cheng., Yong Zhao. (2016). Improved charge transfer and photoelectrochemical performance of CuI/ Sb₂S₃/ TiO₂ heterostructure nanotube array. **Journal of Colloid and Interface Science** 464: 1–9
- Fetter, C.W. (2001). **Appiled Hydrology**. 4th Edition. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall.
- Freuze, I., Brosillin, S. Laplanche, A., Tonzza, D., Cavard, J. (2005). Effct of chlorination on the formation of odorous disinfection by-produces. **Water Research** 4, 26.
- Fujishima, A., Ishibashi, K. I., Watanabe, T. and Hashimoto, K. (2000). Detection of active oxidative species in TiO₂ photocatalysis using the fluorescence technique. **Electrochemistry Communications**,2(3): 207-210.

- Guilherme Garcia Bessegato, Juliano Carvalho Cardoso, Bianca Ferreira da Silva, Maria Valnice Boldrin Zanon. (2013). Enhanced photoabsorption properties of composites of Ti/TiO₂ nanotubes decorated by Sb₂S₃ and improvement of degradation of hair dye. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** 276: 96–103
- Gao, P., Liu, J.C., Zhang, T., Sun, D.D., Ng, W. (2012). Hierarchical TiO₂/CdS “spindle-like” composite with high photodegradation and antibacterial capability under visible light irradiation. **J. Hazard. Mater.** 229: 209–216.
- Gupta, A. K. and Gupta, M. (2005). Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. **Biomaterials** 26(18): 3995-4021.
- Hinthong K, Kulyhong K, Waraho D, Viravaidya K, Kajitvichyanukul P, Mainiratanachote R. Comparative antibacterial effects of various types of ion-doped titanium dioxide under fluorescent light irradiation. Proceedings, in: **the 10th IEEE International Conference on Nanotechnology, KINTEX**. Korea. August 17-20 2010: 71 (978-1-4244-7031-0).
- Hoffman M. R., Martin S. T., Choe W. and Bahnemann D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. **Chemical Reviews** 95: 69-96.
- Ibanez, J.A., Litter, M.I., Pizarro, R. A. (2003). Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ on *Enterobacter cloacae* comparative study with other Gram negative bacteria. **Journal of Photochemistry and Photobiology A : chemistry** 157: 81-85.
- Jin, Y.; Xi, J.; Zhang, Z.; Xiao, J.; Xiao, F.; Qian, L.; Wang, S. (2015). An ultra-low Pd loading nanocatalyst with efficient catalytic activity. **Nanoscale** 7 (12): 5510–5515.
- Kjellander, J. (1960). Enteric Streptococci as Indicators of Fecal Contamination of Water. **Acco. Pathol. Microbial** 48: 1-124
- Kontos, A. G., Katsanaki, A., Likodimos, V., Maggos, T., Kim, D., Vasilakos, C., Dionysiou, D.D., Schmuki, P. and Falaras, P. (2012). Continuous flow photocatalytic oxidation of nitrogen oxides over anodized nanotubular titania films. **Chemical Engineering Journal** 179: 151 – 157.

- Lee, S.H., Pumprueg, S., Moudgil, B., Sigmund, W. (2005). Inactivation of bacterial endospores by photocatalytic nanocomposites. **Colloids and Surface B: Biointerfaces** 40: 93-98.
- Liao, Y. and Que, W. (2010). Preparation and photocatalytic activity of TiO₂ nanotube powders derived by a rapid anodization process. **Journal of Alloys and Compounds** 505: 243 – 248.
- Linsebigler AL, Lu G, Yates JT Jr. (1995). photocatalysis on TiO₂ Surface: Principle, mechanism and selected results. **Chem Rev:** 95735-95758
- Lonnen, J., Kilvington, S., Kehoe, S.C., Al-Touati, F. and McGuigan, K.G. (2005) Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water. **Water Res.** 39: 877–883.
- Majeda Khraisheh., Lijun Wu ., Ala'a H. Al-Muhtaseb., Mohammad A. Al-Ghouti. (2015) Photocatalytic disinfection of Escherichia coli using TiO₂ P25 and Cu-doped TiO₂. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 28: 369–376
- Maness, P.C., Smolinski, S., Blake, D.M., Huang, Z., Wolfrum, E.J., Jacoby, W.A., (1999). Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism. **Appl. Environ. Microbiol.** 65 (9): 4094–4098
- McDonnell, G. (2009) Sterilization and Disinfection. **Applied Microbiology: Industrial:** 259-548.
- McGuigan, K.G., Mendez-Hermida, F., Castro-Hermida, J.A., Ares-Mazas, E., Kehoe, S.C., Boyle, M., et al., (2006). Batch solar disinfection inactivates oocysts of *Cryptosporidium parvum* and cysts of *Giardia muris* in drinking water. **J. Appl. Microbiol.** 101 (2): 453–463.
- Meng Xiuqing., Xiaozhou Wang., Mianzeng Zhong., Fengmin Wu, Yunzhang Fang. (2013). Sb₂S₃ surface modification induced remarkable enhancement of TiO₂ core/shell nanowires solar cells. **Journal of Solid State Chemistry** 201:75–78
- Mor, G. K., Varghese, O. K., Paulose, M., Shankar, K. and Grimes, C. A. (2006). A review on highly ordered, vertically oriented TiO₂ nanotube arrays: Fabrication, material properties, and solar energy applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells** 90: 2011-2075.

- Nieuwenhuijsen, M. J. , Toledano, M. B. , Eaton, N. E. , Fawell, J. , Elliott, P. , (2000). Chlorination disinfection byproducts in water and their association with adverse reproductive outcomes: a review. **Occup. Environ. Med.** 57: 73–85.
- Omatoyo K. Dalrymplea, Elias Stefanakosa, Maya A. Trotszb, D. Yogi Goswami. (2009). A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection. **Applied Catalysis B: Environmental** 98: 27–38.
- Paleologou, A., Marakas, H., Xekoulotakis, N.P., Moya, A., Vegara, Y., Kalogerakis, N., Gikas, P., Mantzavinos, D. , (2007). Disinfection of water and wastewater by TiO₂ photocatalysis and UV-C irradiation. **Catalysis Today** 129: 136-142.
- Paola, A. D., Cufalo, G., Addamo, M., Bellardita, M., Campostrini, R., Ischia, M., Ceccato, R. and Palmisano, L. (2008). Photocatalytic activity of nanocrystalline TiO₂ (brookite, rutile and brookite - based) powders prepared by thermo hydrolysis of TiCl₄ in aqueous chloride solutions. **Colloids and Surfaces A** 317: 366 - 376.
- Premchand, Y.D., Djenizian, T., Vacandio, F. and Knauth, P. (2006). Fabrication of self - organized TiO₂ nanotubes from columnar titanium thin films sputtered on semiconductor surfaces. **Electrochemistry Communications** 8: 1840 – 1844.
- Reijnders, L. (2008). Hazard reduction for the application of titania nanoparticles in environmental technology. **Journal of Hazardous Materials** 152: 440 – 445.
- Richardson, S. (2003) Disinfection by-produce and other emerging contaminants in drinking water. **Trend in Analytical Chemistry** 22: 666-684
- Robertson, P. K. J. (1996). Semiconductor photocatalysis: An environmentally acceptable alternative production technique and effluent treatment process. **Journal of Cleaner Production** 4: 203 - 212.
- Sahijpal, S., Goswami, J. N. and Davis, A. M. (2000). K, Mg, Ti and Ca isotopic compositions and refractory trace element abundances in hibonites from CM and CV meteorites: Implications for early solar system processes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 64(11): 1989-2005.
- Saito, T., Iwase, T., Horie, J., Morioka, T., (1992). Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO₂ on mutans streptococci. **J. Photochem. Photobiol. B Biol.** 14 (4): 369–379.

- Sellers K. (2009). nanoscale materials, definition and properties. In : Nanotechnology and the environment. **CRC Press**: 11-31.
- Shen, X., Zhang, J. and Tian, B. (2011). Microemulsion-mediated solvothermal synthesis and photocatalytic properties of crystalline titania with controllable phases of anatase and rutile. **Journal of Hazardous Materials** 192: 651 – 657.
- Sun, Y., Wang, G. and Yan K., (2011). TiO₂ nanotubes for hydrogen generation by photocatalytic water splitting in a two-compartment photoelectrochemical cell. **International journal of hydrogen energy** 36: 15502 - 15508.
- Thomas, B. A. (2003). Corneille Radouco-Thomas, MD, 1916–2003. **Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry** 27(7): 1065-1066.
- Tian, G., Fu, H., Jing, L. and Tian, C. (2009). Synthesis and photocatalytic activity of stable nanocrystalline TiO₂ with high crystallinity and large surface area. **Journal of Hazardous Materials** 161: 1122 – 1130.
- United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). **Earth Summit Agenda 21** (Chapter 18). New York. 1992
- Venturini, L. and Bacchi, M. (2009). **design and development of photocatalytic asphalt pavement**. Environment impact of the roads.
- Wang, C., Wu, J., Wang, P., Ao, Y., Hou, J., and Qian, J. (2013). Investigation on the application of titania nanorod arrays to the determination of chemical oxygen demand. **Analytica Chimica Acta** 767: 141-147.
- Wenderich K., Mul G. (2016). Methods, Mechanism, and Applications of Photodeposition in Photocatalysis: A Review. **Chem. Rev.** 116: 14857-14619
- Wernick, S., Pinner, R. and Sheasby, P.G. (1987). “**The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloy**”. Finishing Publications, Middlesex, England.
- World Health Organization, (2000). **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, vol. 2**. Wastewater use in agriculture. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Yanan Jia, Sihui Zhan, Shuanglong Ma, and Qixing Zhou. (2016). Fabrication of TiO₂-Bi₂WO₆ Binanosheet for Enhanced Solar Photocatalytic Disinfection of E. coli: Insights on the Mechanism, **ACS Appl. Mater. Interfaces** 8: 6841-6851

- Yao, K.S., Wang, D.Y., Ho, W.Y., Yan, J.J., Taeng, K.C. (2007). Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ thin film on plant pathogens. **Surface & Coatings Technology** 201: 6886-6888.
- Yu, Y., Wang, J. and Parr, J. F. (2012). Preparation and properties of TiO₂ / fumed silica composite photocatalytic materials. **Procedia Engineering** 27: 448 – 456.
- Zeng, X., Gan, Y. X., Clark, E. and Su, L. (2011). Amphiphilic and photocatalytic behaviors of TiO₂ nanotube arrays on Ti prepared via electrochemical oxidation. **Journal of Alloys and Compounds** 509: L211 – L227.
- Zhao, J. and Yang, X. (2003). Photocatalytic oxidation for indoor air purification: A literature review. **Building and Environment** 38(5): 645-654
- Zhao, J., Wang, X., Chen, R and Li, L., (2005). Fabrication of titanium oxide nanotube arrays by anodic oxidation. **Solid State Communications** 134: 705–710.
- Zhong J.S., Wang Q.Y., Liang H., Chen D.Q., Ji Z.G., (2015) Improving the visible light photocatalytic activity of TiO₂ nanotubes upon decoration with Sb₂S₃ microcrystalline. **Materials Characterization** 109: 95–99



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโตคะตะไลซิส



ก. 1 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแบคทีเรีย *E.coli* ของการหาจำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นด้วยวิธีการวัดความขุ่นของเซลล์ (Cell Density)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	Abs			
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
400	0.038	0.038	0.038	0.038
425	0.034	0.034	0.034	0.034
450	0.031	0.03	0.03	0.030
475	0.027	0.026	0.027	0.027
500	0.024	0.024	0.024	0.024
525	0.023	0.022	0.022	0.022
550	0.021	0.021	0.021	0.021
575	0.019	0.019	0.019	0.019
600	0.018	0.017	0.018	0.018
625	0.017	0.017	0.017	0.017
650	0.016	0.016	0.016	0.016
675	0.014	0.014	0.013	0.014
700	0.012	0.012	0.011	0.012

ก.2 ตารางบันทึกผลการทดลองระหว่างค่า O.D. กับปริมาณของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ของการหาจำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นด้วยวิธีการวัดความขุ่นของเซลล์ (Cell Density)

ค่า O.D.	จำนวนเซลล์ (10^8 cell/100 ml)				S.D.
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0.006	3.4	3.2	3.0	3.2	0.20
0.009	4.3	4.3	4.3	4.3	0.03
0.013	5.5	5.3	5.6	5.5	0.15
0.058	14.7	14.7	14.7	14.7	0.03
0.103	23.0	24.0	25.0	24.0	1.00

ก.3 ตารางบันทึกผลการศึกษาระดับโทของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรีย โคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1

สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที, น้ำตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร										
time	fecal coliform					total coliform				
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	เซลล์/ 100 มิลลิลิตร	S.D.	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	เซลล์/ 100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	32	34	3.40E+08	2.83	-5	40	42.5	4.25E+08	3.54
	-5	36				-5	45			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	45	42	4.20E+08	4.24E	-5	52	49.5	4.95E+08	3.54
	-5	39				-5	47			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
40 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	52	51	5.10E+08	1.41	-5	51	53	5.30E+08	2.83
	-5	50				-5	55			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	72	68.5	6.85E+08	4.95	-5	68	66	6.60E+08	2.83
	-5	65				-5	64			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-

ก.4 ตารางบันทึกผลการศึกษาระดับปริญญาโทของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิ-ฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 2

สถานะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่, น้ำตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร										
time	fecal coliform					total coliform				
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	32	33	3.30E+08	1.41	-5	35	33	3.30E+08	2.83
	-5	34				-5	31			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	52	48.5	4.85E+08	4.95	-5	57	54	5.40E+08	4.24
	-5	45				-5	51			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
40 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	58	59.5	5.95E+08	2.12	-5	62	63.5	6.35E+08	2.12
	-5	61				-5	65			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	72	70	7.00E+08	2.83	-5	65	67.5	6.75E+08	3.54
	-5	68				-5	70			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-

ก.5 ตารางบันทึกผลการศึกษาระดับปริญญาโทของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิ-ฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3

สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาท, น้ำตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร										
time	fecal coliform					total coliform				
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	32	33.5	3.35E+08	2.12	-5	38	37	3.70E+08	1.41
	-5	35				-5	36			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	52	53.5	5.35E+08	2.12	-5	51	50	5.00E+08	1.41
	-5	55				-5	49			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
40 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	60	58.5	5.85E+08	2.12	-5	62	64	6.40E+08	2.83
	-5	57				-5	66			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	70	68	6.80E+08	2.83	-5	69	69.5	6.95E+08	0.701
	-5	66				-5	70			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-

ก.6 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	39	40.5	2.12E+00	3.90E+08	4.05E+08	2.12E+07
	-5	42			4.20E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	42	41.5	7.07E-01	4.20E+08	4.15E+08	7.07E+06
	-5	41			4.10E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	44	44.5	7.07E-01	4.40E+08	4.45E+08	7.07E+06
	-5	45			4.50E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	46	47	1.41E+00	4.60E+08	4.70E+08	1.41E+07
	-5	48			4.80E+08		

ก.7 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	40	39	1.41E+00	4.00E+08	3.90E+08	1.41E+07
	-5	38			3.80E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
10 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	42	39.5	3.54E+00	4.20E+08	3.95E+08	3.54E+07
	-5	37			3.70E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	44	40	5.66E+00	4.40E+08	4.00E+08	5.66E+07
	-5	36			3.60E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
30 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	40	41	1.41E+00	4.00E+08	4.10E+08	1.41E+07
	-5	42			4.20E+08		

ก.7 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10^8 เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	40	42.5	3.54E+00	4.00E+08	4.25E+08	3.54E+07
	-5	45			4.50E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
50 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	41	43	2.83E+00	4.10E+08	4.30E+08	2.83E+07
	-5	45			4.50E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	45	45	0.00E+00	4.50E+08	4.50E+08	0.00E+00
	-5	45			4.50E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-

ก.8 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง Visible, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น ~ 10⁸ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	37	36	1.41E+00	3.70E+08	3.60E+08	1.41E+07
	-5	35			3.50E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
10 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	35	36.5	2.12E+00	3.50E+08	3.65E+08	2.12E+07
	-5	38			3.80E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	33	36.5	4.95E+00	3.30E+08	3.65E+08	4.95E+07
	-5	40			4.00E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
30 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	36	37.5	2.12E+00	3.60E+08	3.75E+08	2.12E+07
	-5	39			3.90E+08		

ก.8 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง Visible, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น ~ 10⁸ เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	41	39	2.83E+00	4.10E+08	3.90E+08	2.83E+07
	-5	37			3.70E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
50 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	60	-	-	-	-	-
	-5	36	40	5.66E+00	3.60E+08	4.00E+08	5.66E+07
	-5	44			4.40E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	48	41.5	9.19E+00	4.80E+08	4.15E+08	9.19E+07
	-5	35			3.50E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-

ก.9 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาทึ, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	37	36.5	7.07E-01	3.70E+08	3.65E+08	7.07E+06
	-5	36			3.60E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
10 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	38	37	1.41E+00	3.80E+08	3.70E+08	1.41E+07
	-5	36			3.60E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	39	37.5	2.12E+00	3.90E+08	3.75E+08	2.12E+07
	-5	36			3.60E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
30 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	40	38	2.83E+00	4.00E+08	3.80E+08	2.83E+07
	-5	36			3.60E+08		

ก.9 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง Visible, TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	39	39.5	7.07E-01	3.90E+08	3.95E+08	7.07E+06
	-5	40			4.00E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
50 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	44	40	5.66E+00	4.40E+08	4.00E+08	5.66E+07
	-5	36			3.60E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	44	42	2.83E+00	4.40E+08	4.20E+08	2.83E+07
	-5	40			4.00E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-

ก.10 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, ไม่มีแผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	25	26	1.41E+00	2.50E+08	2.60E+08	1.41E+07
	-5	27			2.70E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
10 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	25	26.5	2.12E+00	2.50E+08	2.65E+08	2.12E+07
	-5	28			2.80E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	25	27	2.83E+00	2.50E+08	2.70E+08	2.83E+07
	-5	29			2.90E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
30 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	24	27.5	4.95E+00	2.40E+08	2.75E+08	4.95E+07
	-5	31			3.10E+08		

ก.10 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, ไม่มีแผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร
(ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	32	28	5.66E+00	3.20E+08	2.80E+08	5.66E+07
	-5	24			2.40E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
50 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	27	29	2.83E+00	2.70E+08	2.90E+08	2.83E+07
	-5	31			3.10E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	31	30	1.41E+00	3.10E+08	3.00E+08	1.41E+07
	-5	29			2.90E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-

ก.11 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁸ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	54	52	2.83E+00	5.40E+08	5.20E+08	2.83E+07
	-5	50			5.00E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
10 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	49	52.5	4.95E+00	4.90E+08	5.25E+08	4.95E+07
	-5	56			5.60E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	58	53	7.07E+00	5.80E+08	5.30E+08	7.07E+07
	-5	48			4.80E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
30 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	56	54.5	2.12E+00	5.60E+08	5.45E+08	2.12E+07
	-5	53			5.30E+08		

ก.11 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁸ เซลล์/100 มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	59	56.5	3.54E+00	5.90E+08	5.65E+08	3.54E+07
	-5	54			5.40E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
50 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	60	-	-	-	-	-
	-5	56	60	5.66E+00	5.60E+08	6.00E+08	5.66E+07
	-5	64			6.40E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	62	60	2.83E+00	6.20E+08	6.00E+08	2.83E+07
	-5	58			5.80E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-

ก.12 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
0 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	52	53	1.41E+00	5.20E+08	5.30E+08	1.41E+07
	-5	54			5.40E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
10 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	56	58.5	3.54E+00	5.60E+08	5.85E+08	3.54E+07
	-5	61			6.10E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
20 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	57	54	4.24E+00	5.70E+08	5.40E+08	4.24E+07
	-5	51			5.10E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
30 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	54	55.5	2.12E+00	5.40E+08	5.55E+08	2.12E+07
	-5	57			5.70E+08		

ก.12 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร
(ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	cell/100 ml	cell/100 ml	S.D.
40 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	52	57	7.07E+00	5.20E+08	5.70E+08	7.07E+07
	-5	62			6.20E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
50 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	55	59.5	6.36E+00	5.50E+08	5.95E+08	6.36E+07
	-5	64			6.40E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-	-
	-5	62	61	1.41E+00	6.20E+08	6.10E+08	1.41E+07
	-5	60			6.00E+08		
	-6	20>	-	-	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-	-

ก.13 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ทั้ง 7 สภาวะ (ก.6-ก.12), ปริมาณเชื้อเริ่มต้น $\sim 10^8$ เซลล์/100

มิลลิลิตร

Dark, No Catalyst		Visible, No Catalyst		Visible, TiO ₂		Visible, TiO ₂ /Sb ₂ S ₃		UV-A, No Catalyst		UV-A, TiO ₂		UV-A, TiO ₂ /Sb ₂ S ₃	
time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
20	1.02	10	1.01	10	1.01	10	1.01	10	1.01	10	1.01	10	1.01
40	1.1	20	1.03	20	1.01	20	1.03	20	1.02	20	1.02	20	1.02
60	1.16	30	1.05	30	1.04	30	1.04	30	1.06	30	1.05	30	1.05
		40	1.09	40	1.08	40	1.08	40	1.08	40	1.09	40	1.08
		50	1.1	50	1.11	50	1.12	50	1.12	50	1.12	50	1.12
		60	1.15	60	1.15	60	1.15	60	1.15	60	1.14	60	1.15

ก.14 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10^6 เซลล์/100มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	34	35	1	3.40E+06	3.50E+06	1.00E+05
	-3	36			3.60E+06		
	-3	35			3.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	37	36	1	3.70E+06	3.60E+06	1.00E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	36			3.60E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	35	37	2	3.50E+06	3.70E+06	2.00E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	37			3.70E+06		

ก.14 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
40 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	36	37.6 7	1.527525 2	3.60E+06	3.77E+06	1.53E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	38			3.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-

ก.15 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100
มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	40	37.33	2.5166	4.00E+06	3.73E+06	2.52E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	37			3.70E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	37	38	1	3.70E+06	3.80E+06	1.00E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	38			3.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>			-		
	-4	20>			-		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	38	39	1	3.80E+06	3.90E+06	1.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.15 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10^6 เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	diluti on	โคโล นีย์	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	38	39.6666 67	1.52752 52	3.80E+06	3.97E+06	1.53E+ 05
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	38	39.6666 67	1.52752 52	3.80E+06	3.97E+06	1.53E+ 05
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.15 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10^6 เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilutio n	โคโล นี	เฉลี่ย	S.D	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+0 5
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	48	40	8	4.80E+06	4.00E+06	8.00E+0 5
	-3	32			3.20E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-

ก.16 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10^6 เซลล์/
100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	58	59	1	5.80E+06	5.90E+06	1.00E+05
	-3	60			6.00E+06		
	-3	59			5.90E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	57	59.666	2.516	5.70E+06	5.97E+06	2.52E+05
	-3	62			6.20E+06		
	-3	60			6.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>			-		
-4	20>	-					
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	63	60	3	6.30E+06	6.00E+06	3.00E+05
	-3	57			5.70E+06		
	-3	60			6.00E+06		

ก.16 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาทึ, เชื้อเริ่มต้น 0⁶ เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	65	60.666667	4.5092498	6.50E+06	6.07E+06	4.51E+05
	-3	56			5.60E+06		
	-3	61			6.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	67	61	6	6.70E+06	6.10E+06	6.00E+05
	-3	55			5.50E+06		
	-3	61			6.10E+06		

ก.16 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10^6 เซลล์/100
มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	65	61	4	6.50E+06	6.10E+06	4.00E+05
	-3	57			5.70E+06		
	-3	61			6.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	68	61.333	6.506	6.80E+06	6.13E+06	6.51E+05
	-3	55			5.50E+06		
	-3	61			6.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
-4	20>	-		-	-	-	

ก.17 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	48	51.66 6	3.5118	4.80E+06	5.17E+06	3.51E+0 5
	-3	55			5.50E+06		
	-3	52			5.20E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	53	51.66 6	1.5275	5.30E+06	5.17E+06	1.53E+0 5
	-3	50			5.00E+06		
	-3	52			5.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	47	52	5	4.70E+06	5.20E+06	5.00E+0 5
	-3	57			5.70E+06		
	-3	52			5.20E+06		

ก.17 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	62	53	9	6.20E+06	5.30E+06	9.00E+05
	-3	44		4.40E+06			
	-3	53		5.30E+06			
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	51	53.666	2.51666	5.10E+06	5.37E+06	2.52E+05
	-3	56			5.60E+06		
	-3	54			5.40E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-

ก.17 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงVisible, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	diluti on	โคโล นี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	58	54.666	3.5118	5.80E+06	5.47E+06	3.51E+0 5
	-3	51			5.10E+06		
	-3	55			5.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	60	54.666	5.5075	6.00E+06	5.47E+06	5.51E+0 5
	-3	49			4.90E+06		
	-3	55			5.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	

ก.18 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงUV-A, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	36	38	2	3.60E+06	3.80E+06	2.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	38			3.80E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	37.666	1.527	3.90E+06	3.77E+06	1.53E+05
	-3	36			3.60E+06		
	-3	38			3.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	35	37.666	2.516	3.50E+06	3.77E+06	2.52E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	38			3.80E+06		

ก.18 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงUV-A, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	36	38	2	3.60E+06	3.80E+06	2.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	38			3.80E+06		
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	35	38.666667	3.5118846	3.50E+06	3.87E+06	3.51E+05
	-3	42			4.20E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-

ก.18 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงUV-A, TiO₂, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	45	38.6666	6.506	4.50E+06	3.87E+06	6.51E+05
	-3	32			3.20E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	38	39	1	3.80E+06	3.90E+06	1.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.19 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง visible , TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	38	39	1	3.80E+06	3.90E+06	1.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	38.666	3.511	4.20E+06	3.87E+06	3.51E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	39	2	4.10E+06	3.90E+06	2.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.19 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง visible , TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาทึ, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร
(ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	39.6666	2.516611	4.20E+06	3.97E+06	2.52E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+05
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-

ก.19 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสง visible , TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร
(ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	42	40.6	1.527	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+0 5
	-3	39			3.90E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	38	40.6	2.516	3.80E+06	4.07E+06	2.52E+0 5
	-3	43			4.30E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.20 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงUV-A, TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	41	4	4.50E+06	4.10E+06	4.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	41			4.10E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	43	40	3	4.30E+06	4.00E+06	3.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	40	5	4.50E+06	4.00E+06	5.00E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	40			4.00E+06		

ก.20 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงUV-A, TiO_2/Sb_2S_3 , อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร
(ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+05
	-3	41		4.10E+06			
-3	40	4.00E+06					
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	40.666	1.5275	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+05
	-3	39		3.90E+06			
	-3	41		4.10E+06			
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-

ก.20 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:
แสงUV-A, TiO₂/Sb₂S₃, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶ เซลล์/100 มิลลิลิตร
(ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	36	40.6666 67	4.50924 98	3.60E+06	4.07E+06	4.51E+05
	-3	45			4.50E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	33	40	6.55743 85	3.30E+06	4.00E+06	6.56E+05
	-3	46			4.60E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	

ก.21 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำทิ้ง 7 สภาวะ (ก.14-ก.21), ปริมาณเชื้อเริ่มต้น $\sim 10^6$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

Dark, No Catalyst		UV-A, No Catalyst		Visible, No Catalyst		UV-A, TiO ₂		Visible, TiO ₂		UV-A, TiO ₂ /Sb ₂ S ₃		Visible, TiO ₂ /Sb ₂ S ₃	
time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀
0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
20	1.03	10	1.02	10	1.00	10	0.99	10	1.01	10	0.99	10	0.98
40	1.06	20	1.04	20	1.01	20	1.00	20	1.02	20	0.99	20	0.98
60	1.08	30	1.06	30	1.03	30	1.02	30	1.03	30	1.00	30	0.98
		40	1.06	40	1.04	40	1.03	40	1.03	40	1.02	40	0.99
		50	1.07	50	1.06	50	1.04	50	1.03	50	1.02	50	0.99
		60	1.07	60	1.06	60	1.04	60	1.04	60	1.03	60	0.98

ก.22 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 2 แผ่น (25 ตารางเซนติเมตร)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	40	40.33 3	0.577	4.00E+06	4.03E+06	5.77E+0 4
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	43	40.66 6	2.081	4.30E+06	4.07E+06	2.08E+0 5
	-3	40			4.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	41	2	4.10E+06	4.10E+06	2.00E+0 5
	-3	43			4.30E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.22 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 2 แผ่น (25 ตารางเซนติเมตร) (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	41.66	3.5118	4.20E+06	4.17E+06	3.51E+05
	-3	45			4.50E+06		
-3	38	3.80E+06					
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	42.33	2.5166	4.50E+06	4.23E+06	2.52E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	42			4.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-

ก.22 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 2 แผ่น (25 ตารางเซนติเมตร) (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	43	42.6666	2.5166	4.30E+06	4.27E+06	2.52E+05
	-3	45			4.50E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80			-		
	-2	>80			-		
	-3	47	43	3.6055	4.70E+06	4.30E+06	3.61E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	42			4.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.23 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 4 แผ่น (50 ตารางเซนติเมตร)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	50	57.666	7.5055	5.00E+06	5.77E+06	7.51E+05
	-3	65			6.50E+06		
	-3	58			5.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	56	57.666	2.0816	5.60E+06	5.77E+06	2.08E+05
	-3	57			5.70E+06		
	-3	60			6.00E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	60	58	2	6.00E+06	5.80E+06	2.00E+05
	-3	56			5.60E+06		
	-3	58			5.80E+06		

ก.23 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 4 แผ่น (50 cm^2) (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	58	59	1	5.80E+06	5.90E+06	1.00E+05
	-3	60			6.00E+06		
	-3	59			5.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	59	59.666	2.081	5.90E+06	5.97E+06	2.08E+05
	-3	62			6.20E+06		
	-3	58			5.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-

ก.23 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 4 แผ่น (50 cm^2) (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	61	61	2	6.10E+06	6.10E+06	2.00E+05
	-3	63			6.30E+06		
	-3	59			5.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	62	61	1	6.20E+06	6.10E+06	1.00E+05
	-3	60			6.00E+06		
	-3	61			6.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.24 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	38	39	1	3.80E+06	3.90E+06	1.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	38.333	3.5118	4.20E+06	3.83E+06	3.51E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	38			3.80E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	39	2	4.10E+06	3.90E+06	2.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.24 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น (75 cm^2) (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	39.33 3	2.5166	4.20E+06	3.93E+06	2.52E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+05
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.24 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง Visible, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น (75 cm^2) (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
	-3	42	40	2	4.20E+06	4.00E+06	2.00E+05
	-3	38			3.80E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>			-	-	-
	-4	20>			-	-	-
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80			-	-	-
	-2	>80			-	-	-
	-3	38	40.333	2.5166	3.80E+06	4.03E+06	2.52E+05
	-3	43			4.30E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>			-	-	-
	-4	20>			-	-	-

ก.25 ตารางบันทึกผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ทั้ง 3 สภาวะ (ก.22-ก.25)

2 แผ่น (25 ตารางเซนติเมตร)		4 แผ่น (50 ตารางเซนติเมตร)		6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร)	
time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀
0	1.00	0	1.00	0	1.00
10	1.01	10	1.00	10	0.98
20	1.02	20	1.01	20	1.00
30	1.03	30	1.02	30	1.01
40	1.05	40	1.03	40	1.03
50	1.06	50	1.05	50	1.03
60	1.07	60	1.06	60	1.03



ก.26 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	38	39	1	3.80E+06	3.90E+06	1.00E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	38.66	3.5118	4.20E+06	3.87E+06	3.51E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	39			3.90E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	39	2	4.10E+06	3.90E+06	2.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.26 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ: สภาวะ:แสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	39.66 6	2.5166	4.20E+06	3.97E+06	2.52E+0 5
	-3	37			3.70E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+0 5
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.26 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ: สภาวะ:แสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	42	40.33	1.5275	4.20E+06	4.03E+06	1.53E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	38	40.33	2.5166	3.80E+06	4.03E+06	2.52E+05
	-3	43			4.30E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.27 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	42	6.5574	4.10E+06	4.20E+06	6.56E+05
	-3	49			4.90E+06		
	-3	36			3.60E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	41	2	3.90E+06	4.10E+06	2.00E+05
	-3	41			4.10E+06		
	-3	43			4.30E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	40	41.333	3.2145	4.00E+06	4.13E+06	3.21E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	45			4.50E+06		

ก.27 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ สภาวะ:แสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	41.66 6	2.0816	4.10E+06	4.17E+06	2.08E+0 5
	-3	44			4.40E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	42.33 3	1.5275	4.20E+06	4.23E+06	1.53E+0 5
	-3	44			4.40E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.27 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ: สภาวะ:แสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	41	43	4.3588	4.10E+06	4.30E+06	4.36E+05
	-3	48			4.80E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80			-	-	-
	-2	>80			-	-	-
	-3	44	42.666	3.2145	4.40E+06	4.27E+06	3.21E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	45			4.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.28 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	41	4	4.50E+06	4.10E+06	4.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	43	40	3	4.30E+06	4.00E+06	3.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	40	5	4.50E+06	4.00E+06	5.00E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	40			4.00E+06		

ก.28 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ: สภาวะ:แสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+05
	-3	41		4.10E+06			
	-3	40		4.00E+06			
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	40.66 6	1.52 7	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+05
	-3	39		3.90E+06			
	-3	41		4.10E+06			
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.28 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	36	40.66	4.5092	3.60E+06	4.07E+06	4.51E+05
	-3	45			4.50E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	35	40.66	5.5075	3.50E+06	4.07E+06	5.51E+05
	-3	46			4.60E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
-4	20>	-	-	-	-	-	

ก.30 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	41	4	4.50E+06	4.10E+06	4.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	43	40	3	4.30E+06	4.00E+06	3.00E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45	40	5	4.50E+06	4.00E+06	5.00E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	40			4.00E+06		

ก.30 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ: สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+05
	-3	41			4.10E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	40.666	1.527	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.30 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	36	40.666	4.5092	3.60E+06	4.07E+06	4.51E+05
	-3	45			4.50E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	35	40.666	5.5075	3.50E+06	4.07E+06	5.51E+05
	-3	46			4.60E+06		
	-3	41			4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.31 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	34	36.66	2.3094	3.40E+06	3.67E+06	2.31E+05
	-3	38			3.80E+06		
	-3	38			3.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	38	34.66	3.0550	3.80E+06	3.47E+06	3.06E+05
	-3	34			3.40E+06		
	-3	32			3.20E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	35	34.666	4.5092	3.50E+06	3.47E+06	4.51E+05
	-3	30			3.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.31 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)
 ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, TiO₂/Sb₂S₃ 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	30	34	4	3.00E+06	3.40E+06	4.00E+05
	-3	34		3.40E+06			
	-3	38		3.80E+06			
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	0	24	20.80	0.00E+00	2.40E+06	2.08E+06
	-3	37		8	3.70E+06		
	-3	35		3.50E+06			
	-4	30	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.31 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ: สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	34	33.66	4.5092	3.40E+06	3.37E+06	4.51E+05
	-3	38			3.80E+06		
	-3	29			2.90E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	32	33.666	1.52752	3.20E+06	3.37E+06	1.53E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	34			3.40E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.32 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	29	28	2.6457 5	2.90E+06	2.80E+06	2.65E+0 5
	-3	25			2.50E+06		
	-3	30			3.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	29	26.33	2.5166	2.90E+06	2.63E+06	2.52E+0 5
	-3	24			2.40E+06		
	-3	26			2.60E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	23	25.66	2.5166	2.30E+06	2.57E+06	2.52E+0 5
	-3	28			2.80E+06		
	-3	26			2.60E+06		

ก.32 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ: สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	27	25.33 3	3.7859	2.70E+06	2.53E+06	3.79E+05
	-3	28			2.80E+06		
	-3	21			2.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	21	24.66	3.2145	2.10E+06	2.47E+06	3.21E+05
	-3	26			2.60E+06		
	-3	27			2.70E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.32 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*)

ในน้ำ: สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	24	24.33	2.5166	2.40E+06	2.43E+06	2.52E+05
	-3	27			2.70E+06		
	-3	22			2.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80			-	-	-
	-2	>80			-	-	-
	-3	25	24.33	1.1547	2.50E+06	2.43E+06	1.15E+05
	-3	23			2.30E+06		
	-3	25			2.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	

ก.33 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ทั้ง 6 สภาวะของแสง UV-A (ก.26-ก.32)

Visible, 130 มิลลิลิตร/ นาที		Visible, 200 มิลลิลิตร/ นาที		Visible, 300 มิลลิลิตร/ นาที		UV-A, 130 มิลลิลิตร/ นาที		UV-A, 300 มิลลิลิตร/ นาที		UV-A, 500 มิลลิลิตร/ นาที	
time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀
0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
10	0.99	10	0.98	10	0.96	10	0.98	10	0.95	10	0.94
20	1.00	20	0.98	20	0.98	20	0.98	20	0.95	20	0.92
30	1.02	30	0.99	30	0.98	30	0.98	30	0.93	30	0.90
40	1.03	40	1.01	40	0.99	40	0.99	40	0.93	40	0.88
50	1.03	50	1.02	50	1.01	50	0.99	50	0.92	50	0.87
60	1.03	60	1.02	60	1.01	60	0.99	60	0.92	60	0.87



ก.34 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่อกันในระยะ 300 นาที สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	46	40.33	4.9328	4.60E+06	4.03E+06	4.93E+05
	-3	38			3.80E+06		
	-3	37			3.70E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	37.66	1.5275	3.90E+06	3.77E+06	1.53E+05
	-3	38			3.80E+06		
	-3	36			3.60E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	37	37.33	1.5275	3.70E+06	3.73E+06	1.53E+05
	-3	39			3.90E+06		
	-3	36			3.60E+06		

ก.34 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 ต่อเนื่องกันเวลา 300 นาที สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที
 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	32	36.66	4.1633	3.20E+06	3.67E+06	4.16E+05
	-3	40			4.00E+06		
	-3	38			3.80E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	39	36.33	2.309	3.90E+06	3.63E+06	2.31E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	35			3.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-

ก.34 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 ต่อเนื่องกันเวลา 300 นาที สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที
 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	35	35.66	1.1547	3.50E+06	3.57E+06	1.15E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	37			3.70E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	35	34.33	3.0550	3.50E+06	3.43E+06	3.06E+05
	-3	31			3.10E+06		
	-3	37			3.70E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		
90 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	31	33.66	2.3094	3.10E+06	3.37E+06	2.31E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	35			3.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	

ก.34 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 ต่อเนื่องกันเวลา 300 นาที สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที
 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
120 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	32	32.3	2.5166	3.20E+06	3.23E+06	2.52E+05
	-3	30			3.00E+06		
	-3	35			3.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
180 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	31	32	2.6457	3.10E+06	3.20E+06	2.65E+05
	-3	35			3.50E+06		
	-3	30			3.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
240 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	33	31	2.6457	3.30E+06	3.10E+06	2.65E+05
	-3	32			3.20E+06		
	-3	28			2.80E+06		

ก.34 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันเวลา 300 นาที สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

300 min	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
300 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	32	29.66	3.2145	3.20E+06	2.97E+06	3.21E+05
	-3	31			3.10E+06		
	-3	26			2.60E+06		
	-4	20>					
	-4	20>				-	-
	-4	20>				-	-

ก.34 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันเวลา 300 นาที สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	cell/100ml	C/C ₀
0	4.03E+06	1
10	3.77E+06	0.933884
20	3.73E+06	0.92562
30	3.67E+06	0.909091
40	3.63E+06	0.900826
50	3.57E+06	0.884298
60	3.43E+06	0.85124
90	3.37E+06	0.834711
120	3.23E+06	0.801653
180	3.20E+06	0.793388
240	3.10E+06	0.768595
300	2.97E+06	0.735537

ก.35 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 1

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	79	75.33	3.5118	7.90E+06	7.53E+06	3.51E+05
	-3	75			7.50E+06		
	-3	72			7.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
-4	20>	-		-	-	-	
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	75	71	3.6055	7.50E+06	7.10E+06	3.61E+05
	-3	70			7.00E+06		
	-3	68			6.80E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	71	68.66	2.516	7.10E+06	6.87E+06	2.52E+05
	-3	66			6.60E+06		
	-3	69			6.90E+06		

ก.35 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 1 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	69	68	2.6457	6.90E+06	6.80E+06	2.65E+05
	-3	70		7.00E+06			
	-3	65		6.50E+06			
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	73	66.666	5.6862	7.30E+06	6.67E+06	5.69E+05
	-3	62		6.20E+06			
	-3	65		6.50E+06			
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.35 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 1 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	68	65.33	2.5166	6.80E+06	6.53E+06	2.52E+05
	-3	63			6.30E+06		
	-3	65			6.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	60	64.66	6.4291	6.00E+06	6.47E+06	6.43E+05
	-3	72			7.20E+06		
	-3	62			6.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.36 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 2

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	74	74.66	3.0550	7.40E+06	7.47E+06	3.06E+05
	-3	78			7.80E+06		
	-3	72			7.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	70	70.66	2.0816	7.00E+06	7.07E+06	2.08E+05
	-3	73			7.30E+06		
	-3	69			6.90E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	71	68.33	2.5166	7.10E+06	6.83E+06	2.52E+05
	-3	68			6.80E+06		
	-3	66			6.60E+06		

ก.36 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 2 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	67	67.33	2.5166	6.70E+06	6.73E+06	2.52E+05
	-3	65			6.50E+06		
	-3	70			7.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	62	65.666	3.5118	6.20E+06	6.57E+06	3.51E+05
	-3	69			6.90E+06		
	-3	66			6.60E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-

ก.36 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 2 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	55	64.33	8.1445	5.50E+06	6.43E+06	8.14E+05
	-3	68			6.80E+06		
	-3	70			7.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	64	63.666	1.5275	6.40E+06	6.37E+06	1.53E+05
	-3	65			6.50E+06		
	-3	62			6.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
-4	20>	-		-	-	-	

ก.37 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 3

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	50	49	6.5574	5.00E+06	4.90E+06	6.56E+05
	-3	42			4.20E+06		
	-3	55			5.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	
	-4	20>		-	-	-	
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	43	46.33	3.5118	4.30E+06	4.63E+06	3.51E+05
	-3	50			5.00E+06		
	-3	46			4.60E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	41	44.66	3.5118	4.10E+06	4.47E+06	3.51E+05
	-3	48			4.80E+06		
	-3	45			4.50E+06		

ก.37 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 3 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
30 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	44	44	1	4.40E+06	4.40E+06	1.00E+05
	-3	45			4.50E+06		
	-3	43			4.30E+06		
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
40 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	40	43.33	4.163	4.00E+06	4.33E+06	4.16E+05
	-3	48			4.80E+06		
	-3	42			4.20E+06		
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.37 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้งที่ 3 (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	48	42.66	5.5075	4.80E+06	4.27E+06	5.51E+05
	-3	37			3.70E+06		
	-3	43			4.30E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
60 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	19	35.33	14.224	1.90E+06	3.53E+06	1.42E+06
	-3	45			4.50E+06		
	-3	42			4.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
-4	20>	-	-	-	-		

ก.38 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ ในน้ำ ทั้ง 3 ซ้ำ (ก.35-ก.38)

ซ้ำที่ 1			ซ้ำที่ 2			ซ้ำที่ 3		
time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C ₀	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C ₀	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C ₀
0	7.53E+06	1	0	7.47E+06	1	0	4.90E+06	1
10	7.10E+06	0.942478	10	7.07E+06	0.946429	10	4.63E+06	0.945578
20	6.87E+06	0.911504	20	6.83E+06	0.915179	20	4.47E+06	0.911565
30	6.80E+06	0.902655	30	6.73E+06	0.901786	30	4.40E+06	0.897959
40	6.67E+06	0.884956	40	6.57E+06	0.879464	40	4.33E+06	0.884354
50	6.53E+06	0.867257	50	6.43E+06	0.861607	50	4.27E+06	0.870748
60	6.47E+06	0.858407	60	6.37E+06	0.852679	60	4.20E+06	0.857143



ก.39 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ: ไม่มีแสง, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	55	53	2.6457	5.50E+06	5.30E+06	2.65E+05
	-2	50			5.00E+06		
	-2	54			5.40E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
20 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	54	53.3	3.0550	5.40E+06	5.33E+06	3.06E+05
	-2	50			5.00E+06		
	-2	56			5.60E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
40 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-

ก.39 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ: ไม่มีแสง, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย, เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-2	54	53.66	1.5275	5.40E+06	5.37E+06	1.53E+05
	-2	55			5.50E+06		
	-2	52			5.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
60 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80	-	-	-	-	-
	-2	55	54.33	2.0816	5.50E+06	5.43E+06	2.08E+05
	-2	56			5.60E+06		
	-2	52			5.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	

ก.40 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	73	71.33	1.5275	7.30E+06	7.13E+06	1.53E+05
	-2	70			7.00E+06		
	-2	71			7.10E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	
	-3	20>		-	-	-	
10 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	70	69.66	2.5166	7.00E+06	6.97E+06	2.52E+05
	-2	67			6.70E+06		
	-2	72			7.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	
	-3	20>		-	-	-	
20 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	69	69.33	4.5092	6.90E+06	6.93E+06	4.51E+05
	-2	74			7.40E+06		
	-2	65			6.50E+06		

ก.40 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
30 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	79	70	8.5440	7.90E+06	7.00E+06	8.54E+05
	-2	69		-	6.90E+06		
	-2	62		-	6.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
40 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	60	65.66	6.0277	6.00E+06	6.57E+06	6.03E+05
	-2	72		-	7.20E+06		
	-2	65		-	6.50E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
50 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-

ก.40 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-2	68	64.33	4.0414	6.80E+06	6.43E+06	4.04E+05
	-2	65			6.50E+06		
	-2	60			6.00E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
60 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80			-	-	-
	-1	>80			-	-	-
	-2	60	62.66	3.0550	6.00E+06	6.27E+06	3.06E+05
	-2	66			6.60E+06		
	-2	62			6.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	

ก.41 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, TiO₂ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	59	55.66	3.0550	5.90E+06	5.57E+06	3.06E+05
	-2	53			5.30E+06		
	-2	55			5.50E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
10 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	54	53	3.6055	5.40E+06	5.30E+06	3.61E+05
	-2	49			4.90E+06		
	-2	56			5.60E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
20 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	54	51	2.645	5.40E+06	5.10E+06	2.65E+05
	-2	49			4.90E+06		
	-2	50			5.00E+06		

ก.41 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, TiO₂ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
30 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	56	49.66	7.0945	5.60E+06	4.97E+06	7.09E+05
	-2	42			4.20E+06		
	-2	51			5.10E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
40 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	50	48	2	5.00E+06	4.80E+06	2.00E+05
	-2	46			4.60E+06		
	-2	48			4.80E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
50 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-

ก.41 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, TiO₂ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-2	50	47.66	2.5166	5.00E+06	4.77E+06	2.52E+05
	-2	48			4.80E+06		
	-2	45			4.50E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
60 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80			-	-	-
	-1	>80			-	-	-
	-2	48	44.66	3.5118	4.80E+06	4.47E+06	3.51E+05
	-2	45			4.50E+06		
	-2	41			4.10E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	

ก.42 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที

time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	78	77	1	7.80E+06	7.70E+06	1.00E+05
	-2	76			7.60E+06		
	-2	77			7.70E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
10 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	68	69	2.645	6.80E+06	6.90E+06	2.65E+05
	-2	72			7.20E+06		
	-2	67			6.70E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
20 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	69	65.66	3.511	6.90E+06	6.57E+06	3.51E+05
	-2	66			6.60E+06		
	-2	62			6.20E+06		

ก.42 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	Fecal Streptococcus						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/ 100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
30 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	60	64.333	4.0414	6.00E+06	6.43E+06	4.04E+05
	-2	68			6.80E+06		
	-2	65			6.50E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
40 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	65	62.333	3.7859	6.50E+06	6.23E+06	3.79E+05
	-2	64			6.40E+06		
	-2	58			5.80E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
50 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-

ก.42 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

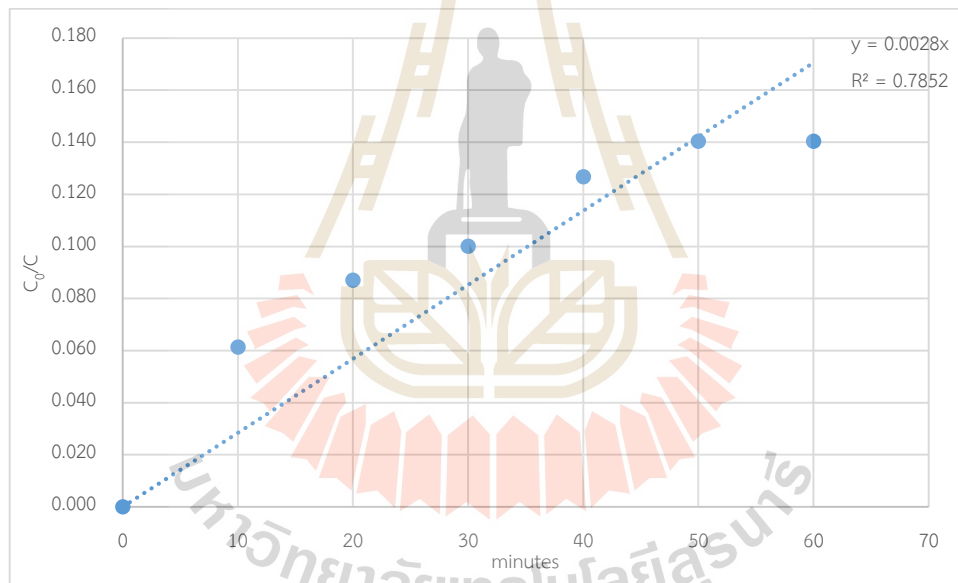
time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-2	60	60	2	6.00E+06	6.00E+06	2.00E+05
	-2	58			5.80E+06		
	-2	62			6.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
60 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80			-	-	-
	-1	>80			-	-	-
	-2	52	55.66	3.2145	5.20E+06	5.57E+06	3.21E+05
	-2	58			5.80E+06		
	-2	57			5.70E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	

ก.43 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ ทั้ง 4 สภาวะ (ก.39-ก.42)

Dark, No Catalyst		UV-A, No Catalyst		UV-A, TiO ₂		UV-A, TiO ₂ /Sb ₂ S ₃	
time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀	time	C/C ₀
0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
20	1.01	10	0.98	10	0.95	10	0.90
40	1.01	20	0.97	20	0.92	20	0.85
60	1.03	30	0.95	30	0.89	30	0.84
		40	0.92	40	0.86	40	0.81
		50	0.90	50	0.86	50	0.78
		60	0.88	60	0.80	60	0.72

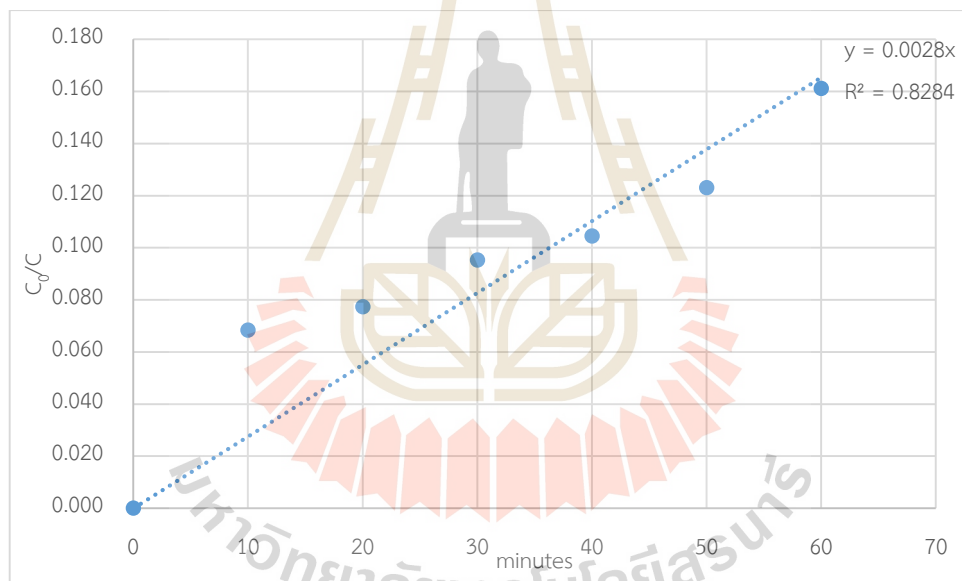
ก.44 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลพลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $2.80E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	Cell/100ml	C_0/C	$\ln(C_0/C)$
0	$2.80E+06$	$1.00E+00$	0.000
10	$2.63E+06$	$1.06E+00$	0.061
20	$2.57E+06$	$1.09E+00$	0.087
30	$2.53E+06$	$1.11E+00$	0.100
40	$2.47E+06$	$1.14E+00$	0.127
50	$2.43E+06$	$1.15E+00$	0.140
60	$2.43E+06$	$1.15E+00$	0.140



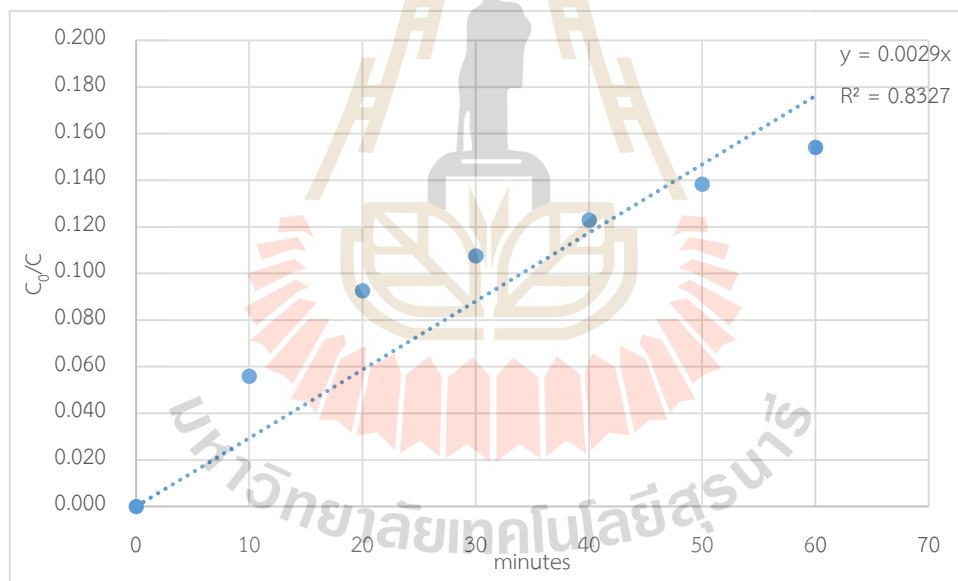
ก.45 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลพลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $4.03E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	Cell/100ml	C_0/C	$\ln(C_0/C)$
0	$4.03E+06$	$1.00E+00$	0.000
10	$3.77E+06$	$1.07E+00$	0.068
20	$3.73E+06$	$1.08E+00$	0.077
30	$3.67E+06$	$1.10E+00$	0.095
40	$3.63E+06$	$1.11E+00$	0.104
50	$3.57E+06$	$1.13E+00$	0.123
60	$3.43E+06$	$1.17E+00$	0.161



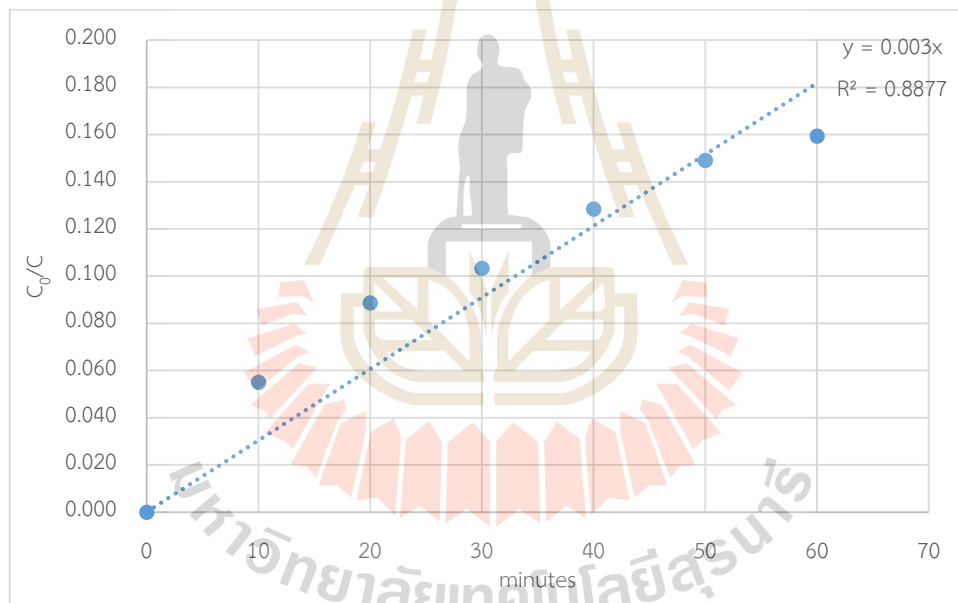
ก.46 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลพลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $4.90E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	Cell/100ml	C_0/C	$\ln(C_0/C)$
0	$4.90E+06$	$1.00E+00$	0.000
10	$4.63E+06$	$1.06E+00$	0.056
20	$4.47E+06$	$1.10E+00$	0.093
30	$4.40E+06$	$1.11E+00$	0.108
40	$4.33E+06$	$1.13E+00$	0.123
50	$4.27E+06$	$1.15E+00$	0.138
60	$4.20E+06$	$1.17E+00$	0.154



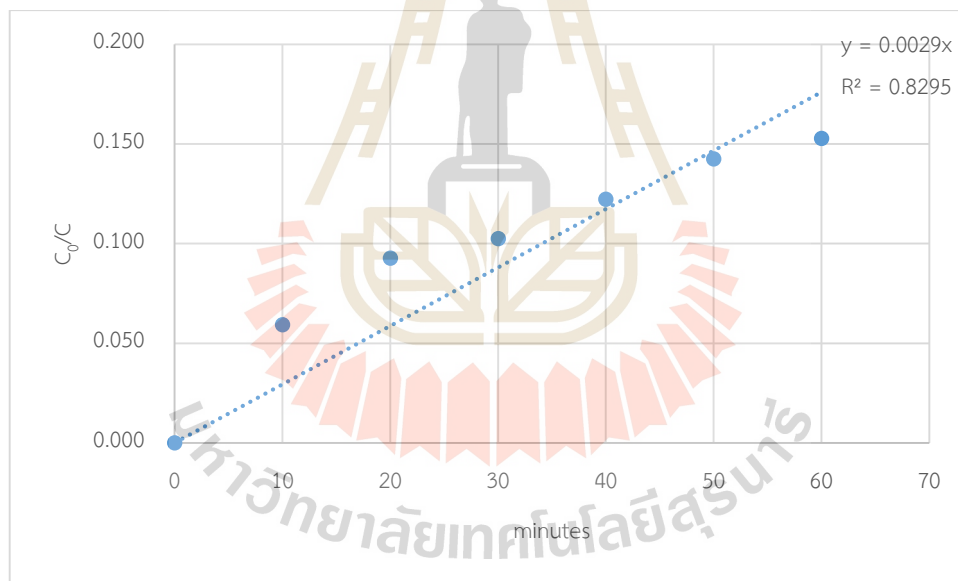
ก.47 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลพลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $7.07E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	Cell/100ml	C_0/C	$\ln(C_0/C)$
0	$7.47E+06$	$1.00E+00$	0.000
10	$7.07E+06$	$1.06E+00$	0.055
20	$6.83E+06$	$1.09E+00$	0.089
30	$6.73E+06$	$1.11E+00$	0.103
40	$6.57E+06$	$1.14E+00$	0.128
50	$6.43E+06$	$1.16E+00$	0.149
60	$6.37E+06$	$1.17E+00$	0.159



ก.48 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลพศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $2.80E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

time	Cell/100ml	C_0/C	$\ln(C_0/C)$
0	$7.53E+06$	$1.00E+00$	0.000
10	$7.10E+06$	$1.06E+00$	0.059
20	$6.87E+06$	$1.10E+00$	0.093
30	$6.80E+06$	$1.11E+00$	0.102
40	$6.67E+06$	$1.13E+00$	0.122
50	$6.53E+06$	$1.15E+00$	0.142
60	$6.47E+06$	$1.16E+00$	0.153



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะไม่มีแสง ไม่มีแผ่น



Growth rate คือ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทั่วไปจะเป็นการทวีของจำนวนแบคทีเรีย เป็นการแบ่งตัวจากหนึ่งเซลล์เป็นสองเซลล์ พบว่าแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนเป็นแบบอนุกรมเรขาคณิต คือ $1 > 2 > 4 > 8 > 16 > 32 \dots$ จำนวนครั้งที่แบ่งเรียกว่า Generation time คือช่วงระยะเวลาในการแบ่งเซลล์แต่ละครั้งเพื่อให้ได้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าต่อหน่วยเวลา ซึ่งการแบ่งตัวนั้นก็แตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ชนิดของอาหาร อุณหภูมิ เป็นต้น ในการศึกษาเพื่อหา generation time จะทำการนับจำนวนของแบคทีเรียที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาโดยใช้สมการดังนี้

$$G = \frac{t}{3.3 \log \left[\frac{C}{C_0} \right]} \quad (\text{ข-1})$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$= \frac{1 \text{ hr}}{3.3 \log \left[\frac{3.77 \times 10^4 \frac{\text{cell}}{\text{ml}}}{3.50 \times 10^4 \frac{\text{cell}}{\text{ml}}} \right]}$$

จะสามารถคำนวณค่า G เท่ากับ

$$G = 9.39 \text{ ชั่วโมง หรือ } 563.37 \text{ นาที}$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่า และกลับข้างสมการเพื่อหาค่า C_e จะได้

$$C_1 = \left[\frac{\text{time}}{536.37 \times 3.3} \right] + \log C_0 \quad (\text{ข-2})$$

และ take 10^x เพื่อถอด log ออก จะได้

$$C_e = 10^{(C_1)} \quad (\text{ข-3})$$

ซึ่งจะในการทดลองจะใช้สองสมการนี้ เพื่อคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นยกอย่าง ดังนี้

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสภาวะ ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นในการทดลองเท่ากับ 3.50×10^6 เซลล์/100 มิลลิลิตร

จากสมการที่ ข-2

$$C_1 = \left[\frac{\text{time}}{536.37 \times 3.3} \right] + \log C_0$$

แทนตัวเลขในสมการ สมมติให้เป็นนาทีที่ 0

$$C_1 = \left[\frac{0}{536.37 \times 3.3} \right] + \log 3.50 \times 10^6 = 6.544068$$

จากสมการ ข-3

$$C_e = 10^{(C_1)}$$

$$C_e = 10^{(6.544068)} = 3.50 \times 10^6 \text{ เซลล์/100 มิลลิลิตร}$$

และเช่นกัน ในเวลาที่ 10,20,30,40,50 และ 60 นาที ก็จะใช้การคำนวณที่คล้ายกันกับนาที 0 จะได้

ตาราง ค.1

ข.1 ข้อมูลการคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในสภาวะไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา

time	สูตรคำนวณ (C1) สมการที่ (ข-2)	(C _e) cell/100 ml สมการที่ (ข-3)
0	6.544068	3.50E+06
10	6.549718	3.55E+06
20	6.555367	3.59E+06
30	6.561017	3.64E+06
40	6.566667	3.69E+06
50	6.572316	3.74E+06
60	6.577966	3.78E+06

ภาคผนวก ค.

ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส



ค.1 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงยูวี อัตรากาโรไล 130 มิลลิลิตร/นาที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา 6 แผ่น

ไม่มีแสง, ไม่มีแผ่น				แสงยูวีอ ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา					แสงยูวีอ แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน					แสงยูวีอ แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ประดิษฐ์แอนติโมนี โดรซัลไฟด์				
time	จำนวน	cell/100 ml	C/Co	time	cell/100ml	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ	time	cell/100ml	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ	time	cell/100ml	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4} - {5}	{7} = {6} x 100			{8}	{9} = {4} - {5}	{10} = {6} x 100			{11}	{12} = {4} - {5}	{13} = {6} x 100
0	6.544068044	3.50E+06	1.000	0	5.90E+06	1.000	0.000	0.000	0	3.80E+06	1	0.000	0.000	0	4.10E+06	1.000	0.000	0.000
10	6.549717695	3.55E+06	1.015	10	5.97E+06	1.011	0.004	0.360	10	3.77E+06	0.992105263	0.023	2.279	10	4.00E+06	0.976	0.039	2.929
20	6.555367345	3.59E+06	1.026	20	6.00E+06	1.017	0.009	0.941	20	3.77E+06	0.992105263	0.034	3.425	20	4.00E+06	0.976	0.051	4.296
30	6.561016996	3.64E+06	1.041	30	6.07E+06	1.028	0.013	1.265	30	3.80E+06	1	0.041	4.090	30	4.00E+06	0.976	0.065	5.529
40	6.566666646	3.69E+06	1.053	40	6.10E+06	1.034	0.020	1.951	40	3.87E+06	1.018421053	0.035	3.499	40	4.07E+06	0.993	0.061	6.073
50	6.572316297	3.74E+06	1.067	50	6.10E+06	1.034	0.033	3.300	50	3.87E+06	1.018421053	0.048	4.848	50	4.07E+06	0.993	0.074	7.422
60	6.577965947	3.78E+06	1.081	60	6.13E+06	1.040	0.042	4.163	60	3.90E+06	1.026315789	0.055	5.486	60	4.00E+06	0.976	0.106	10.557

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)



ค.2 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ วิชิเบิล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที
ตัวเร่งปฏิกิริยา 6 แผ่น

ไม่มีแสง, ไม่มีแผ่น				แสงวิชิเบิล ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา					แสงวิชิเบิล แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน					แสงวิชิเบิล แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนี ไตรซัลไฟด์				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/Co	time	cell/100ml	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ	time	cell/100ml	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ	time	cell/100ml	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4} - {5}	{7} = {6} x 100			{8}	{9} = {4} - {5}	{10} = {6} x 100			{11}	{12} = {4} - {5}	{13} = {6} x 100
0	6.544068044	3.50E+06	1.000	0	3.73E+06	1.000	0.000	0.000	0	5.17E+06	1.000	0.000	0	0	3.90E+06	1.000	0.000	0.000
10	6.549717695	3.55E+06	1.015	10	3.80E+06	1.018	0.000	0.000	10	5.17E+06	1.000	0.015	1.49	10	3.87E+06	0.992	0.023	2.259
20	6.555367345	3.59E+06	1.026	20	3.90E+06	1.045	0.000	0.000	20	5.20E+06	1.006	0.021	2.276872064	20	3.90E+06	1.000	0.026	2.636
30	6.561016996	3.64E+06	1.041	30	3.97E+06	1.063	0.000	0.000	30	5.30E+06	1.025	0.016	1.57549323	30	3.97E+06	1.018	0.023	2.295
40	6.566666646	3.69E+06	1.053	40	3.97E+06	1.063	0.000	0.000	40	5.37E+06	1.039	0.015	1.845813761	40	4.00E+06	1.026	0.028	2.777
50	6.572316297	3.74E+06	1.067	50	4.00E+06	1.071	0.000	0.000	50	5.47E+06	1.058	0.009	0.88729207	50	4.07E+06	1.044	0.023	2.331
60	6.577965947	3.78E+06	1.081	60	4.00E+06	1.081	0.000	0.002	60	5.47E+06	1.058	0.023	1.816339689	60	4.07E+06	1.044	0.038	3.759

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)



ค.3 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของพื้นที่ของปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงวิชิเบล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 2 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				$\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 2 แผ่น				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}×100
0	6.6056641	4.03E+06	1.000	0	4.03E+06	1	0.000	0
10	6.6113138	4.09E+06	1.013	10	4.07E+06	1.0082645	0.005	0.482932073
20	6.6169634	4.14E+06	1.026	20	4.10E+06	1.0165289	0.010	0.983008864
30	6.6226131	4.19E+06	1.040	30	4.17E+06	1.0330579	0.007	0.674008579
40	6.6282627	4.25E+06	1.053	40	4.23E+06	1.0495868	0.004	0.382604929
50	6.6339124	4.30E+06	1.067	50	4.27E+06	1.0578512	0.009	0.935474601
60	6.639562	4.36E+06	1.081	60	4.30E+06	1.0661157	0.015	1.506404737

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.4 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของพื้นที่ของปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงวิชิเบิล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 4 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				$\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 4 แผ่น				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}×100
0	6.7609248	5.77E+06	1.000	0	5.77E+06	1	0.000	0
10	6.7665745	5.84E+06	1.013	10	5.77E+06	1	0.013	1.309378354
20	6.7722241	5.92E+06	1.026	20	5.80E+06	1.0057803	0.021	2.057866744
30	6.7778738	6.00E+06	1.040	30	5.90E+06	1.0231214	0.017	1.667654975
40	6.7835235	6.07E+06	1.053	40	5.97E+06	1.0346821	0.019	1.873074522
50	6.7891731	6.15E+06	1.067	50	6.07E+06	1.0520231	0.015	1.518286429
60	6.7948228	6.23E+06	1.081	60	6.10E+06	1.0578035	0.023	2.337628164

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.5 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของพื้นที่ของปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงวิชิเบิล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				$\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}×100
0	6.5910646	3.90E+06	1.000	0	3.90E+06	1	0.000	0
10	6.5967143	3.95E+06	1.013	10	3.83E+06	0.9820513	0.031	3.104250149
20	6.6023639	4.00E+06	1.026	20	3.90E+06	1	0.026	2.635901426
30	6.6080136	4.06E+06	1.040	30	3.93E+06	1.0076923	0.032	3.210562934
40	6.6136632	4.11E+06	1.053	40	4.00E+06	1.025641	0.028	2.777180051
50	6.6193129	4.16E+06	1.067	50	4.00E+06	1.025641	0.042	4.156496003
60	6.6249625	4.22E+06	1.081	60	4.03E+06	1.0333333	0.048	4.784641652

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.6 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ แสงวิ
ซิเบิล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				Visible 130 ml/min				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}x100
0	6.5910646	3.90E+06	1.000	0	3.90E+06	1.000	0.000	0
10	6.5967143	3.95E+06	1.013	10	3.87E+06	0.992	0.021	2.0786091
20	6.6023639	4.00E+06	1.026	20	3.90E+06	1.000	0.026	2.6359014
30	6.6080136	4.06E+06	1.040	30	3.97E+06	1.018	0.022	2.1849219
40	6.6136632	4.11E+06	1.053	40	4.00E+06	1.026	0.028	2.7771801
50	6.6193129	4.16E+06	1.067	50	4.03E+06	1.033	0.034	3.3872652
60	6.6249625	4.22E+06	1.081	60	4.03E+06	1.033	0.048	4.7846417

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.7 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ แสงวิ
ซีเบิล อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				Visible 200 ml/min				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}x100
0	6.6232493	4.20E+06	1.000	0	4.20E+06	1.000	0.000	0
10	6.6288989	4.25E+06	1.013	10	4.10E+06	0.976	0.037	3.6903307
20	6.6345486	4.31E+06	1.026	20	4.13E+06	0.984	0.042	4.223203
30	6.6401982	4.37E+06	1.040	30	4.17E+06	0.992	0.048	4.7734445
40	6.6458479	4.42E+06	1.053	40	4.23E+06	1.008	0.045	4.5476318
50	6.6514975	4.48E+06	1.067	50	4.30E+06	1.024	0.043	4.3396462
60	6.6571472	4.54E+06	1.081	60	4.27E+06	1.016	0.065	6.5306734

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.8 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ แสงวิ
ซิเบิล อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				Visible 300 ml/min				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}×100
0	6.7429868	5.53E+06	1.000	0	5.53E+06	1.000	0.000	0
10	6.7486365	5.61E+06	1.013	10	5.33E+06	0.964	0.049	4.9238362
20	6.7542861	5.68E+06	1.026	20	5.40E+06	0.976	0.050	5.04554
30	6.7599358	5.75E+06	1.040	30	5.43E+06	0.982	0.058	5.7870226
40	6.7655854	5.83E+06	1.053	40	5.50E+06	0.994	0.059	5.9436923
50	6.7712351	5.91E+06	1.067	50	5.57E+06	1.006	0.061	6.1181889
60	6.7768847	5.98E+06	1.081	60	5.57E+06	1.006	0.075	7.5155653

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.9 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ ยูวีเอ อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				UVA 130 ml/min				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C ₀	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C ₀	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}x100
0	6.6127839	4.10E+06	1.000	0	4.10E+06	1.000	0.000	0
10	6.6184335	4.15E+06	1.013	10	4.00E+06	0.976	0.037	3.748402745
20	6.6240832	4.21E+06	1.026	20	4.00E+06	0.976	0.051	5.074925816
30	6.6297328	4.26E+06	1.040	30	4.00E+06	0.976	0.064	6.418818093
40	6.6353825	4.32E+06	1.053	40	4.07E+06	0.993	0.061	6.072989932
50	6.6410321	4.38E+06	1.067	50	4.07E+06	0.993	0.075	7.452305885
60	6.6466818	4.43E+06	1.081	60	4.07E+06	0.993	0.088	8.849682302

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ คำนวณ ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.10 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ ยูวี เอ อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				UVA 300 ml/min				
time	จำนวน	cell/100 ml	C/C ₀	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C ₀	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}×100
0	6.5642714	3.67E+06	1.000	0	3.67E+06	1.000	0.000	0
10	6.5699211	3.71E+06	1.013	10	3.47E+06	0.945	0.068	6.763923809
20	6.5755707	3.76E+06	1.026	20	3.47E+06	0.945	0.081	8.09044688
30	6.5812204	3.81E+06	1.040	30	3.40E+06	0.927	0.113	11.25252098
40	6.58687	3.86E+06	1.053	40	3.40E+06	0.927	0.126	12.61400989
50	6.5925197	3.91E+06	1.067	50	3.37E+06	0.918	0.149	14.90241675
60	6.5981693	3.96E+06	1.081	60	3.37E+06	0.918	0.163	16.29979317

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.11 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ ยูวี เอ อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				UVA 500 ml/min				
time	จำนวน	cell/100 ml	C/C ₀	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C ₀	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}×100
0	6.447158	2.80E+06	1.000	0	2.80E+06	1	0.000	0
10	6.4528077	2.84E+06	1.013	10	2.63E+06	0.9404762	0.073	7.261759307
20	6.4584573	2.87E+06	1.026	20	2.57E+06	0.9166667	0.110	10.96923476
30	6.464107	2.91E+06	1.040	30	2.53E+06	0.9047619	0.135	13.50360323
40	6.4697566	2.95E+06	1.053	40	2.47E+06	0.8809524	0.172	17.24604452
50	6.4754063	2.99E+06	1.067	50	2.43E+06	0.8690476	0.198	19.81583666
60	6.4810559	3.03E+06	1.081	60	2.43E+06	0.8690476	0.212	21.21321308

* สภาวะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสภาวะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.12 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะ ยูวีเอ อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น ระยะเวลา 300 นาที

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				UVA with catalyst				
time	คำนวณ	cell/100 ml	C/C_0	time	เซลล์/100 มิลลิลิตร	C/C_0	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2} = สมการ(ข-2)	{3} = สมการ(ข-3)	{4}			{5}	{6} = {4}-{5}	{7} = {6}x100
0	6.6056641	4.03E+06	1	0	4.03E+06	1	0.000	0
10	6.6113138	4.09E+06	1.0130938	10	3.77E+06	0.9338843	0.079	7.9209486
20	6.6169634	4.14E+06	1.026359	20	3.73E+06	0.9256198	0.101	10.073918
30	6.6226131	4.19E+06	1.0397979	30	3.67E+06	0.9090909	0.131	13.070703
40	6.6282627	4.25E+06	1.0534128	40	3.63E+06	0.9008264	0.153	15.258638
50	6.6339124	4.30E+06	1.067206	50	3.57E+06	0.8842975	0.183	18.290847
60	6.639562	4.36E+06	1.0811797	60	3.43E+06	0.8512397	0.230	22.994008
90	6.656511	4.53E+06	1.1242085	90	3.37E+06	0.8347107	0.289	28.949773
120	6.6734599	4.71E+06	1.1689497	120	3.23E+06	0.8016529	0.367	36.729676
180	6.7073578	5.10E+06	1.2638447	180	3.20E+06	0.7933884	0.470	47.045626
240	6.7412557	5.51E+06	1.3664433	240	3.10E+06	0.768595	0.598	59.784825
300	6.7751536	5.96E+06	1.4773708	300	2.97E+06	0.7355372	0.742	79.183362

ค.13 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ในการศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ
สถานะ ยูวีเอ อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น			แสงยูวีเอ, แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา					แสงยูวีเอ, โฟโตนีอิมไดออกไซด์รูปท่อนานา					แสงยูวีเอ, โฟโตนีอิมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติไดโตนีอิมไดออกไซด์				
time	เซลล์/100มิลลิลิตร	C/Co	time	เซลล์/100มิลลิลิตร	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ	time	เซลล์/100มิลลิลิตร	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ	time	เซลล์/100มิลลิลิตร	C/Co	ก่อน-หลัง	ประสิทธิภาพ
{1}	{2}	{3}		{4}	{5} = {3}-{4}	{6} = {5}x100			{7}	{8} = {3}-{7}	{9} = {8}x100		{10}	{11} = {3}-{10}	{12} = {11}x100		
0	5.30E+05	1	0	7.13E+05	1	0	0	0	5.57E+05	1	0	0	0	7.70E+05	1	0	0
10	5.32E+05	1.0031447	10	6.97E+05	0.9766355	0.02650914	2.650914007	10	5.30E+05	0.9520958	0.051048846	5.10488457	10	6.90E+05	0.8961039	0.107040758	10.7040758
20	5.33E+05	1.0062893	20	6.93E+05	0.9719626	0.034326691	3.432669135	20	5.10E+05	0.9161677	0.090121644	9.012164351	20	6.57E+05	0.8528139	0.153475455	15.34754554
30	5.35E+05	1.009434	30	6.80E+05	0.953271	0.056162934	5.616293423	30	4.97E+05	0.8922156	0.117218393	11.72183934	30	6.43E+05	0.8354978	0.173936127	17.39361268
40	5.37E+05	1.0125786	40	6.57E+05	0.9205607	0.092017869	9.201786869	40	4.80E+05	0.8622754	0.150303167	15.03031673	40	6.23E+05	0.8095238	0.203054807	20.30548068
50	5.40E+05	1.0188679	50	6.43E+05	0.9018692	0.116998766	11.69987656	50	4.77E+05	0.8562874	0.162580499	16.25804994	50	6.00E+05	0.7792208	0.239647145	23.96471453
60	5.43E+05	1.0251572	60	6.27E+05	0.8785047	0.14665256	14.66525598	60	4.47E+05	0.8023952	0.222762023	22.27620231	60	5.57E+05	0.7229437	0.30221351	30.22135098

* สถานะที่ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นจะเป็นสถานะที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด คอลัมน์ จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)





ภาควิชา

การคำนวณทางสถิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของวิธีการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีโคลิฟอร์มทั้งหมดและพีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1

t-Test: Paired Two Sample for Means $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$

	นับด้วยวิธี โคลิฟอร์มทั้งหมด	นับด้วยวิธีพีคัลโคลิฟอร์ม
Mean	48.875	52.75
Variance	195.5536	89.07143
Observations	8	8
Pearson Correlation	0.980411	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	7	
t Stat	2.15614	
P(T<=t) one-tail	0.033997	
t Critical one-tail	1.894579	

ง.2 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของวิธีการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีโคลิฟอร์มทั้งหมดและพีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 2

t-Test: Paired Two Sample for Means $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$

	นับด้วยวิธี โคลิฟอร์มทั้งหมด	นับด้วยวิธีพีคัลโคลิฟอร์ม
Mean	52.75	54.5
Variance	220.2143	209.7143
Observations	8	8
Pearson Correlation	0.953931	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	7	
t Stat	1.108779	
P(T<=t) one-tail	0.15208	
t Critical one-tail	1.894579	

ง.3 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของวิธีการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีโคลิฟอร์มทั้งหมดและพีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3

t-Test: Paired Two Sample for Means $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$

	นับด้วยวิธี โคลิฟอร์มทั้งหมด	นับด้วยวิธีพีคัลโคลิฟอร์ม
Mean	53.375	55.125
Variance	184.5536	184.6964
Observations	8	8
Pearson Correlation	0.941387	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	7	
t Stat	1.06396	
P(T<=t) one-tail	0.161333	
t Critical one-tail	1.894579	

ง.4 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการใช้แสงวิชิเบิลและแสงยูวีในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ

t-Test: Paired Two Sample for Means

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$

$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$

	Visible TiO2/Sb2S3 6 แผ่น	UVA TiO2/Sb2S3 6 แผ่น
Mean	1.014652	0.984321
Variance	0.000407	8.5E-05
Observations	7	7
Pearson Correlation	0.320256	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	6	
t Stat	4.155931	
P(T<=t) one-tail	0.002986	
t Critical one-tail	1.94318	
P(T<=t) two-tail	0.005971	
T Critical two-tail	2.446912	

ง.5 ผลการทดสอบการใช้ ANOVA ในการทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพ อัตราการไหลที่ 130 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ

Anova: Single Factor

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

$H_a : \text{At least two } \mu\text{'s are different}$

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1 (130 ml/min)	7	28300000	4042857.143	1746031746
Column 2 (300 ml/min)	7	24133333	3447619.048	11058201058
Column 3 (500 ml/min)	7	17866667	2552380.952	17354497354

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	7.88E+12	2	3.94E+12	391.94	1.44E-15	3.55
Within Groups	1.80E+11	18	10052910053			
Total	8.06127E+12	20				

ง.6 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพ อัตราการไหลที่ 130 และ 300 มิลลิลิตร/นาที ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ

t-Test: Paired Two Sample for Means

$$H_o : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$$

	130 ml/min	300 ml/min
Mean	0.98641115	0.94025974
Variance	0.000108779	0.000822511
Observations	7	7
Pearson Correlation	0.268271685	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	6	
t Stat	4.398080995	
P(T<=t) one-tail	0.002288923	
t Critical one-tail	1.943180281	
P(T<=t) two-tail	0.004577846	
t Critical two-tail	2.446911851	

ง. 7 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพ อัตราการไหลที่ 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ

t-Test: Paired Two Sample for Means

$$H_o : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$$

	300 ml/min	500 ml/min
Mean	0.94025974	0.911564626
Variance	0.000822511	0.002213584
Observations	7	7
Pearson Correlation	0.966296611	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	6	
t Stat	3.668089252	
P(T<=t) one-tail	0.005239021	
t Critical one-tail	1.943180281	
P(T<=t) two-tail	0.010478042	
t Critical two-tail	2.446911851	

ง. 8 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพ อัตราการไหลที่ 130 และ 500 มิลลิลิตร/นาที ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ

t-Test: Paired Two Sample for Means

$$H_o : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$$

	130 ml/min	500 ml/min
Mean	0.98641115	0.911564626
Variance	0.000108779	0.002213584
Observations	7	7
Pearson Correlation	0.061989787	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	6	
t Stat	4.164088309	
P(T<=t) one-tail	0.002958687	
t Critical one-tail	1.943180281	
P(T<=t) two-tail	0.005917374	
t Critical two-tail	2.446911851	

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์

การศึกษา/คุณวุฒิ : ปริญญาเอก :Ph.D. (Environmental management)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญาโท : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปริญญาตรี : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตำแหน่งปัจจุบัน : หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประวัติการทำงาน

เม.ย. 46 – ส.ค. 47 Research assistance of Assoc. Prof. Dr. Puangrat Kajitvichyanukul, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

ก.พ. 49 - ส.ค. 50 Research Assistance, Center for Renewable Energy Science and Technology (CREST), Department of Chemistry & Biochemistry, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA.

มี.ค. 51 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานทางวิชาการ /ผลงานวิจัย :

AWARDS

- Distinguished Research Award, Nanotechnology and Nanomaterial Safety Management, Thailand Research Fund (TRF), Thailand, 2014

A CHAPTER IN BOOK

- Puangrat Kajitvichyanukul, Jirapat Ananpattarachai, Apichon Watcharenwong, “Green Products: Production”, Encyclopedia of Environmental Management, Taylor and Francis: New York, Published online: 01 May 2013; 1253-1261.

INTERNATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Chanrawangyot, S., Rattanachan, S.T., **Watcharenwong, A.** & Fangsuwannarak, T. (2017). Antibacterial Activity to ZnO Nanoparticles Coated on Ceramic Tiles Prepared by Sol-Gel Method. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 27(2), 1-5.
- **Watcharenwong, A.**, Noguchi, S., Kawai, T., Ogata, T., Unuma, H., “Self-organized TiO₂ nanotubes and their photocatalytic performance measured using spin-trap ESR spectroscopy” , *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, Issue 43, 2013, Pages 91-97
- **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Anodic growth of nanoporous WO₃ films: morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion” , *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120, 2008
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Formation and Characterization of Self-Organized TiO₂ Nanotube Arrays by Pulse Anodization” *Journal of American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 965-974, 2008 (*impact factor* = 9.907)
- **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Self-organized TiO₂ nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response” , *Journal of Materials Research*, Vol. 22, pp. 3186-3195, 2007

- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Titania nanotubes from pulse anodization of titanium foils”, *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 2145–2149, 2007 (*impact factor = 3.388*)
- N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeeswaran, **A. Watcharenwong**, R. S. de Zoysa, N. A. Basit and K. Rajeshwar, “Nanoporous TiO₂ and WO₃ Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response”, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp. 25347-25355, 2006

BOOK SERIES

- Narudon Saijaioup, Puangrat Kajitvichyanukul, **Apichon Watcharenwong**, "Preparation of Visible Light Responsive Photocatalyst from Titanium Dioxide Nanotubes Modified with Antimony Trisulfide", *Key Engineering Materials*, Vol. 792, pp. 98-103, 2018
- **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 367-372, 2017
- **Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 373-378, 2017
- **Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Nanoporous Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 174-178, 2017

CONFERENCE SERIES

- **A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammaroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from melamine scraps” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 78 (2017) 012012 doi :10.1088/1755-1315/78/1/012012

RIGINAL AND NATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Apichon Watcharenwong, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae”, Thai environmental engineering journal, Vol. 31 No. 1, 2017
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Role of pH, Organic and Inorganic Anions on Photocatalytic Reduction Of Chromium(VI) using TiO₂ and Ultraviolet Light”, *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 169-179, 2005
- P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong**, “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface” *Songkhlanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 47-53, 2005
- P. Kajitvichyanukul, P. Amornchat, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, “Structure and Photocatalytic characteristics of TiO₂ Thin Film coated on Stainless Steel for Chromium(VI) Removal Application, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp.79-86, 2005
- P. Kajitvichyanukul, S. Pongpom, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, “Effects of Acetyl Acetone on Property of TiO₂ Thin Film for Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) from Aqueous Solution, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp. 87-93, 2005

- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Contradiction Effect of pH on the Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) and Thallium (I)”. *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 21, No.4, pp. 269-280, 2004
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Adsorption Behavior of Chromium (VI) on Titanium Dioxide Surface” *Thai Environmental Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-95, 2004

REFEREED CONFERENCE PROCEEDINGS

- N. Saijaioup, W. Dankittikul, and **A. Watcharenwong**, “Antimony Trisulfide Modified Titanium Dioxide Nanotubes for Water Disinfection of Fecal Streptococcus by the Photocatalytic Process.”, 3rd Reginal IWA Diffuse Pollution Conference “Innovation and Frontier Technology for Water Security and Scarcity, Chiang Mai, Thailand, 19-22 Nov, 2018.
- A. Kaeokan*, P. Upama*, R. Rammaroeng* and **A. Watcharenwong**, “Paraquat dichloride removal by photocatalytic process using modified melamine scraps.”, 3rd Reginal IWA Diffuse Pollution Conference “Innovation and Frontier Technology for Water Security and Scarcity, Chiang Mai, Thailand, 19-22 Nov, 2018.
- Narudon Saijaioup, Puangrat Kajitvichyanukul and **Apichon Watcharenwong**, “Preparation of Visible Light Responsive Photocatalyst from Titanium Dioxide Nanotubes Modified with Antimony Trisulfide”, 7th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM2018), Kitakyoshu, Japan, 10-12 September, 2018.
- A Rittirat¹, C Chokejaroenrat² and **A Watcharenwong^{1*}**, “Atrazine adsorption potential of Leonardite from Mae Moh power plant” , 2nd International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development (CEESD 2017), Phuket, Thailand, 8-11 Dec, 2017.
- **A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammaroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from

- melamine scraps” 8th International conference on Environmental Science and Technology, Madrid, Spain, 12 – 14 June, 2017
- Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
 - Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
 - Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “ Morphology and Wettability of Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14- 16 October, 2016
 - Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “ **Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae**” Proceedings of the 15th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Bangkok, Thailand, 11-13 May, 2016
 - Apichon Watcharenwong**, Pimchanok Leuasongnoen, “ Synthesis of rhombic ZnO rods using anodization technique and their properties” , GTSNN 2014 International Conference on “ Safe and Sustainable Nanotechnology” (in conjunction with 4th German- Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology), Phitsanulok, Thailand, October 14th-17th, 2014
 - Apichon Watcharenwong**, Shun Noguchi, Takahiro Kawai, Tateaki Ogata, and Hidero Unuma, “ Self- Organized TiO₂ Nanotubes and Their Photocatalytic Performance Measured Using Spin-Trap ESR Spectroscopy” , Proceeding of 5th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in

- Mechatronics, Mechanical Engineering and New High- Tech Products Development, MECAHITECH'13, Bucharest, Romania, September 12th-13th, 2013
- N. Bussabong, **A. Watcharenwong**, and S. Dararat, “Biogas Production from Ruzi grass in the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) ” , Proceedings of 2nd International Conference on Agriculture and Environment Systems (ICAES'13), Pattaya (Thailand), April 23-24, 2013
 - Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Preparation of TiO₂ Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International conference on NanoThailand 2012: Nanotechnology for the benefits of mankind, Khon Kaen, Thailand, April 9-11, 2012
 - Arnanapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “ Photocatalytic Performance of Nanoporous WO₃ for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012) Penang, Malaysia, February 11-12, 2012
 - Arnanapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “ Treatment of CO in Photocatalysis process using WO₃” Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
 - Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of Carbon monoxide” Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
 - Apichon Watcharenwong** , Wilaiwan Chanmanee , Norma R. de Tacconi, C. Ramannair Chenthamarakshan , Puangrat Kajitvichyanukul, Krishnan Rajeshwar, “Effect of pulsing voltage and electrolyte composition on photoelectrochemical response of composite TiO₂-WO₃ nanotubes obtained from pulse anodization using Ti foil” , Proceedings of the 1st international conference on NanoThailand Symposium 2008 (NTS 2008) November 6 – 8, 2008, Bangkok, Thailand, 2008

- **Watcharenwong Apichon**, Chanmanee Wilaiwan, Kajitvichyanukul Puangrat, Chenthamarakshan C. R., de Tacconi N. R., Rajeshwar Krishnan, “Anodic Growth of Nanoporous TiO₂ and WO₃ films: Influence of Process Variables on Morphology, Photoelectrochemical response and Photocatalysis applications”, Proceedings of the 2nd international conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007) June 25 – 28, 2007, Bangkok, Thailand, 2007
- Krishnan Rajeshwar, Wilaiwan Chanmanee, **Apichon Watcharenwong**, C. Ramannair, Chenthamarakshan, Puangrat Kajitvichyanukul, and Norma R. de Tacconi, “Titania Nanotubes from Pulse Anodization of Titanium foils”, Proceedings of the Twenty-Ninth DOE Solar Photochemistry Research Conference, Airlie Conference Center Warrenton, Virginia, USA, June 10-13, 2007
- P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong** “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface”, Proceedings of the 3rd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, January 28-30, 2004
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Role of pH, organic and inorganic ions on the photocatalytic reduction of Chromium (VI) using TiO₂ and ultraviolet light”, Proceedings of ASIAN WATERQUAL2003, IWA Asia-Pacific conference, Thailand, 2003
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Effect Of pH On Dark Adsorption And Photocatalysis Of Chromium(VI) And Thallium(I) In Aqueous Titanium Dioxide Suspension”, Proceedings of An International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, Thailand, July 22-25, 2003
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “A Study of Adsorption Behavior of Chromium(VI) on Titanium Dioxide Surface”, Proceedings of the 2nd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Khon Kaen, Thailand, January, 2003