

การประยุกต์กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่
ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ



นายณฤต สบายใจอุป

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**APPLICATION OF PHOTOCATALYSIS PROCESS
WITH VISIBLE LIGHT RESPONSIVE TiO_2
IN WATER DISINFECTION**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การประยุกต์กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตอบสนองต่อ
แสงวิซิเบิลในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตน์บวร)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.อภิชน วัชรเนตรวงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



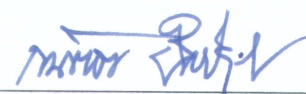
(อ. ดร.สุพรรณี จันท์ภิรมณ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณฤศณ สายใจอุป : การประยุกต์กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์
ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (APPLICATION OF PHOTOCATALYSIS
PROCESS WITH VISIBLE LIGHT RESPONSIVE TiO_2 IN WATER DISINFECTION) อาจารย์
ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 280 หน้า.

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมได-
ออกไซด์รูปท่อนานา (TiO_2) ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอโนดไอซ์เซชัน (anodization) ให้ตอบสนอง
ต่อแสงวิสิเบิล โดยการปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (TiO_2/Sb_2S_3) ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน
(photodeposition) แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วย
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM พบว่า
 TiO_2/Sb_2S_3 มีลักษณะพื้นผิวเห็นเป็นท่อชัดเจน มีกระจายตัวของท่ออย่างสม่ำเสมอ การใช้เทคนิค
EDX และ XRF ทำให้พบว่าบน TiO_2/Sb_2S_3 มีธาตุของ Sb และ S กระจายอยู่ทั่วผิวของตัวเร่ง
ปฏิกิริยาและปริมาณธาตุ Sb และ S จะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการฉายแสงลงบนตัวเร่ง
ปฏิกิริยา การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สามารถบอกได้ว่า TiO_2/Sb_2S_3 เกิดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ
อนาเทส และ เกิดเป็นโครงสร้างผลึกของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ การใช้เทคนิค DRS พบว่า
 TiO_2/Sb_2S_3 สามารถดูดกลืนแสงได้มากกว่า TiO_2 และการดูดกลืนแสงของ TiO_2/Sb_2S_3 จะใกล้เคียง
กันตั้งแต่ระยะเวลาการฉายแสงที่ 15 นาที การศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะ
ตะไลซิสพบว่า ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ TiO_2/Sb_2S_3 จะให้
ประสิทธิภาพที่ดีกว่า TiO_2 ทั้งในการศึกษากับเชื้อ *E.coli* และ *Fecal Streptococcus* ในการศึกษา
พื้นที่ผิวของ TiO_2/Sb_2S_3 ในช่วง 0- 75 ตารางเซนติเมตร พบว่ายังมีปริมาณของพื้นที่ผิวมาก
ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ในการศึกษาอัตราการไหลของ
น้ำที่ไหลผ่าน TiO_2/Sb_2S_3 ในช่วง 130 -500 มิลลิลิตร/นาที พบว่ายังใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้น
ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และยังพบว่า TiO_2/Sb_2S_3
สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลานาน ใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้
งาน และไม่มีการหลุดของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาค่า
จลนพลศาสตร์ โดยใช้สมการแลงเมียร์-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

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2560

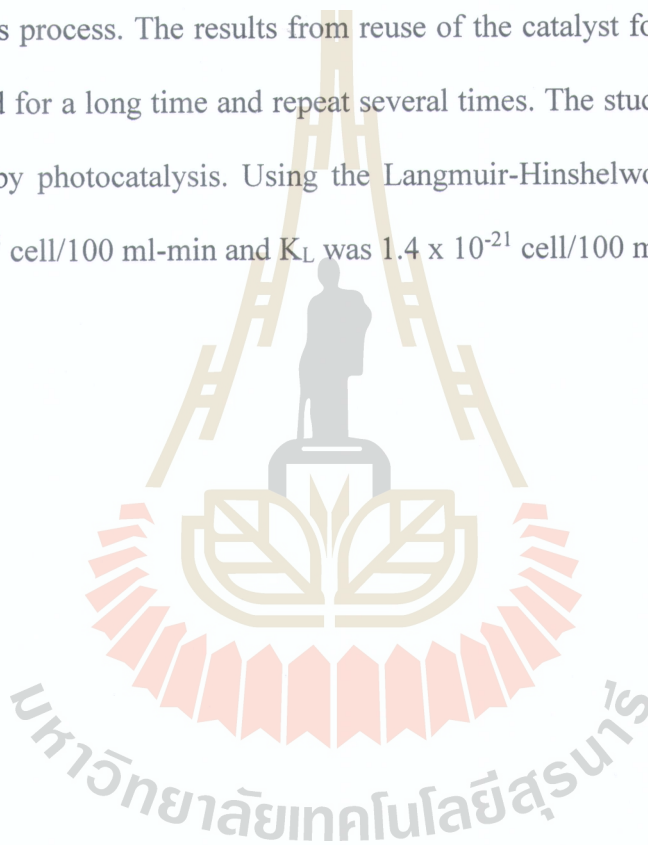
ลายมือชื่อนักศึกษา ณฤศณ สายใจอุป
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์

NARUDON SAIJAIUUP : APPLICATION OF PHOTOCATALYSIS PROCESS
WITH VISIBLE LIGHT RESPONSIVE TiO_2 IN WATER DISINFECTION. THESIS
ADVISOR : APICHON WATCHARENWONG, Ph.D., 280 PP.

TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES/ TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES WITH
ANTIMONY TRISULFIDE/ PHOTOCATALYSIS/ DISINFECTION

This is an application of photocatalysis for water disinfection with titanium dioxide nanotube. The study focus on improving the titanium dioxide nanotube to response the visible light region. It was used as a catalyst in the water disinfection by photocatalysis process. Including factors such as the different of catalyst, surface area of catalyst, water flow rate on catalyst, reuse of the catalyst. In the experiment was divide into two parts. The first, study on the synthesis of titanium dioxide nanotube by anodization process (TiO_2) and the improvement of titanium dioxide nanotube with antimony trisulfide ($\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$) by photodeposition process. The FE-SEM analyzer show that both of TiO_2 and $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ formed nanotube on surface, clearing pipe. However, when using EDX technique, $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ catalysts were found to have Sb and S elements scattered throughout the catalyst surface. The amount of Sb and S elements increased with the times in photodeposition process by XRF techniques. For XRD analysis, TiO_2 was anatase phase structure of titanium dioxide and $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ was crystallinity structure of antimony trisulfide. The UV-VIS (DRS) technique shown the absorption of $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ can shift the spectra of visible light more than bare TiO_2 , but the absorbance were close together after 15 minutes. So, the next experiment, $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ 15 minutes was use on water disinfection by photocatalysis. The second study

was a study on water disinfection by photocatalysis. The result show. The catalyst against *Fecal Streptococcus* bacteria and *E.coli* bacteria shows better disinfection efficacy of $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ more than bare TiO_2 . The surface area of $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ showed the high surface area of $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ lead to the higher disinfection (*E.coli*) efficacy of photocatalysis process. The flow rate of the water on $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ found that the high flow rate on $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ lead to the higher disinfection (*E.coli*) efficacy of photocatalysis process. The results from reuse of the catalyst found that $\text{TiO}_2 / \text{Sb}_2\text{S}_3$ could be used for a long time and repeat several times. The study on kinetics of water disinfection by photocatalysis. Using the Langmuir-Hinshelwood equation found k_r was 2.5×10^5 cell/100 ml-min and K_L was 1.4×10^{-21} cell/100 ml-min.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Narudon Saijorjup

Advisor's Signature Dr. 961

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมทั้งให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความบริบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ รวมทั้งเป็นกำลังใจและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยิ้มรัตนบวร อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

คุณมานพ จรโคกกรวด คุณสินีนานฎ นอกกระโทก เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

คุณนารี กลิ่นกลาง และ คุณยศพล ไบเหลืองที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับการจัดทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

นักศึกษาบัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ การอบรมเลี้ยงดู และคอยเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ณฤศล สายใจอุป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป	ฒ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 สมมติฐานงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ประเภทของแหล่งน้ำดิบ	6
2.1.1 น้ำผิวดิน	7
2.1.2 น้ำใต้ดิน	9
2.1.3 น้ำฝน	10
2.2 คุณลักษณะของน้ำ	11
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ	11
2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี	12
2.2.3 คุณสมบัติทางชีววิทยา	12
2.2.3.1 กลุ่มที่สามารถทำให้เกิดโรคได้ในคน	13
2.2.3.2 แบคทีเรียที่ไม่ก่อให้เกิดโรคกลุ่ม	14
2.3 การตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด.....	15
2.3.2 ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย.....	15
2.3.3 ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย.....	16
2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย.....	18
2.4.1 การวัดความขุ่นของเซลล์.....	18
2.4.2 เทคนิคการนับจากจานเพาะเชื้อ.....	18
2.4.2.1 วิธี Serial dilution.....	18
2.4.2.2 วิธี Spread plate.....	19
2.4.2.3 วิธี Pour plate.....	19
2.4.3 เทคนิคการตรวจหาจุลินทรีย์ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น.....	20
2.4.4 การตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มโดยวิธีเชื่อกกรอง.....	21
2.4.4.1 การตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม.....	21
2.4.4.2 การตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม.....	22
2.5 หน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	23
2.5.1 แหล่งน้ำ.....	24
2.5.2 การตกตะกอนขั้นต้น.....	24
2.5.3 การสร้างตะกอนและรวมตะกอน.....	24
2.5.4 การตกตะกอน.....	25
2.5.5 การกรองน้ำ.....	26
2.5.6 การฆ่าเชื้อโรค.....	27
2.5.7 ถังน้ำใส.....	28
2.5.8 หอถังสูง.....	28
2.6 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	29
2.6.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการให้ความร้อน.....	30
2.6.1.1 การพาสเจอร์ไรซ์.....	30
2.6.1.2 การต้ม.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1.3 การทำให้ไร่เชื้อ.....	31
2.6.1.4 การกลั่น.....	31
2.6.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการใช้แสง.....	31
2.6.2.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	31
2.6.2.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอาทิตย์.....	32
2.6.3 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยการใช้โอโซน.....	33
2.6.4 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน.....	35
2.6.4.1 ชนิดของสารคลอรีน.....	35
2.6.4.2 ปฏิกริยาของคลอรีนในน้ำ.....	35
2.6.4.3 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน.....	37
2.6.4.4 สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค.....	38
2.7 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	40
2.7.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	41
2.7.1.1 การเกาะหรือดูดติดผิว.....	41
2.7.1.2 การฉายแสง.....	41
2.7.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
2.7.2.1 โลหะทรานซิชัน.....	41
2.7.2.2 โลหะกึ่งตัวนำ.....	42
2.7.3 โครงสร้างของวัสดุกึ่งตัวนำ.....	43
2.7.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	44
2.7.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	45
2.7.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
2.7.5.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
2.7.5.3 ค่าพีเอช.....	45
2.7.5.4 ความเข้มของแสง.....	46
2.7.5.5 ถังปฏิกิริยา.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.5.6 อุณหภูมิ.....	46
2.7.5.7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ.....	46
2.7.6 พลังงานแสงสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	46
2.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	48
2.8.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียม.....	48
2.8.2 ลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	49
2.8.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	50
2.8.4 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	55
2.8.4.1 ผงไทเทเนียม.....	55
2.8.4.2 ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	55
2.8.4.3 ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	56
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
2.9.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน.....	56
2.9.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	57
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	62
3.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	62
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	67
3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	68
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	68
3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	68
3.2.4 การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงยูวีเอและแสงวิซิเบิล.....	68
3.3 ถึงปฏิกิริยาสำหรับใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	69
3.4 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	70
3.4.1 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของเชื้อแบคทีเรียกับความหนาแน่นของเซลล์.....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i>	70
3.4.3 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย <i>Fecal Streptococcus</i>	71
3.5 การศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	71
3.5.1 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	71
3.5.2 การศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	72
3.5.3 การศึกษาอัตราการไหลของน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	73
3.5.4 การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	74
3.5.4.1 การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที.....	74
3.5.4.2 การศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	76
3.5.5 การศึกษาผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>Fecal Streptococcus</i>) ในน้ำ.....	77
4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการทดลอง	78
4.1 ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	78
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	78
4.1.1.1 ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาด้วย กระบวนการเอโนไคซ์เซชัน.....	78
4.1.1.2 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูป ท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	81
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	87
4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	89
4.1.3.1 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิล ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การคำนวณและการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	93
4.3 ผลของการเตรียมน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง.....	99
4.3.1 ผลของการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม.....	99
4.3.2 ผลของการทำกราฟระหว่างค่า O.D. กับปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย.....	100
4.4 ผลการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	101
4.4.1 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	103
4.4.1.1 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกรณ์กับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	103
4.4.1.2 ผลของการตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	107
4.4.2 ผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	111
4.4.3 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	114
4.4.3.1 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกรณ์ร่วมกับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	114
4.4.3.2 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกรณ์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	116
4.4.4 ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำ.....	119
4.4.4.1 ผลของการที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (<i>E.coli</i>) ในน้ำกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที.....	119
4.4.4.2 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกรณ์ต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกรณ์ซ้ำหลายครั้ง.....	120

สารบัญ (ต่อ)

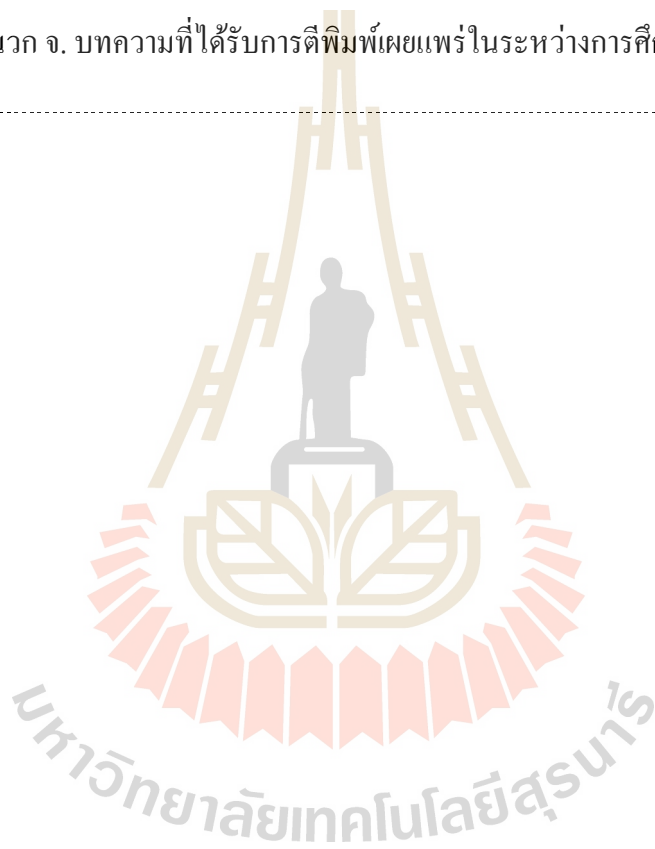
หน้า

4.4.5	ผลของการฆ่าเชื้อโรค (Fecal Streptococcus) ในน้ำ.....	122
4.5	ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิ-ไตรซัลไฟด์.....	125
4.6	กลไกการฆ่าเชื้อโรคของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	128
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	129
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	130
5.1.1	สรุปผลการศึกษากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน.....	130
5.1.2	สรุปผลการศึกษากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิ-ไตรซัลไฟด์.....	131
5.1.3	สรุปผลการศึกษากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิ-ไตรซัลไฟด์.....	132
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	134
5.2.1	การนำไปใช้ประโยชน์.....	134
5.2.2	ประเด็นที่ควรทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป.....	134
	รายการอ้างอิง.....	136
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	146
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลการคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะไม่มีแสง ไม่มีแผ่น.....	248

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	251
ภาคผนวก ง. การคำนวณทางสถิติ	265
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	273
ประวัติผู้เขียน	280



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณภาพน้ำผิวดินในแม่น้ำสายสำคัญในประเทศไทย.....	8
2.2 การกำหนดประเภทแหล่งน้ำผิวดิน.....	9
2.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับน้ำใต้ดิน.....	10
2.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย.....	16
2.5 อัตราส่วนระหว่าง <i>Fecal Coliform Bacteria</i> : <i>Fecal Streptococcus Bacteria</i>	17
2.6 ปริมาตรโดยประมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด.....	22
2.7 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาฟิคัล โคลิฟอร์ม.....	22
2.8 ระดับความต้านทานของจุลชีพต่อสารฆ่าเชื้อโรค.....	30
2.9 ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตซี ที่กำจัดจุลินทรีย์ได้ ประสิทธิภาพ 1 log และ 2 log.....	32
2.10 ช่วงเวลาการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย.....	33
2.11 ปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคชนิดต่าง ๆ.....	38
2.12 ข้อเสนอแนะหรือเกณฑ์มาตรฐานกำหนดค่าสารพลอยได้จาก การฆ่าเชื้อโรค.....	39
2.13 ระดับความยากง่ายในการเลือกใช้วิธีฆ่าเชื้อโรคในระบบประปา.....	40
2.14 ตำแหน่งช่องว่างพลังงาน และขนาดช่องว่างพลังงานของโลหะกึ่งตัวนำชนิดต่าง.....	42
2.15 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต.....	47
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	60
3.1 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	72
3.2 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	73
3.3 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	74
3.4 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลาหนึ่ง.....	75
3.5 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
3.6	สถานะการทดลองการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง.....	77
4.1	ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM... ..	79
4.2	ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM.....	82
4.3	ตำแหน่งของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	85
4.4	ปริมาณของธาตุ Ti, O, Sb and S ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์.....	88
4.5	ตัวอย่างการคำนวณการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลวนครบ 1 รอบ.....	98
4.6	ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์แบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่แตกต่างกัน.....	126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วัฏจักรของน้ำ	7
2.2 ขั้นตอนการ Serial dilution	19
2.3 ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ/ระบบผลิตน้ำประปา	23
2.4 แหล่งน้ำผิวดินในการนำมาผลิตน้ำประปา	24
2.5 ถังสารเคมีที่ใช้เติมให้กับระบบผลิตน้ำประปา	25
2.6 การตกตะกอนของอนุภาคหลังจากการเติมสารรวมตะกอน	26
2.7 ถังกรองสนิมเหล็ก	27
2.8 การเติมคลอรีนแก๊สในการฆ่าเชื้อโรค	28
2.9 ถังน้ำใส	28
2.10 หอถังสูง	29
2.11 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	33
2.12 เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ	34
2.13 สัดส่วนของ HOCl และ OCI ในน้ำที่พีเอชต่าง ๆ	36
2.14 ค่าช่องว่างของพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ	43
2.15 การเกิดอิเล็กตรอน (e^-) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h^+) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	44
2.16 ความยาวคลื่นของแสง	47
2.17 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม	50
2.18 เซลล์โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นออกไซด์	51
2.19 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน	51
2.20 การพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อนาโน	53
2.21 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงในวัสดุ TiO_2/CdS	54
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	63
3.2 การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์	64
3.3 ลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน	65
3.4 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนโนไดซ์เซชัน	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	67
3.6	69
4.1	87
4.2	90
4.3	92
4.4	92
4.5	95
4.6	97
4.7	97
4.8	99
4.9	100
4.10	102
4.11	102
4.12	103
4.13	105
4.14	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	106
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 0.9$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	110
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการตอบสนองของแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.25$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	110
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการตอบสนองต่อแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร).....	111
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	113
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	113
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล.....	115
4.22 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล.....	116
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย E.coli ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ.....	118
4.24 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย E.coli กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ.....	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที	120
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย <i>E.coli</i> กับระยะเวลาของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที	121
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่คงเหลืออยู่กับเวลาของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 3 ครั้ง	122
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย <i>Fecal Streptococcus</i> ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค	124
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย <i>Fecal Streptococcus</i> กับเวลาของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ	124
4.30 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกัน	125
4.31 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order)	126
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$	127
4.33 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์	129

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ในร่างกายของมนุษย์นั้น มีน้ำเป็นส่วนประกอบ 2 ใน 3 ของน้ำหนักตัว และน้ำยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางของกระบวนการต่าง ๆ แม้ว่าน้ำจะเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญมากเพียงใด แต่น้ำก็เป็นตัวกลางที่นำพาเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ และทำให้เกิดโรคติดต่อขึ้นได้หลายชนิด เช่น อหิวาตกโรค บิด ไทฟอยด์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้อุปโภคและบริโภค จำเป็นต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อนำไปใช้ในชีวิตประจำวัน โดยกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นจะเริ่มจากโรงสูบน้ำดิบ สูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติผ่านเข้าสู่ถังกวนเร็วและกวนช้า เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบที่มีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สารต่าง ๆ ที่ปะปนมากับน้ำเกิดการตกตะกอน หลังจากนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อทำให้ตะกอนขนาดเล็กรวมตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่และตกสู่ก้นถัง จากนั้นน้ำจะผ่านเข้าสู่ถังกรองเพื่อเป็นการกำจัดตะกอนหรือสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็กมากอีกครั้ง โดยจะเป็นการกรองด้วยกรวดและทรายกรอง ทำให้ได้น้ำที่ใส ก่อนจะส่งน้ำผ่านระบบท่อไปยังบ้านเรือนต่างๆ จะต้องมีกระบวนการสำคัญที่ทำให้น้ำประปามีความปลอดภัย คือกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคมีหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการฆ่าเชื้อโรคโดยการใช้คลอรีน โอโซน และรังสียูวี เป็นต้น

สำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่นิยมใช้ในปัจจุบันในประเทศไทย คือ กระบวนการฆ่าเชื้อโรคโดยการใช้คลอรีน เนื่องจากคลอรีนเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดี ราคาถูก ขนส่งง่าย คลอรีนที่นิยมใช้มีทั้งแบบก๊าซคลอรีน คลอรีนผง และคลอรีนน้ำ คลอรีนฆ่าเชื้อโรคโดยการทำลายเอมไซม์ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเจริญเติบโตของเซลล์สิ่งมีชีวิต นอกจากนี้คลอรีนยังสามารถกำจัดสาหร่าย ตะไคร่น้ำ ตลอดจนรส กลิ่น และสีของน้ำด้วย การเติมคลอรีนในน้ำต้องให้มีระยะเวลาสัมผัส 20 – 30 นาที เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ดี และต้องมีการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ซึ่งควรอยู่ระหว่าง 0.5 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (เกรียงศักดิ์, 2557) แต่อย่างไรก็ตามในการฆ่าเชื้อโรคด้วยการเติมคลอรีน สามารถก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethans, THM) หรือกรดฮาโลอะซีติก (Haloacetic acids, HAAs) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสารอินทรีย์ในน้ำ สารเหล่านี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

(Nieuwenhuijsen *et al.*, 2000) ทั้งยังมีผลต่อความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอดบุตร การไหลเวียนของโลหิต และส่งผลกระทบต่ออวัยวะภายในร่างกาย (WHO, 2000) อีกทั้งปัญหาการสั่งซื้อสารเคมีมาเก็บไว้ การดูแลรักษาโรงเรือนเก็บสารเคมี การเตรียมสารเคมีก่อนจ่ายคลอรีนเข้าสู่ระบบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ทักษะของผู้มีความรู้และความชำนาญในการเตรียมสารเคมี ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดเหล่านี้ จึงมีการนำเอาเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ ๆ มาใช้ เช่น การใช้โอโซน การใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น

โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่ดี สามารถกำจัดเชื้อโรคได้ด้วยการทำลายผนังเซลล์ทำให้เซลล์แยกออกจากกันและตายได้ นอกจากนี้โอโซนยังสามารถกำจัดไวรัส กลิ่น สี และสาหร่ายได้ ปัญหาของการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็คือ โอโซนนั้นมีความยากลำบากในการผสมโอโซนกับน้ำ เพราะโอโซนละลายน้ำได้น้อยในสภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ ทำให้สามารถสลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว การผลิตโอโซนจึงต้องติดตั้งเครื่องผลิตโอโซนไว้กับระบบประปา อีกทั้งการเดินระบบก็สิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก โอโซนจึงไม่ใช่ตัวเลือกที่ดีในการนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยแสงอัลตราไวโอเลต แสงอัลตราไวโอเลตมาจากการปะทะกันระหว่างไอปรอทกับไฟฟ้า ทำให้เกิดแสงอัลตราไวโอเลตขึ้นในหลอดชนิด Low-pressure mercury arc โดยมีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ความยาวคลื่นนี้สามารถผ่านเซลล์เมมเบรน และจะถูกดูดซับด้วย DNA และ RNA ภายในเซลล์จะทำให้เซลล์ของแบคทีเรียและไวรัสตายได้ อีกทั้งการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยวิธีนี้จะไม่ใช่สารเคมี ทำให้ไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายตกค้างเกิดขึ้นในระบบ ข้อเสียของการใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรค คือ หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตมีราคาที่สูง สำหรับน้ำที่ต้องการฆ่าเชื้อโรคด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเลต ควรมีความขุ่น หรือค่า TSS ต่ำ ระยะห่างระหว่างหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตกับจุลชีพต้องเหมาะสม และควรมีการนำหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตออกมาชะล้างเป็นประจำ เนื่องจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตจะมีเมือกปกคลุมเป็นเหตุทำให้กั้นแสงอัลตราไวโอเลตได้ เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2557)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงหรือกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technologies) ที่สามารถใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยกว่าการใช้คลอรีนในแง่ของสารตกค้างที่เป็นพิษ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนด้วยกัน คือ พลังงานแสง (Photon) และ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเริ่มจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือรับพลังงานโฟตอนจากแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นวงนอกสุดหรือแถบวาเลนซ์ (valence-band) ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชัน (conduction band) ทำให้เกิดเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ที่เรียกว่า โฮล (hole: h^+)

ซึ่งโฮลนี้สามารถออกซิไดซ์ไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ (OH) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลลขึ้น (hydroxyl radical; OH•) ส่วนอิเล็กตรอนในชั้นแถบคอนดักชันสามารถไปรีดิวซ์ออกซิเจนในน้ำ (O₂) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลล (Super Oxide radical: O₂-•) ทั้งสองตัวนี้ล้วนแล้วแต่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถทำลายเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียและทำลายองค์ประกอบในเซลล์จนทำให้เซลล์นั้นตายในที่สุด (Hinthong *et al.*, 2010) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor) ที่สามารถให้อิเล็กตรอนเมื่อมีพลังงานมากระตุ้น (Linsebigler *et al.*, 1995) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO₃) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อลูมิเนียมไดรอกไซด์ (Al₂O₃) เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากมีช่องว่างพลังงานที่กว้าง สามารถดูดกลืนแสงและแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดี มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี อีกทั้งยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Di-shun *et al.*, 2009)

การวิจัยทางด้านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส สำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งในรูปแบบของผงและรูปแบบของฟิล์มบาง การใช้ในรูปแบบของผงมีข้อจำกัดคือ อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ หากใส่มากเกินไป จะเป็นตัวบดบังการเข้าถึงของพลังงานแสงที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาค ทำให้การกระตุ้นด้วยแสงทำได้ไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคก็จะลดลง (พวงรัตน์, 2557) ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของฟิล์มบาง จะช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้นได้ โดยเกิดจากการตรึง (Immobilized) ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นฟิล์มบาง (Thin Films) โดยอยู่บนผิวของตัวกลางหรือซับสเตรท เช่น ไทเทเนียม แก้ว พอลิเมอร์ (Zhong *et al.*, 2015) ในปัจจุบันนักวิจัยสามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชันให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูปท่อนาโน (Nanotubes) ซึ่งมีข้อดีคือ ในขนาดพื้นที่ตัวกลางที่เท่ากัน คาดว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กระบวนการแอโนไดซ์เซชันทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการรับพลังงานแสงมากกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบตรึงบนตัวกลาง ซึ่งทำให้สามารถกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนบนพื้นผิวได้จำนวนมาก ส่งผลให้นักวิจัยสามารถใช้ประโยชน์จากอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดซ์เซชัน และทำการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนให้ตอบสนองต่อแสงวิเบิลด้วยวิธีโฟโตเคลปโพลิซัน ซึ่งจะนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำต่อปัจจัยต่าง ๆ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลผ่านของน้ำบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันและ การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาให้ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิล

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิล

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง คือตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่มีการสังเคราะห์ขึ้นเองด้วยเทคนิคการแอโนไดซ์เซชัน และจะมีการปรับปรุงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลตามวิธีการของ Zhong *et al.*, (2015)

1.3.2 น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำที่เตรียมขึ้นโดยให้มีเชื้อแบคทีเรียที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งแบคทีเรียที่จะใช้ในการทดสอบเป็นแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia Coli (E.coli)* และแบคทีเรียแกรมบวก *Fecal Streptococcus*

1.3.3 พลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอ ที่มีความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร ขนาด 10 วัตต์ และแสงวิซิเบิล ที่มีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 -760 นาโนเมตร ขนาด 10 วัตต์

1.3.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ คือ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา และแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน คือ แสงยูวี และแสงวิซิเบิล 2) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 3) อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา และ 4) การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วสามารถตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลเพิ่มมากขึ้น

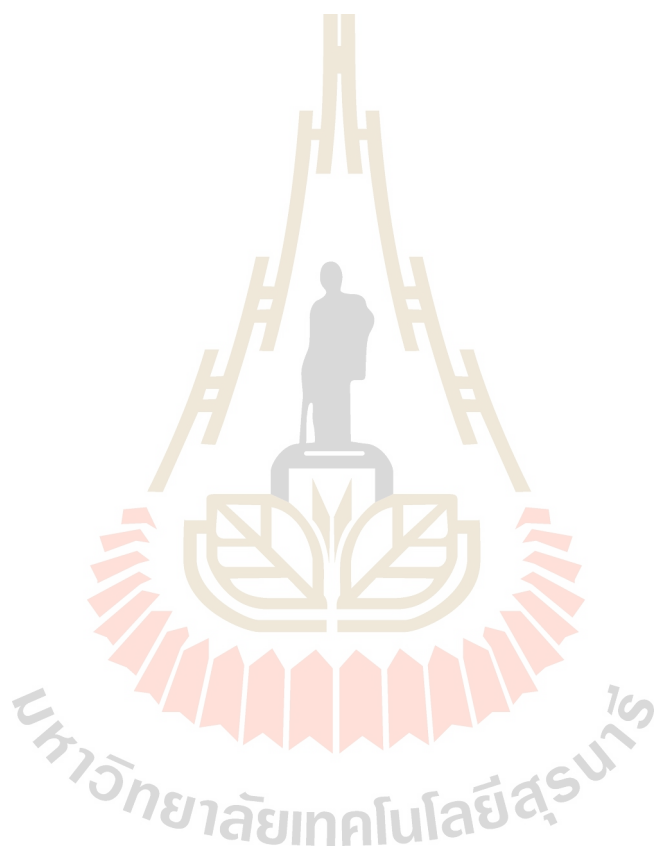
1.4.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติสามารถตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลได้

1.5.2 ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค
ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

1.5.3 ได้ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา แหล่งกำเนิดแสง พื้นที่ผิว
อัตราการไหลผ่านของน้ำบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่า
เชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส



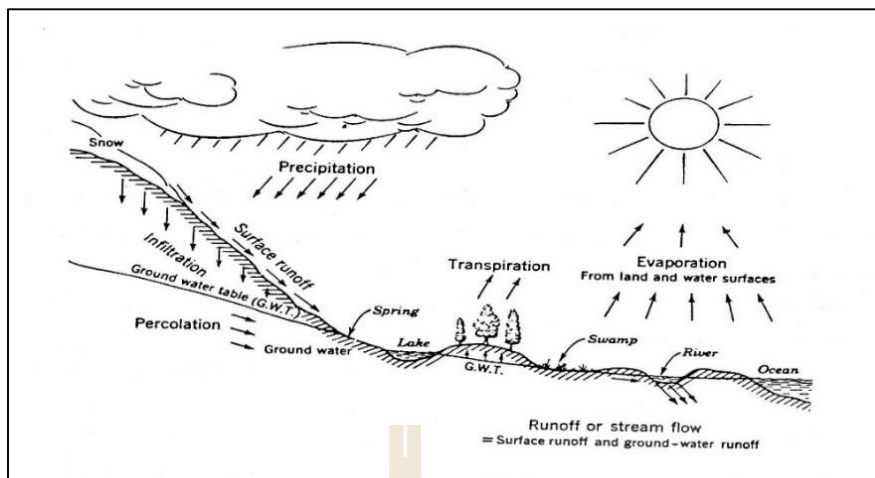
บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หากกล่าวถึง“อุทกภาค” หมายถึง ส่วนที่ห่อหุ้มเปลือกโลกที่เป็นน้ำทั้งหมด ประกอบด้วย ความชื้นในบรรยากาศ หยาดน้ำฟ้า น้ำไหลบ่า ความชื้นในดิน น้ำใต้ดิน แม่น้ำลำธาร ทะเลสาบ น้ำในมหาสมุทร และธารน้ำแข็ง ซึ่งอุทกภาคนั้นมีความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกับการดำรงชีพของทุกสรรพสิ่งมีชีวิตในโลกในการเจริญเติบโตในระบบนิเวศ โดยเฉพาะมนุษย์ ในอดีตการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์มักอาศัยอยู่รวมกันเป็นกลุ่มในบริเวณแม่น้ำหรือลุ่มน้ำและพัฒนาระบบการแจกจ่ายน้ำแบบต่างๆ จนกลายมาเป็นระบบประปาที่มีความสะอาดปราศจากเชื้อโรคสู่ผู้รับบริการตั้งแต่ระดับครัวเรือน ชุมชนชนบท ชุมชนเมือง สาธารณูปโภค และภาคอุตสาหกรรมในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของโลกให้มีการพัฒนาและเจริญเติบโต

2.1 ประเภทของแหล่งน้ำดิบ

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ปรากฏอยู่ในโลกมีประมาณ 1.36×10^{21} ลิตร เมื่อคิดเป็นสัดส่วนร้อยละจะพบว่าแหล่งน้ำผิวดินที่เป็นน้ำจืดมี 0.01% น้ำใต้ดิน 0.63% และแหล่งน้ำเค็ม 99.36% ซึ่งน้ำเหล่านี้จะมีการหมุนเวียนกันตามธรรมชาติ (Fetter., 2001) หรือที่เรียกว่า วัฏจักรของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ก็จะทำให้ผิวน้ำบนโลกเกิดการระเหยเป็นไอน้ำลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเบื้องบน ซึ่งส่วนใหญ่ไอน้ำเกิดจากการระเหยน้ำทะเลและมหาสมุทร นอกจากนั้นก็จะเกิดจากพื้นผิวดิน แม่น้ำ ลำธาร พืช น้ำฝนที่ตกลงมาพื้นโลก ส่วนหนึ่งจะซึมลงดิน ซึ่งชั้นดินหรือชั้นผิวดินอุ้มน้ำได้จำนวนหนึ่ง บางส่วนของน้ำที่ซึมลงดิน ก็จะซึมต่อไปด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งสู่ชั้นดินลึกลงไปเรื่อยๆ โดยเฉพาะถ้าเป็นชั้นหินดินทราย กรวด ดินเหนียว ดินดาน หินดาน ก็จะทำหน้าที่กักขังน้ำไว้ กลายเป็นน้ำใต้ดินและอีกส่วนจะมีการไหลลงสู่ลำธาร คลอง แม่น้ำ อ่างเก็บน้ำ ทะเล มหาสมุทร ในที่สุดน้ำเหล่านี้ก็จะระเหยอีกครั้งหนึ่งเป็นวัฏจักรที่เกิดในธรรมชาติ จากปรากฏการณ์ของน้ำที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจะสามารถแบ่งน้ำออกได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้ (เกรียงศักดิ์, 2557)



รูปที่ 2.1 วงจรของน้ำ
(เกรียงศักดิ์, 2557)

2.1.1 น้ำผิวดิน

น้ำผิวดิน หมายถึงน้ำที่ขังอยู่บนพื้นผิวโลก โดยส่วนใหญ่เป็นฝนที่ตกลงสู่พื้นดินไหลลงที่ต่ำและถูกกักเก็บในส่วนของพื้นดินที่เป็นหลุมเป็นบ่อ ส่วนของน้ำฝนไหลลงที่ต่ำตามลำธาร คลอง แม่น้ำ อ่างเก็บน้ำ และยังคงรวมถึงส่วนของน้ำที่ไหลล้นออกจากใต้ดินเข้ามาสมทบด้วย แหล่งน้ำผิวดินเพื่อการอุปโภคที่มีความสำคัญคือ แม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ ทะเลสาบน้ำจืด ลักษณะทั่วไปของน้ำผิวดิน คือ ขาดคุณภาพที่ดี ไม่สามารถนำมาดื่มได้อย่างปลอดภัย โดยปราศจากการปรับปรุงคุณภาพของน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของน้ำบนผิวดินที่มารวมกันและได้มีการชะล้างพัดพาเอาสิ่งต่าง ๆ ปะปนมาด้วยทำให้น้ำผิวดินมีคุณภาพที่ไม่ดี เช่น มีความขุ่น สี กลิ่น สารพิษ และเชื้อโรคต่างๆ โดยเฉพาะน้ำผิวดินที่มีการไหลผ่านย่านชุมชนหรือย่านอุตสาหกรรมเป็นต้น ค่าความขุ่นของแหล่งน้ำเปิดเช่น แม่น้ำลำคลอง จะมีค่ามากกว่าแหล่งน้ำปิด เช่น อ่างเก็บน้ำหรือทะเลสาบ แหล่งน้ำผิวดินมีคุณภาพทางเคมีในลักษณะการละลายแร่ธาตุต่าง ๆ แต่มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีคุณภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับน้ำใต้ดิน ทั้งนี้ขึ้นกับพื้นที่น้ำผิวดินที่ไหลผ่าน ถ้าน้ำผิวดินไหลผ่านที่สารเคมีต่าง ๆ มากมายเช่น แก๊สคลอรีน สารโลหะหนัก จะยากที่จะบำบัดเพื่อทำเป็นน้ำประปาที่มีราคาถูก ส่วนคุณภาพน้ำทางชีววิทยา น้ำผิวดินจะมีจุลินทรีย์ค่อนข้างสูง เนื่องจากน้ำผิวดินมีสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นอาหารอย่างดีของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว (มันสิน, 2542) ดังตารางที่ 2.1 ได้แสดงคุณภาพน้ำผิวดินในแม่น้ำสายสำคัญในประเทศไทย ซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นกับสภาพภูมิประเทศและการใช้แหล่งน้ำของชุมชนที่น้ำผิวดินไหลผ่าน นอกจากนี้คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติยังได้แบ่งน้ำผิวดินออกเป็น 5 ประเภทตามประโยชน์

การใช้ที่ดิน โดยออกประกาศ เรื่อง การกำหนดมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เพื่อเป็นแนวทางการรักษาคุณภาพแหล่งน้ำที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ และฟื้นฟูคุณภาพแหล่งน้ำที่เสื่อมโทรมให้มีสภาพที่ดีขึ้น (เกรียงศักดิ์, 2557)

ตารางที่ 2.1 คุณภาพน้ำผิวดินในแม่น้ำสายสำคัญในประเทศไทย

แหล่งน้ำ	ปี	ค่าบีโอดี (มิลลิกรัม/ ลิตร)	ค่าออกซิเจน ละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด * 1000 (เอ็มพีเอ็น/100 มิลลิลิตร)
เจ้าพระยา	2548	1.1	4.0	58.8
	2549	1.3	3.8	47.5
	2550	0.7-2.5	0.2-7.5	5.0-160
	2551	0.1-4.1	2.4-6.0	13.0-1600
ท่าจีน	2548	2.0	2.4	52.7
	2549	1.6	1.9	13.6
	2550	1.0-4.0	1.0-3.1	3.0-160
	2551	2.0-4.0	1.0-6.8	2.2-160
แม่กลอง	2548	1.7	4.8	20.9
	2549	1.6	5.8	8.55
	2550	0.5-4.3	3.4-6.8	0.3-460.0
	2551	0.3-4.2	2.0-6.5	0.33-1,400
บางปะกง	2548	1.6	3.5	13
	2549	1.2	5.2	8.36
	2550	0.4-3.6	2.2-7.9	0.02-160
	2551	0.3-6.6	2.3-8.8	0.13-160
ลำตะคอง	2548	6.5	2.3	3,500
	2549	4.7	4.0	36.5
	2550	3.8-7.7	3.1-5.3	0.02-160
	2551	2.4-7.9	1.8-4.9	1.2-1,600

ที่มา : (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

ตารางที่ 2.2 การกำหนดประเภทแหล่งน้ำผิวดิน

ประเภทแหล่งน้ำ	การใช้ประโยชน์
ประเภทที่ 1	ได้แก่ แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ
	(1) การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน
	(2) การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน
ประเภทที่ 2	(3) การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ
	ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ
	(1) การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
	(2) การอนุรักษ์สัตว์น้ำ
ประเภทที่ 3	(3) การประมง
	(4) การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ
	ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ
	(1) การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
ประเภทที่ 4	(2) การเกษตร
	ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ
	(1) การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน
ประเภทที่ 5	(2) การอุตสาหกรรม
	ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม

ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

2.1.2 น้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดิน หมายถึง น้ำที่แทรกอยู่ในชั้นหินและถูกกักขังอยู่ตามช่องว่างของเม็ดหินดินทราย ชั้นดิน เนื้อพรุน ในที่ว่าง รอยแตก หรือโพรงชั้นดินซึ่งอยู่ใต้ผิวโลก แต่ละชั้นของน้ำบาดาลจะรองรับด้วยหินเนื้อแน่นไม่ยอมให้ไหลซึมลงไปข้างล่าง แต่น้ำบาดาลจะมีการเคลื่อนไหวและไหลล้นอยู่ตลอดเวลา การไหลมักจะมีทิศทางไหลเหมือนแม่น้ำลำธาร (มันสิน, 2542) น้ำใต้ดินตามธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 อาณาเขต คือ เขตสัมผัสอากาศ และเขตที่อึดตัวไปด้วยน้ำ โดยเขตสัมผัสอากาศจะเป็นเขตที่มีปริมาณตั้งแต่ผิวดินถึงระดับน้ำใต้ดิน ทั้งนี้ น้ำในบริเวณนี้มีความลึกจากผิวดินไม่มากนัก ปริมาณน้ำใต้ดินในเขตนี้จะมีปริมาณไม่มากนักเช่นกัน

และจะแห้งในฤดูแล้ง ส่วนเขตที่อ้อมตัวไปด้วยน้ำเป็นเขตที่มีบริเวณเริ่มตั้งแต่ชั้นต่อจากระดับน้ำใต้ดินลงไป ในเขตนี้เรียกว่า น้ำบาดาล ซึ่งส่วนใหญ่มีปริมาณมากพอที่จะนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค เป็นต้น โดยปกติคุณภาพของน้ำใต้ดินทางกายภาพและทางชีววิทยาจะอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น มีความใส ปราศจากตะกอนความขุ่น ปราศจากจุลชีพ แต่สำหรับคุณภาพทางเคมีของน้ำใต้ดินมักจะไม่แน่นอน เนื่องจากน้ำบาดาลมักไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง เหล็กแมงกานีสพบได้ง่ายในน้ำใต้ดิน และมีแร่ธาตุและสารละลายปนอยู่ในน้ำที่ปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน ซึ่งคุณภาพน้ำใต้ดินจะขึ้นอยู่กับประเภทของชั้นหินและชั้นดินที่กักเก็บน้ำใต้ดิน ดังในตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลคุณภาพน้ำใต้ดินทั่วไป ซึ่งอาจมีความแตกต่างกับน้ำใต้ดินแหล่งอื่น ๆ (เกรียงศักดิ์, 2557)

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับน้ำใต้ดิน

คุณภาพ	ขนาด	คุณภาพ	ขนาด
ทางกายภาพ			
ความขุ่น, NTU	0.5	ตะกอนละลายน้ำ, มิลลิกรัม/ลิตร TDS	250
ทางเคมี			
ไนโตรเจน, มิลลิกรัม/ลิตร N	10	ฟอสฟอรัส, มิลลิกรัม/ลิตร P	0.01
ความกระด้าง มิลลิกรัม/ลิตร CaCO ₃	120	ความเป็นด่าง, มิลลิกรัม/ลิตร CaCO ₃	150
ฟิเอช	4.5	แคลเซียม, มิลลิกรัม/ลิตร	40
แมกนีเซียม, มิลลิกรัม/ลิตร	5	โซเดียม, มิลลิกรัม/ลิตร	5
โปแตสเซียม, มิลลิกรัม/ลิตร	2	เหล็ก, มิลลิกรัม/ลิตร	0.1
ไบคาร์บอเนต, มิลลิกรัม/ลิตร	120	คลอไรด์, มิลลิกรัม/ลิตร	25
ซัลเฟต, มิลลิกรัม/ลิตร	10	ไนเตรท, มิลลิกรัม/ลิตร	10
ฟลูออไรด์, มิลลิกรัม/ลิตร	0.1	คาร์บอนอินทรีย์, มิลลิกรัม/ลิตร TOC	0.5
ทางชีววิทยา			
โคลิฟอร์ม เอ็มพีเอ็น/100 มิลลิลิตร	100	ไวรัส ซีเอฟยู/100มิลลิลิตร	1.0

ที่มา : (เกรียงศักดิ์, 2557)

2.1.3 น้ำฝน

น้ำฝน หมายถึงน้ำทุกรูปแบบที่ตกลงมาจากชั้นบรรยากาศเบื้องบนลงสู่พื้นดินเช่น ฝน หิมะ ลูกเห็บ น้ำค้าง เป็นต้น โดยทั่วไปคุณภาพของน้ำฝนจัดว่าเป็นน้ำใสสะอาด บริสุทธิ์ มี

คุณภาพดี ทั้งกายภาพ เคมี ชีวภาพ โดยรวมคุณภาพทางชีววิทยาจะดีที่สุด ไม่พบจุลินทรีย์ เนื่องจากฝนเกิดจากการกลั่นที่เกิเกิดขึ้น โดยธรรมชาติ น้ำฝนจะมีคุณสมบัติเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งในชั้นบรรยากาศมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งในสภาพบรรยากาศปัจจุบันทำให้มีการปนเปื้อนของน้ำฝน จึงทำให้คุณภาพของน้ำฝนเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้คุณภาพของน้ำฝนจะขึ้นอยู่กับภาชนะที่รองรับ เก็บกัก หรือหลังคา สำหรับศึกษาภาพในการนำน้ำฝนมาใช้ในการผลิตน้ำประปามักมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณน้ำฝนนั้นมีปริมาณต่ำ เนื่องจากว่า มีการสูญเสียหลายทาง เช่น ซึมลงใต้ดิน ระเหยกลับสู่บรรยากาศ หรือไหลลงบนผิวดิน เป็นต้น (วิรัช, 2538) ประเทศไทยมีฝนตกเฉลี่ยประมาณปีละ 1,648.4 มิลลิเมตร ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาปริมาณฝนรวมทั้งประเทศตลอดปี เฉลี่ยระยะเวลา 30 ปี ข้อมูลปี 2524-2553 (แผนการจัดสรรน้ำและเพาะปลูกพืชฤดูฝนในเขตชลประทาน พ.ศ. 2558 กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์)

2.2 คุณลักษณะของน้ำ (Water Characteristic)

น้ำสะอาดย่อมปราศจากสิ่งเจือปนทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งดัชนีเหล่านี้เป็นสิ่งที่สำคัญในการบ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำที่สะอาด และเมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดัชนีนี้เป็นสิ่งที่รองรับความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ซึ่งการจะเลือกแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคหรือบริโภค ปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาคือคุณลักษณะจากน้ำแหล่งนั้น โดยคุณลักษณะน้ำที่สำคัญจะสามารถจำแนกได้จาก คุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Characteristics)

คุณลักษณะทางกายภาพ เป็นสิ่งที่เราสามารถสัมผัสด้วยประสาทสัมผัส เช่น มองเห็น ได้ด้วยตา ดมกลิ่น ลิ้มรส โทษของสิ่งเจือปนนี้ไม่มีผลต่อสุขภาพโดยตรงมากนัก และสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ง่ายกว่าคุณลักษณะด้านอื่น ๆ

1) ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากสารพวกที่แขวนลอยในน้ำ เช่น ดินโคลน ทรายละเอียด และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจำพวกสาหร่ายเซลล์เดียว แพลงก์ตอน และไดอะตอม สารพวกนี้ จะทำให้เกิดการหักเหของแสงจึงทำให้เกิดการมองเห็นน้ำมีลักษณะขุ่น ทำให้น้ำดูไม่ใสสะอาด ไม่นำมาใช้

2) สี (Color) ในธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดจากพืชหรือใบไม้เน่าเปื่อยและมักจะมีสีชาแต่น้ำที่มีสีอาจเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้เช่นกัน การกำจัดสีออกจากน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับโรงงานผลิตประปา

3) อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิของน้ำมีความสำคัญเกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำประปา คือการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับน้ำดิบจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ เช่น ถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำจะต้องการสารเคมีในการผลิตน้ำประปามากขึ้นและจะมีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำประปาดำกว่าน้ำอุ่น สำหรับน้ำธรรมชาติมักมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงปกติ จึงไม่มีมาตรฐานสำหรับบ่งชี้ค่าอุณหภูมิของน้ำไว้

4) กลิ่นและรส (Odor and Taste) กลิ่นและรสในน้ำเกิดในน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น จุลินทรีย์ต่าง ๆ เช่น สาหร่าย ไดอะตอม และ โปรโตซัว (สาหร่ายมักเป็นสาเหตุสำคัญที่สุด), ก๊าซต่างๆ ที่ละลายน้ำ เช่น ก๊าซไข่เน่า, การเนาเปื้อยของสารอินทรีย์ในน้ำซึ่งขาดออกซิเจน, น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม, ผลการเติมสารเคมีบางอย่าง เช่น คลอรีนและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เหล็ก เป็นต้น (มันสิน, 2542)

2.2.2 ลักษณะสมบัติทางเคมี

ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำ เกิดขึ้นเนื่องจากมีแร่ธาตุหรือสารประกอบต่างๆ ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งสารเหล่านี้ อาจจะมีพิษหรือไม่มีพิษก็ได้

1) สารที่ไม่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ pH ความเป็นด่าง ความกระด้าง คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ แอมโมเนีย แคลเซียม แมกนีเซียม คลอไรด์ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส MBAS (methylene blue active substance) ฟีนอล ฟอสเฟต TDS ซัลเฟต สังกะสี และออกซิเจน

2) สารที่มีพิษต่อสุขภาพ ได้แก่ ฟลูออไรด์ สารหนู แบเรียม โบรอน แคลเซียม โครเมียม ไซยาไนต์ ตะกั่ว ไนเตรต ไนไตรต์ เซเลเนียม และยาทำลายศัตรูพืชยาฆ่าแมลง (ทวีศักดิ์, 2554)

2.2.3 ลักษณะสมบัติทางชีววิทยา

คุณลักษณะของน้ำทางชีววิทยามีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภค เพราะเชื้อโรคเป็นอันตรายที่ทำให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บขึ้นได้เนื่องจากโรคที่เกิดจากน้ำเป็นสื่อ (Water- Borne Diseases) (มันสิน, 2542) ซึ่งน้ำสามารถเป็นสื่อหรือตัวกลางนำเอาสิ่งสกปรก เชื้อโรคมาร่วมมนุษย์ได้ 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 ก็มักจะเกิดการแพร่กระจายของ

เชื้อโรคได้ง่าย และอาจแพร่กระจายไปสู่ชุมชนอื่นได้ด้วย ซึ่งเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

2.2.3.1 กลุ่มที่สามารถทำให้เกิดโรคได้ในคน (Enteric pathogen or Pathogenic microorganism) เป็นแบคทีเรียชนิดที่เป็นอันตรายและมีอยู่ในลำไส้ของคน เรียกว่า เอนเทอริก พาโทเจน เชื้อพวกนี้สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส คือเท่ากับอุณหภูมิในร่างกายของคน เมื่อคนป่วยเป็นโรคบิด อหิวาตกโรค หรือ ไทฟอยด์ ถ่ายอุจจาระลงไปในน้ำ แบคทีเรียพวกนี้จะปนเปื้อนลงไปในน้ำ และสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เป็นเวลานาน จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคโดยมีน้ำเป็นสื่อ นำโรคที่สำคัญ (WHO, 2000) มีดังนี้

1) ไวรัส (virus) เป็นจุลินทรีย์ขนาดเล็ก มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น ไวรัสสามารถแพร่กระจายในน้ำได้ กลุ่มโรคที่สำคัญได้แก่ ไวรัสตับอักเสบบี ไวรัสตับอักเสบบี เป็นต้น

2) แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดโตกว่าไวรัส สำหรับโรคที่มีน้ำเป็นสื่อกลางที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์นั้น ส่วนใหญ่มักเป็นเชื้อแบคทีเรีย (Bacterial infection) ซึ่งเชื้อแบคทีเรียจะแบ่งตามลักษณะของเชื้อโรคหรือสิ่งที่ทำให้เกิดอาการของโรคได้ดังนี้ (ถาวร, 2529)

2.1) เชื้อแบคทีเรีย *Vibrio cholera* ทำให้เกิดโรคอหิวาตกโรค (Cholera) เชื้อ *Vibrio cholera* พบในอุจจาระของผู้ป่วย หรือผู้เป็นพาหะของโรค การได้รับเชื้อเกิดจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อเข้าไป ผู้ป่วยมักจะมีอาการหลังจากการดื่มน้ำที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนเข้าไปภายใน 2-3 ชั่วโมง อาการที่พบคือ อุจจาระร่วงอย่างรุนแรง มีไข้ อาเจียน หมดสติ และอาจถึงตายได้

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

2.3) เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhi* ทำให้เกิดโรคไข้ไทฟอยด์ (Typhoid fever) หรือ โรคไขกระดูกน้อย เชื้อ *Salmonella typhi* พบในอุจจาระของผู้ป่วย หรือผู้เป็นพาหะของโรค การได้รับเชื้อเกิดจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อเข้าไป ผู้ป่วยมักจะมีอาการหลังจากการดื่มน้ำที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนเข้าไปภายใน 7-21 วัน อาการที่พบคือ มีไข้ติดต่อกันทุกวัน มีจุดแดงขึ้นตามตัว มีอาการท้องผูกสลับท้องเสีย ปวดท้อง ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลียและเบื่ออาหาร

3) โปรโตซัว (Protozoa) ทำให้เกิดโรคบิดอะมีบา ซึ่งเกิดจากเชื้อโปรโตซัวชนิด *Entamoeba histolytica* โรคจิอาร์เดีย เกิดจากโปรโตซัวชนิด *Giardia lamblia* เป็นต้น

4) หนอนพยาธิ (Helminth) จัดเป็นพวกปรสิต ต้องอาศัยอยู่บนหรือร่างกายของสิ่งมีชีวิตอื่น พยาธิที่ทำให้เกิดโรคได้แก่ โรคพยาธิไส้เดือนกลม (*Ascariasis*) เป็นต้น

2.2.3.2 แบคทีเรียที่ไม่ก่อให้เกิดโรคลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกที่อยู่ในลำไส้ของคนและสัตว์มากที่สุด มีชื่อเรียกว่า โคลิฟอร์มแบคทีเรียพวกนี้จะมีอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลือดอุ่นทุกชนิด ในอุจจาระปกติของคน 1 กรัม จะมีโคลิฟอร์มแบคทีเรียประมาณ $10^5 - 10^8$ ตัว โดยปกติแล้วแบคทีเรียพวกนี้จะไม่ก่อให้เกิดโรค แต่เมื่อถ่ายออกมา กับอุจจาระไปปนเปื้อนกับน้ำ จะสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำได้นานกว่าพวกแรก (สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2551)

2.3 การตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย

การตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย เป็นดัชนีที่จะบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำ เนื่องจากมีแบคทีเรียหลายชนิดที่ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร เช่น ไทฟอยด์ บิด และอหิวาตกโรค ซึ่งสามารถตรวจพบได้ในอุจจาระ เมื่อถูกขับถ่ายปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะถูกแพร่กระจายไปโดยมีน้ำเป็นสื่อ และจะมีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของคนที่ใช้ น้ำในแหล่งน้ำนั้น ดังนั้นในการตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรียวิทยา สามารถทำได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยการตรวจสอบทางตรง จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและปริมาณของแบคทีเรียที่เป็นอันตราย (Pathogens) ในน้ำ ซึ่งการตรวจวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียพวกนี้จากน้ำมีกรรมวิธีที่ละเอียด ครอบคลุบ ใช้เวลานาน ยุ่งยาก และสิ้นเปลือง ดังนั้นการตรวจวิเคราะห์น้ำทางด้านแบคทีเรียจึงไม่นิยมตรวจเชื้อพวกนี้ ส่วนการตรวจวิเคราะห์ทางอ้อมจะเป็นการตรวจวิเคราะห์แบคทีเรียที่เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำ (Indicator Bacterial) เช่น โคลิฟอร์มแบคทีเรีย ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย และ ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยแบคทีเรียเหล่านี้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำดังนี้ (นงลักษณ์, 2548)

1) สามารถตรวจวัดแบคทีเรียที่เป็นดัชนีได้ทุกครั้งที่ตรวจพบแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรค โดยเฉพาะโรคติดต่อระบบทางเดินอาหาร

2) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องตรวจพบว่ามีปริมาณมากกว่า และมีความทนทานในสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียที่เป็นเชื้อโรค

3) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องขึ้นในอาหารที่เตรียมได้ง่าย ให้ผลการทดสอบที่ชัดเจน สามารถตรวจสอบได้ง่าย และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

- 4) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีควรจะเจริญได้ดีโดยไม่ขึ้นอยู่กับเครื่องมือของจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ
- 5) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีควรจะตรวจพบได้ก่อนที่จะเชื้อจะก่อให้เกิดอันตราย

2.3.1 โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (Total Coliform Bacteria)

โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดคือกลุ่มของแบคทีเรีย แกรมลบ (*gram negative bacteria*) มีรูปร่างเป็นท่อน (rod shape) ไม่สร้างสปอร์ (non spore forming) แบคทีเรียกลุ่มนี้ พบได้ทั่วไปในดิน พืช น้ำ อากาศ และในลำไส้ของคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 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 ดังนั้นในการการพบเชื้อ Coliform Bacteria ในน้ำประปาที่ไม่ได้หมายความว่าน้ำปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อน ซึ่งอาจจะมีเศษดินปนเปื้อนอยู่ก็ได้ ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพน้ำทางแบคทีเรียจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ว่าโคลิฟอร์มแบคทีเรียนั้นมาจากดินหรือมาจากลำไส้คนหรือสัตว์ โดยโคลิฟอร์มที่นิยมตรวจคือ *Escherichia coliform bacteria* หรือ *E.coli* (ศุภยงค์, 2547)

2.3.2 ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Fecal Coliform Bacteria)

ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียมีถิ่นอาศัยในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์และสัตว์ และจะมีการปนเปื้อนออกมากับอุจจาระเสมอ แบคทีเรียชนิดนี้สามารถหมักย่อยน้ำตาลแลคโตสที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสในเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ได้แก่ *Escherichia coil (E.coli)* ซึ่ง *E. coli* จะพบในอุจจาระของมนุษย์ปกติประมาณ 10^8 เซลล์ต่อกรัม แต่ในกรณีที่เป็นโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหารแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคก็จะปนออกมากับอุจจาระ ดังนั้นถ้าตรวจพบ *E.coli* ในแหล่งน้ำแสดงว่ามีการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และอาจมีโอกาสได้รับอันตรายจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารด้วย นอกจากนี้การพบ *E.coil* ยังแสดงให้เห็นว่ามีการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายใหม่ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของ *E.coli* เกิดขึ้นได้ยากและสามารถมีชีวิตอยู่ได้นานประมาณ 8 สัปดาห์เท่านั้น สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการใช้โคลิ-

ฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย เป็นพารามิเตอร์หนึ่งในมาตรฐานแหล่งน้ำ (ศุภยางค์, 2547) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย

ประเภทของมาตรฐาน	ฟีคัลโคลิฟอร์ม MPN/100 มิลลิตร		โคลิฟอร์มทั้งหมด MPN/100 มิลลิตร	
	แหล่งน้ำ ประเภท 2	แหล่งน้ำ ประเภท 3	แหล่งน้ำ ประเภท 2	แหล่งน้ำ ประเภท 3
มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	ไม่เกิน 1000	ไม่เกิน 4000	ไม่เกิน 5000	ไม่เกิน 20000
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา	ตรวจไม่พบ		การประปา ส่วนภูมิภาค	กรมอนามัย
			ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ตรวจไม่พบ		น้อยกว่า 2.2	
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ตรวจไม่พบ		เกณฑ์อนุโลมสูงสุด 2.2	
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ	

ที่มา : (ประพัฒน์, 2555)

2.3.3 ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย (Fecal Streptococcus Bacteria)

ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ที่มีรูปร่างกลมต่อกันเป็นโซ่ ไม่สร้างสปอร์ สามารถย่อยสลายน้ำตาลให้กรดแลคติกเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่ให้อำนาจ เป็นแบคทีเรียที่มีแหล่งกำเนิดมาจากอุจจาระของสัตว์เคี้ยวเอื้องเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการตรวจพบแบคทีเรียพวกนี้แสดงว่ามีการปนเปื้อนของอุจจาระ (American Public Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 1998) ซึ่งสาเหตุที่ใช้ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำ เนื่องจากฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียจะไม่เพิ่มจำนวนเมื่ออยู่ในน้ำและปริมาณที่พบจะมีความสัมพันธ์กับ *E.coli* แต่สามารถมีชีวิตอยู่ได้นานกว่า

และ Cohen., (1973) ได้ศึกษาการมีชีวิตอยู่ของฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสีย แม่น้ำที่เกิดมลพิษ ทะเลสาบ และแหล่งน้ำดื่มในกรุงเยรูซาเลม ประเทศอิสราเอล พบว่า ฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียจะมีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมของน้ำตามธรรมชาติมากกว่าแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ ทำให้มีชีวิตรอดในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ การตรวจหาปริมาณของฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียนอกจากจะแสดงการถูกปนเปื้อนและแหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนจากอุจจาระของสัตว์เลือดอุ่นแล้วยังช่วยสนับสนุนการ ตรวจหาปริมาณของโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนของฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย *Fecal Coliform Bacteria* ต่อฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย สามารถบอกแหล่งที่มาของการปนเปื้อน ได้ว่ามาจากมนุษย์หรือสัตว์เลือดอุ่นได้ เพราะสิ่งขับถ่ายของมนุษย์จะมีฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรียมากกว่าฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรีย แต่ในทางตรงกันข้าม สิ่งขับถ่ายจากสัตว์จะมีปริมาณฟีคัลสเตรปโตคอคคัสแบคทีเรียมากกว่าฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Kjellander., 1960) ซึ่ง วีระชัย, (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 2.5

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนระหว่าง *Fecal Coliform Bacteria* : *Fecal Streptococcus Bacteria*

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

ที่มา: (วีระชัย, 2530)

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย

ในการตรวจนับจำนวนแบคทีเรียจากตัวอย่างของวัสดุหรือสารละลายแบคทีเรียนั้นเจริญหรือปนเปื้อนอยู่สามารถกระทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.4.1 การวัดความขุ่นของเซลล์ Optical density (O.D.)

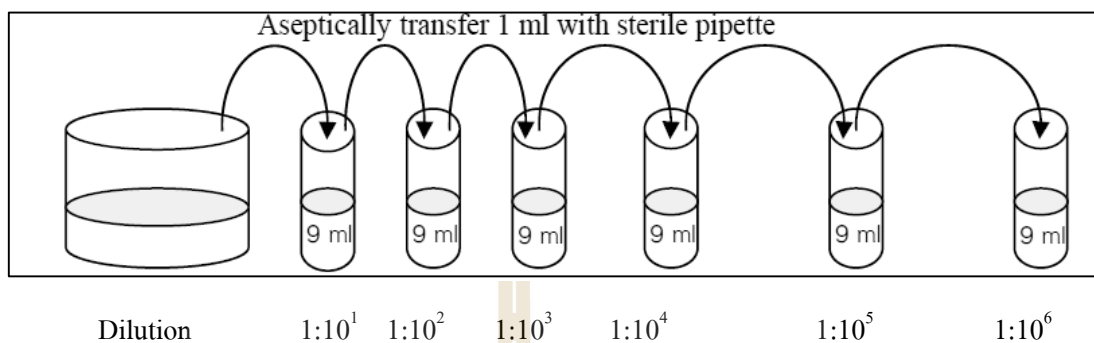
การวัดความขุ่นของเซลล์ที่เจริญเติบโตอยู่ในอาหารเหลว ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยอ่านค่าออกมาเป็น Absorbance หรือ ความขุ่น Optical density (O.D.) เป็นการวัดทางกายภาพ (Physical method) วิธีนี้อาศัยหลักการหักเหของแสง เมื่อส่องไปถูกเซลล์ของแบคทีเรีย ความยาวคลื่นแสงที่สามารถวัดได้ คือ 400 และ 600 นาโนเมตร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

2.4.2 เทคนิคการนับจากจานเพาะเชื้อ (Plate Count)

เทคนิคการนับจากจานเพาะเชื้อเป็นวิธีการตรวจทางชีวภาพวิธีหนึ่งซึ่งเป็นการตรวจนับจำนวนเซลล์จุลินทรีย์ที่มีชีวิต โดยใช้เทคนิค Viable count หรือ Plate count หลักการคือ เมื่อแบคทีเรีย 1 เซลล์เพิ่มจำนวนจะสร้างเป็นโคโลนีให้เห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนแบคทีเรียในปริมาณที่กำหนดได้ ไม่ว่าจะแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงใดของการเจริญเติบโต ทุก ๆ เซลล์ก็สามารถสร้างสร้างโคโลนีได้ ดังนั้นถือว่าจำนวนโคโลนีที่นับได้ คือจำนวนของเซลล์แบคทีเรียทั้งหมด ค่าที่นับจะเชื่อถือได้ก็ต่อเมื่อเซลล์ถูกแยกออกจากกันเป็นเซลล์เดี่ยว ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธี Spread plate หรือ Pour plate แต่ทั้ง 2 วิธี จะต้องทำการเจือจางแบคทีเรียแบบ Serial dilution เสียก่อน จากนั้นจึงเปิดแบคทีเรียที่เจือจางในปริมาณน้อย ๆ มากระจายบนอาหารหรือผสมกับอาหารต่อไป (ชื่นจิตต์, 2554)

2.4.2.1 วิธี Serial dilution เป็นการเจือจางน้ำตัวอย่างด้วย phosphate buffer หรือ peptone water ที่บรรจุอยู่ในหลอดทดลองปริมาณ 9 มิลลิลิตร ซึ่งการ Dilute จะเริ่มจากการเปิดน้ำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ใส่ลงใน peptone water ปริมาณ 9 มิลลิลิตร หลอดที่ 1 เขย่าให้เข้ากัน หลอดนี้ จะมีความเจือจาง 1:10 ใช้เปิดอันใหม่คือน้ำตัวอย่างจากหลอดที่ 1 ปริมาณ 1 มิลลิลิตรใส่ลงไปใน

peptone water หลอดที่ 2 เขย่าให้เข้ากัน หลอดนี้จะมีความเจือจาง $1:10^2$ ทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ความเจือจางของน้ำเท่ากับความต้องการ เช่น $1:10^5$ และ $1:10^6$ (ชินจิตต์, 2554) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการ Serial dilution (นงลักษณ์, 2541)

2.4.2.2 วิธี Spread plate เป็นการนับจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เริ่มจากการเทอาหารแข็งลงในจานอาหารที่ปลอดเชื้อและทิ้งไว้ให้อาหารแข็งตัว หลังจากนั้น pipet 0.1 มิลลิลิตร จากหลอดความเจือจางที่เลือก เช่น เลือกความเจือจางที่ $1:10^4$ $1:10^5$ และ $1:10^6$ ลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ เคลือบบนอาหารแข็งเป็นวงกลมด้วย sterile spreader ปล่อยให้แห้งและนำไปบ่มเชื้อ เมื่อเชื้อเจริญเติบโตเป็นโคโลนีให้เห็นใน Plate ที่มี 30 – 300 โคโลนีสามารถคำนวณจำนวนแบคทีเรียในน้ำตัวอย่าง โดยคูณจำนวนโคโลนีที่นับได้ด้วย 10 และ Dilution factor ค่าที่คำนวณได้จะมีหน่วยเป็น Colony forming unit/ml หรือ CFU/ml (ชินจิตต์, 2554)

การคำนวณปริมาณจุลินทรีย์ (ชินจิตต์, 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

2.4.2.3 วิธี Pour plate เป็นวิธีที่ผสมแบคทีเรียลงไปในการเลี้ยงเชื้อแข็งและเทส่วนผสมนี้ลงใน Plate พร้อมกัน โดยเริ่มจากการ pipet 1 มิลลิลิตรจากหลอดความเจือจางที่เลือก ปล่อยให้เย็นลงจนที่ปลอดเชื้อ และจะเทอาหารแข็งตามลงไป แล้วทำการผสมให้เข้ากัน โดยหมุนจานอาหารเป็นวงกลมช้า ๆ ทิ้งให้อาหารแข็งตัว จึงนำไปบ่มเชื้อ เมื่อเชื้อเจริญเติบโตเป็นโคโลนีให้เห็น

ใน Plate ที่มี 30 – 300 โคโลนี สามารถคำนวณจำนวนแบคทีเรียคล้ายกับวิธี Spread plate (เช่นจิตต์, 2554)

2.4.3 เทคนิคการตรวจหาจุลินทรีย์ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น (Most probable number MPN Technique)

วิธีเอ็มพีเอ็นเป็นวิธีการประเมินจำนวนจุลินทรีย์ที่เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปรากฏให้เห็นจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและทางเคมีของอาหาร โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ค่า MPN เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนจุลินทรีย์ที่ใช้หลักการทางสถิติ และประเมินจุลินทรีย์เฉพาะชนิด ซึ่งต้องการอาหารเลี้ยงเชื้อที่จำเพาะต่อชนิดของจุลินทรีย์ที่จะแสดงผลให้เห็น ได้ชัดเจน วิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานของการวิเคราะห์น้ำ โดยตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งในน้ำดื่ม น้ำใช้และน้ำทิ้งทั่วไป การตรวจวิเคราะห์แบคทีเรียโคลิฟอร์มโดยวิธี MPN ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1) การตรวจสอบขั้นแรก (Presumptive test) เป็นการเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยใช้อาหารเหลวซึ่งมีน้ำตาล lactose ทิ้งไว้ 24-48 ชั่วโมงที่ 35 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบว่าแบคทีเรียฟอร์เมนต์น้ำตาลแล้วเกิดกรดก๊าซหรือไม่ ถ้าไม่มีแสดงว่าน้ำนั้นไม่มีโคลิฟอร์มแต่ถ้ามีก๊าซขึ้น สันนิษฐานว่ามีโคลิฟอร์ม ซึ่งแสดงการประเมินเป็นผลบวก

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

3) การตรวจสอบขั้นสมบูรณ์ (Completed test) เป็นการทดสอบขั้นสุดท้ายเพื่อสรุปให้แน่ใจว่าจุลินทรีย์ที่ตรวจพบในขั้นต้นข้างต้นเป็นจุลินทรีย์โคลิฟอร์ม โดยนำจุลินทรีย์จากขั้นต้นยืนยันมาทำการเลี้ยงในอาหารเหลวที่มี lactose อีกครั้งเพื่อดูการเกิดกรดและก๊าซอีกครั้งในอาหารและเขียนเชื้อมาลากบนอาหารวุ้นเอียงใน 24 ชั่วโมง และโคโลนีจากอาหารวุ้นเอียงมาช้อมสีแกรม ถ้าได้ผลแกรมลบ รูปท่อน ไม่มีสปอร์ และอาหารเลี้ยงเชื้อ lactose มีก๊าซเกิดขึ้น แสดงว่ามีโคลิฟอร์มในน้ำตัวอย่างแน่นอน (สุรลักษณ์, 2540)

การช้อมสีแกรมคือ การช้อมสีแบคทีเรียสำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียด้วยกล้องจุลทรรศน์เนื่องจาก เซลล์แบคทีเรียมีคุณสมบัติเป็น semitransparent ซึ่งแสงสามารถผ่านได้ ทำให้เห็นเซลล์ของแบคทีเรียได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการช้อมสีแบคทีเรียเพื่อทำให้เห็นโครงสร้างและขนาดของแบคทีเรียได้ชัดเจนยิ่งขึ้น หลักการของการช้อมสีแบบมากกว่าหนึ่งชนิด

(Differential staining) คือการทำให้สีย้อมติดส่วนต่างๆ ของเซลล์อย่างเช่น การย้อมสีแบบแกรม (Gram staining) กลไกของการติดสีแกรมของแบคทีเรียจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์ ในแบคทีเรียแกรมลบจะมีสารพวกไขมันที่ผนังเซลล์มากกว่าของแบคทีเรียแกรมบวก และยังมีชั้นของผนังเซลล์บางกว่าด้วย ในกระบวนการย้อมสี เมื่อล้างด้วยแอลกอฮอล์จะไปละลายไขมันทำให้รูของผนังเซลล์เปิดกว้าง จึงทำให้สารโมเลกุลใหญ่ของสีคริสตัลไวโอเลต-ไอโอดีนคอมเพล็กซ์หลุดออกมา เมื่อย้อมสีซาฟรานินจึงติดสีแดงของซาฟรานิน แต่ในแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งมีไขมันน้อยกว่า และมีความซับซ้อนขององค์ประกอบที่ผนังเซลล์น้อยกว่า เมื่อล้างด้วยแอลกอฮอล์เซลล์จะเหี่ยว เพราะเกิดการสูญเสียเยื่อหุ้มเซลล์มีรูขนาดเล็กลง สารประกอบโมเลกุลใหญ่ของสีจึงละลายออกมาไม่ได้ เซลล์ยังคงติดสีม่วงของคริสตัลไวโอเลต เมื่อย้อมทับด้วยซาฟรานินจึงย้อมไม่ติดสีแดง (สุวณี, 2536)

2.4.4 การตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มโดยวิธีเยื่อกรอง (Membrane-filter technique)

วิธีเยื่อกรองเป็นวิธีมาตรฐานอีกวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำทางชีววิทยา และวิธีนี้สามารถใช้ได้และตรวจนับแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (*total coliform bacteria*) และฟีคัลโคลิฟอร์ม (*fecal coliform bacteria*) ได้โดยตรง ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้ทดสอบกับน้ำปริมาณมากได้ ใช้กับอาหารเลี้ยงเชื้อได้หลายชนิด เพื่อแยกความแตกต่างหรือคัดเลือกเฉพาะให้จุลินทรีย์บางชนิดเจริญ อีกทั้งยังที่ให้ผลแน่นอนและรวดเร็วกว่าวิธี MPN การตรวจสอบโดยวิธีเยื่อกรองนี้จะอาศัยหลักการกรองโดยใช้เยื่อกรองหรือเมมเบรน ที่เมมเบรนที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตท (*cellulose nitrate*) ที่มีรูขนาดเล็กมากที่สุด (pore size 0.45 ไมครอน) แบคทีเรียที่มีขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าขนาดรูของเมมเบรนจึงลอดผ่านไม่ได้ ติดค้างอยู่บนเมมเบรน โดยใช้ชุดเครื่องกรองที่สเตอไรซ์แล้ว เมื่อกรองน้ำผ่านแบคทีเรียจะติดอยู่บนเยื่อกรอง แล้วจึงคีบเยื่อกรองไปวางบนแผ่นกระดาษที่อ้อมตัวไปด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสม เช่น M-Endo medium, M-FC medium หรือวางบนอาหารวุ้นในงานเพาะเชื้อ บ่มเชื้อไว้ และสังเกตลักษณะของโคโลนีที่เกิดขึ้นบนเยื่อกรอง (นงลักษณ์, 2541)

2.4.4.1 การตรวจนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (*total coliform bacteria*) ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองจะขึ้นอยู่กับจำนวนแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำ ถ้าคิดว่าน้ำที่นำมาตรวจมีจำนวนแบคทีเรียมากจะใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำน้อย ควรพิจารณาให้ได้ปริมาณน้ำให้ได้ 20 มิลลิลิตร จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียทั้งหมดที่ตรวจพบบนเยื่อกรองควรอยู่ในช่วง 50-200 โคโลนีต่อเยื่อกรอง โดยใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างโดยคาดคะเนตามตาราง 2.6 ลักษณะของโคโลนีที่เจริญบนเยื่อกรอง (อาหารเลี้ยงเชื้อ M- Endo medium) หลังจากบ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีลักษณะเป็นสีชมพูจนถึงแดงเข้ม

ตารางที่ 2.6 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด

ชนิดของน้ำตัวอย่าง	ปริมาตรที่ใช้กรอง (มิลลิลิตร)							
	100	50	10	10	0.1	0.01	0.001	0.0001
น้ำดื่ม	√							
น้ำจากสระว่ายน้ำ	√							
น้ำจากทะเลสาบ	√	√	√					
น้ำประปา			√	√	√			
น้ำในแม่น้ำ				√	√	√	√	
น้ำทิ้งที่ผ่านการเติมคลอรีน				√	√	√		
น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน					√	√	√	√

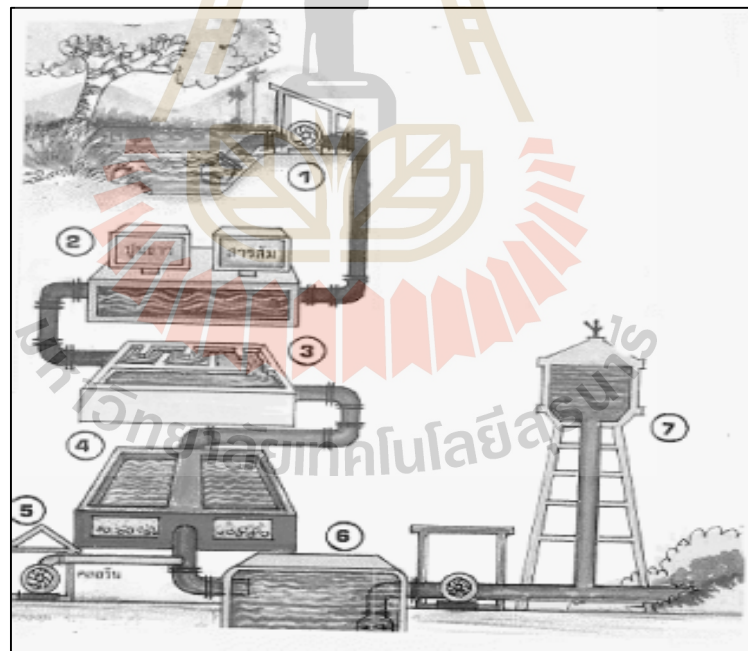
2.4.4.2 การตรวจนับจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์ม (*fecal coliforms*) ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองขึ้นกับจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำเช่นกัน จำนวนโคโลนีของฟีคัลโคลิฟอร์มที่ตรวจพบบนเยื่อกรองควรมีค่าอยู่ในช่วง 20-80 โคโลนีต่อเยื่อกรอง โดยให้ใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำโดยคาดคะเนตามตารางที่ 2.7 ลักษณะของโคโลนีที่เจริญบนเยื่อกรอง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

ตารางที่ 2.7 ปริมาตรโดยประมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรองเพื่อตรวจหาฟีคัลโคลิฟอร์ม

ชนิดของน้ำตัวอย่าง	ปริมาตรที่ใช้กรอง (มิลลิลิตร)							
	100	50	10	1	0.1	0.01	0.001	
น้ำดื่ม	√							
น้ำจากสระว่ายน้ำ	√	√						
น้ำจากทะเลสาบ		√	√	√				
น้ำประปา				√	√	√		
น้ำในแม่น้ำ				√	√	√	√	
น้ำทิ้งที่ผ่านการเติมคลอรีน			√	√	√			
น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน					√	√	√	

2.5 หน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ

หน่วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือการผลิตน้ำประปานั้นเป็นการนำน้ำดิบซึ่งได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ซึ่งโดยส่วนใหญ่เรามักใช้ประโยชน์จากน้ำผิวดิน เนื่องจากง่ายต่อการปรับปรุงคุณภาพและมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงกว่า มาทำให้สะอาด ปราศจากโรคภัยแก่ผู้บริโภค โดยจะต้องแยกหรือกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำให้ ออกไปให้เหลือน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดเอาไว้ ซึ่งการผลิตน้ำประปามีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ 1) เพื่อผลิตน้ำสะอาดสำหรับใช้ในการอุปโภคบริโภคได้อย่างปลอดภัย 2) น้ำประปาที่ได้ต้องมีลักษณะน่าใช้ มีคุณสมบัติทางกายภาพเคมี ชีวภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 3) การออกแบบระบบการผลิตต้องให้ได้กรรมวิธีที่และหยัดที่สุดในการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งการผลิตน้ำประปาจากจากน้ำผิวดินนั้นอาจมีความสกปรกของน้ำที่ไหลผ่าน น้ำผิวดินมักมีความขุ่น สี สารอินทรีย์สูง และอาจมีสารพิษเช่น ฝุ่น ยาฆ่าแมลง จากบริเวณที่ปนเปื้อน (ประพัฒน์, 2555) โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาขั้นพื้นฐานนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ/ระบบผลิตน้ำประปา (ชัยชาญ, 2547)

2.5.1 แหล่งน้ำ

แหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปา นั้นได้มาจาก แม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ หนอง บึง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.4 และน้ำนั้นจะต้องไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เกินกว่าที่กำหนดไว้ และปราศจากสิ่งโสโครกปะปน มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการตลอดปี ซึ่งเราจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำไว้ใกล้กับแหล่งน้ำในโรงสูบน้ำแรงต่ำ เพื่อสูบน้ำดิบไปผลิตเป็นน้ำประปา (ประพัฒน์, 2555)



รูปที่ 2.4 แหล่งน้ำผิวดินในการนำมาผลิตน้ำประปา (อ่างเก็บน้ำสุระ 1, 2 มทส.)

2.5.2 การตกตะกอนขั้นต้น

นิยมใช้ในกระบวนการขั้นต้นในการตกตะกอนที่สามารถตกได้เองหรือจำพวกตะกอนที่มีน้ำหนักสามารถจมตัวได้เอง โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆ เช่น การสร้างบ่อพักน้ำดิบ ก่อนเข้าสู่ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำ ถังน้ำสำรอง อ่างเก็บน้ำ นอกจากนั้นยังเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดระบบ เครื่องสูบน้ำ ใบบัด อีกด้วย (ประพัฒน์, 2555)

2.5.3 การสร้างตะกอน (Coagulation) และรวมตะกอน (Flocculation)

กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเป็นการเติมสารเคมี (Coagulant) ลงไปในน้ำ เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยต่างๆ เช่น อนุภาคความขุ่น หรือคอลลอยด์ ซึ่งโดยปกติอนุภาคเหล่านี้จะไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำ ให้สามารถรวมตัวและแยกออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น โดยจะมีการเติมสารเคมีเช่น สารส้ม PAC ลงในน้ำ ซึ่งสารเหล่านี้จะเป็นตัวทำให้อนุภาคความขุ่นสูญเสียเสถียรภาพและจับตัวกันเกิดเป็นเม็ดตะกอนขนาดเล็ก และรวมตัวกันจนเป็นตะกอนที่โตพอจะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายในถังตกตะกอน สำหรับการเติมสารเคมีลงไปมีจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ในขั้นตอนแรก หลังจากเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำแล้ว จะทำการกวนอย่างรวดเร็วภายในถังกวนเร็ว ซึ่งในระบบประปาได้แก่ ส่วนที่เป็น ไฮดรอลิกจัมป์ (Hydraulic jump) เพื่อให้สารเคมีที่เติมลงไปเกิดการผสมและแพร่กระจายไปทุกส่วนของน้ำ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการกวนช้า โดยให้น้ำ

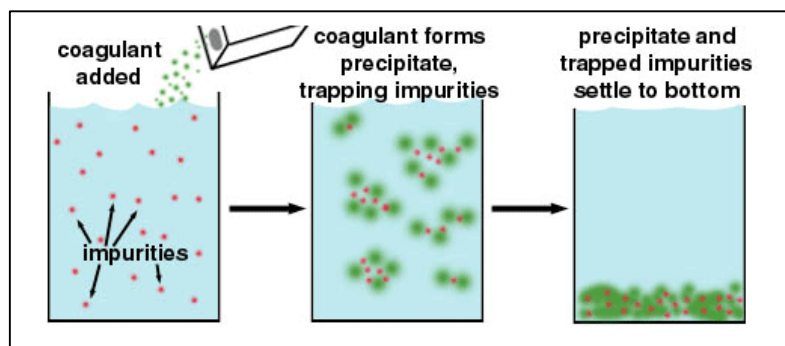
ไหลวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้อนุภาคความขุ่นหรือสารแขวนลอยมารวมตัวกัน มีน้ำหนักมากขึ้น จนในที่สุดสามารถแยกตัวและตกตะกอนในถังตกตะกอนได้ ในกรณีที่ใสสารส้ม ถ้าน้ำดิบมีสภาพเป็นกรดมาก จะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองสารส้มที่เติมลงไปเพื่อการตกตะกอน จึงต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำคือ ปูนขาว และปูนขาวนี้ นอกจากจะช่วยปรับสภาพของ กรด-ด่าง ในน้ำดิบแล้วยังไปทำปฏิกิริยาความกระด้างชั่วคราวในน้ำ และเปลี่ยนรูปความกระด้างจากสารละลายเป็นผลึกของแข็ง สามารถแยกตัวออกจากน้ำและตกตะกอนได้ (ประพัฒน์, 2555)



รูปที่ 2.5 ถังสารเคมีที่ใช้เติมให้กับระบบผลิตน้ำประปา (ระบบประปา มทส.)

2.5.4 การตกตะกอน (Sedimentation)

กระบวนการตกตะกอนสามารถทำได้โดยใช้ถังตกตะกอน โดยภายหลังจากน้ำดิบสัมผัสกับสารเคมีแล้ว ปล่อยให้ไหลวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้อนุภาคความขุ่นมาจับรวมตัวกัน มีน้ำหนักมากขึ้น จนสามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ โดยจะปล่อยให้มวลน้ำเหล่านี้ไหลเข้าสู่ถังตกตะกอน โดยคุณสมบัติของน้ำในถังตกตะกอนอยู่ในสภาวะไหลช้ามาก ๆ ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นพวกนี้ จะตกลงสู่ก้นถังตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก และน้ำใสตอนบนของถังตกตะกอนจะผ่านไปยังระบบกรอง (ประพัฒน์, 2555)

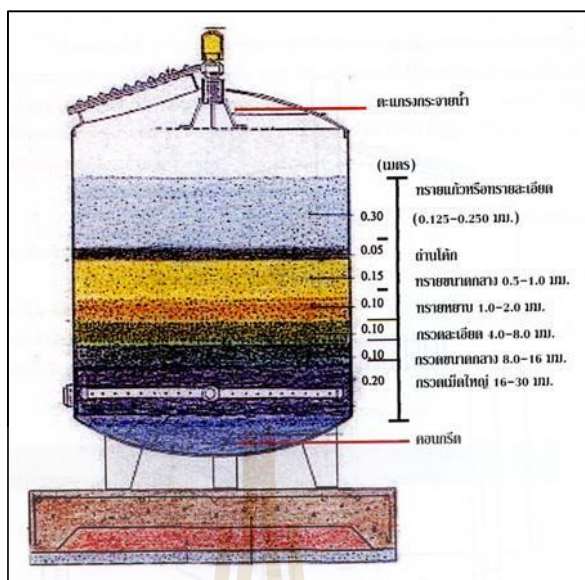


รูปที่ 2.6 การตกตะกอนของอนุภาคหลังจากการเติมสารรวมตะกอน

(ที่มา: <http://www.aesarabia.com/coagulation-flocculation-packages>)

2.5.5 การกรองน้ำ (Filtration)

กระบวนการกรองเป็นกระบวนการทางกายภาพที่จะทำให้น้ำสะอาดโดยการแยกเอาสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำออกไป ซึ่งหลักการของการกรองนั้นทำได้โดยเอาน้ำมาผ่านชั้นของวัสดุที่เป็นตัวกรอง ทำให้สิ่งสกปรกต่างๆ ในน้ำ ที่มีขนาดโตกว่าช่องระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกรอง ติดค้างอยู่บนหน้าผิวกรอง ทำหน้าที่ให้น้ำซึมผ่านตัวกรองมีคุณภาพดีขึ้น มวลน้ำที่ผ่านการตกตะกอนมาแล้ว จะไหลเข้ามายังถังกรองน้ำ เพื่อกรองเอาตะกอนที่ละเอียดออกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการกรองจะมีการกรองช้าและกรองเร็ว การกรองช้าจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่าการกรองเร็วโดยอาศัยชั้นตัวกลางในการได้กรอง ชั้นกรองหรือตัวกลางได้แก่ กรวด ทราย แอนทราไซต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น (ประพัฒน์, 2555) ดังแสดงตัวอย่างถังกรองสนิมเหล็กในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ถังกรองสนิมเหล็ก (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551)

2.5.6 การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection)

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคเป็นกระบวนการที่สำคัญมากในการผลิตน้ำประปาเพราะแม้ว่ากระบวนการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถกำจัดตะกอน สิ่งสกปรกหรือ ความขุ่นก็ตาม แต่การจะทำให้น้ำประปาที่ผลิตได้มีความสะอาด ปลอดภัย สามารถใช้อุปโภคบริโภคได้อย่างมั่นใจนั้น จำเป็นจะต้องกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ให้หมดเพราะถ้ามีเชื้อจุลินทรีย์เพียงเล็กน้อย ก็อาจทำให้เกิดการแบ่งตัวเพิ่มขึ้นอย่างมากภายในเวลาอันรวดเร็ว ดังนั้นกระบวนการฆ่าเชื้อโรคจึงมีความสำคัญในกระบวนการผลิตน้ำประปาอย่างยิ่ง มวลน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองแล้วเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการใส่สารคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค ช่วยกำจัดกลิ่น สี และยังมีสารคลอรีนในน้ำให้มีปริมาณตกค้างในตามเส้นท่อ เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนเข้ามาภายหลัง (ประพัฒน์, 2555) ซึ่งในการฆ่าเชื้อโรค คลอรีนที่ใช้ส่วนมากนอกจากจะอยู่ในรูปของสารละลาย ของแข็ง แล้วยังอยู่ในรูปแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสารเคมีที่ใช้นอกจากคลอรีน ได้แก่ โอโซน UV เป็นต้น ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.8 การเติมคลอรีนแก๊สในการฆ่าเชื้อโรค

(ที่มา: <http://www.prapathai.com>)

2.5.7 ถังน้ำใส

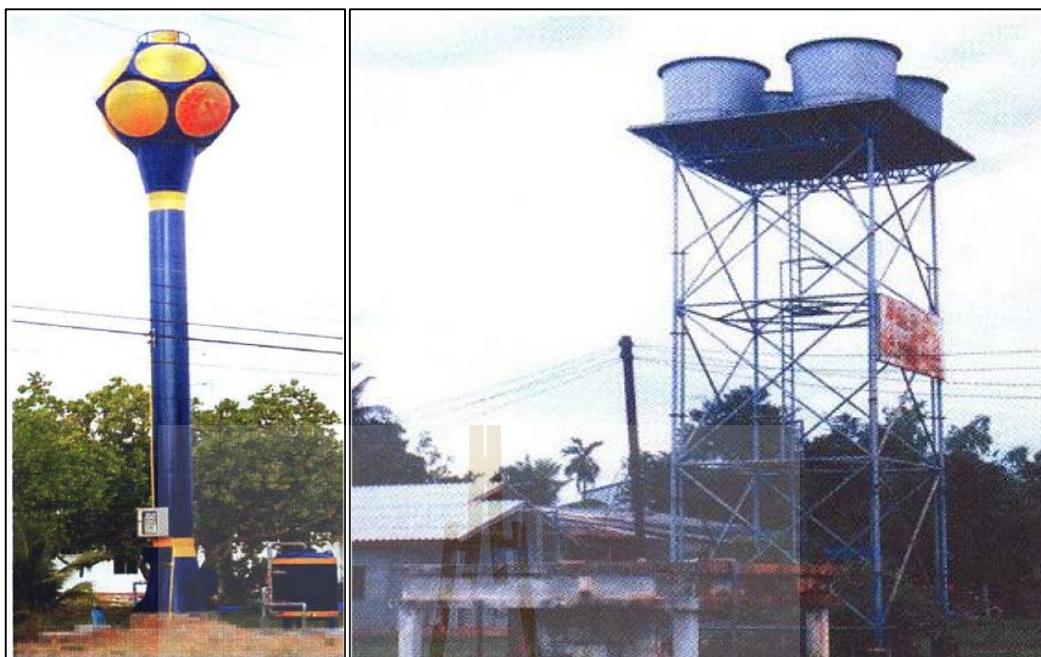
เป็นถังสำหรับเก็บน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองแล้ว ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.9 เรียกว่า น้ำประปาเพื่อรอจ่ายให้ผู้บริโภคได้ใช้น้ำสะอาด ซึ่งเป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคและให้มีปริมาณคลอรีนคงเหลือให้ตกค้างในเส้นท่อ (ประพัฒน์, 2555)



รูปที่ 2.9 ถังน้ำใส (ระบบประปา มทส.)

2.5.8 หอถังสูง

เป็นหอถังสูงที่เก็บน้ำที่สูบขึ้นมาจากถังน้ำใส (ดังแสดงในรูปที่ 2.10) เพื่อทำให้เกิดแรงดันน้ำในการจ่ายให้บริการไปตามเส้นท่อถึงบ้านประชาชน โดยอาศัยหลักการการจ่ายน้ำจากแรงดันที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก คือทำการสูบน้ำที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสร็จแล้วขึ้นไปเก็บไว้บนถังสูง แล้วทำการจ่ายน้ำไปตามเส้นท่อให้ไหลตามแรงโน้มถ่วง (ประพัฒน์, 2555)

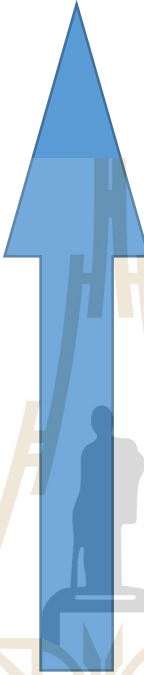


รูปที่ 2.10 หอถังสูง (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551)

2.6 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 นิยมใช้สำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา โดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเป็นกระบวนการสุดท้ายในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ซึ่งการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้นเป็นการทำลายจุลินทรีย์ทั้งที่ก่อให้เกิดโรคและประเภทไม่ก่อให้เกิดโรค ซึ่งจริงๆแล้วในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน การตกตะกอน การกรอง ได้มีส่วนช่วยในการกำจัดจุลินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 90 (อุคร, 2537) อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์แต่ละประเภทมีความต้านทานต่อกระบวนการฆ่าเชื้อแตกต่างกันดังแสดงในตาราง 2.8 สำหรับวิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมีหลายวิธีเช่น การให้ความร้อน การใช้คลอรีน การใช้โอโซน แสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

ตารางที่ 2.8 ระดับความต้านทานของจุลชีพต่อสารฆ่าเชื้อโรค

จุลชีพ	ระดับความต้านทาน	ตัวอย่างเชื้อโรค
Prions	 <p>สูง</p>	<i>Scrapie, Creutzfeld-jakob disease</i>
Bacterial spores		<i>Bacillus, geobacillus, clostridium</i>
Protozoal oocysts		<i>Cryptosporidium</i>
Helminth eggs		<i>Ascaris, enterobius</i>
Mycobacteria		<i>Mycobacterium tuberculosis</i>
Small, Nonenveloped viruses		<i>Poliovirus, parvovirus</i>
Protozal cysts		<i>Giardia, acanthamoeba</i>
Fungal Spores		<i>Aspergillus, penicillium</i>
Gram-negative bacteria		<i>Pseudomonas, escherichia</i>
Vegetative fungi and algae		<i>Trichophyton, candida</i>
Vegetative helminthes and protozoa		<i>AScaris, Crytosporidium, giardia</i>
Lange, Nonenveloped viruses		<i>Adenoviruses, totaviruses</i>
Gram-positive bacteria		<i>Staphylococcus, streptococcus</i>
Enveloped virusus		<i>HIV, hepatitis B virus</i>
	ต่ำ	

ที่มา: (Mcdonnell G., 2009)

2.6.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการให้ความร้อน

การทำให้น้ำร้อนหรือต้มให้เดือดเป็นวิธีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคตั้งแต่โบราณกาล สะดวก และปลอดภัยเพียงพอต่อการบริโภค โดยอุณหภูมิของน้ำที่ใช้อย่างน้อยคือ 65 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อโรค ระดับการฆ่าเชื้อโรคแบ่งออกเป็น

2.6.1.1 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) โดยใช้ความร้อนต่ำ (71.7 องศาเซลเซียส) นาน 15 นาที ในการฆ่าเชื้อโรคทั้งแบคทีเรียและไวรัสที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำ โดยวิธีการนี้จะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก

2.6.1.2 การต้ม (Boiling) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากแต่มีข้อจำกัดคือ จะสามารถทำลายได้เฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ที่ปะปนมากับน้ำเท่านั้น แต่จะไม่สามารถทำให้คุณสมบัติทางด้านกายภาพและด้านเคมีของน้ำเปลี่ยนไป ดังนั้นน้ำที่นำมาต้มจะต้องมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม หรือได้มาตรฐานเพียงแต่ต้องการความร้อนมาทำลายคุณสมบัติทางด้านชีวภาพที่ไม่ดี สำหรับการต้มน้ำเพื่อทำลายเชื้อโรคจะต้องใช้ความร้อนสูงจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และปล่อยให้ น้ำเดือดต่อไปอีก 15 นาที จะสามารถทำลายเชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำตลอดจนสปอร์ของเชื้อต่าง ๆ ได้หมด วิธีนี้จะเหมาะกับการผลิตน้ำอืดลม ผลิตนม ไม่เหมาะกับการนำน้ำเสียมาผ่านความร้อน

2.6.1.3 การทำให้ไร้เชื้อ (Sterilization) เป็นการทำลายสิ่งมีชีวิตทุกชนิดโดยการใช้ น้ำอุณหภูมิสูงหรือภายใต้ความดัน เช่นการใช้ไอน้ำ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1.2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 15-20 นาที (พิชิต, 2525)

2.6.1.4 การกลั่น (Distillation) เป็นวิธีที่สามารถฆ่าเชื้อโรคและสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีได้ เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณไม่มาก และมีความเป็นพิษมาก แต่วิธีนี้ต้องลงทุนสูงมากกว่าวิธีอื่น ดังนั้นการกลั่นจึงนิยมใช้อยู่ในวงจำกัด เช่น วงการแพทย์ หรือ งานเฉพาะกิจบางอย่างเท่านั้น (เกรียงศักดิ์, 2547)

2.6.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยการใช้แสง

2.6.2.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีนี้เป็นพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ ประกอบด้วยสเปกตรัม 3 แถบกว้างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นวิธีการฆ่าเชื้อโรคทางกายภาพวิธีหนึ่ง โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำพบว่าไม่ก่อให้เกิดสารพลอยได้ที่เป็นพิษ และสารก่อมะเร็ง ไม่ทำให้เกิดคราบ และกลิ่น (เชษฐพันธ์, 2538) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้หลอดคาโทดไอปรอท ความดันต่ำและใช้ความยาวคลื่น 200 ถึง 310 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของ UV-C แต่ความยาวคลื่นที่ดีที่สุดสำหรับการฆ่าเชื้อโรคคือ 253.7 นาโนเมตร สำหรับปฏิกิริยาของแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีผลต่อเซลล์ของจุลินทรีย์โดยตรง พลังงานของแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทะลุทะลวงผ่านชั้นนอกของเซลล์เมมเบรนและทะลวงผ่านเข้าไปตัวเซลล์ โดยจะเข้าไปทำลายกรดนิวคลีอิกตรงส่วนโครงสร้างใน DNA และ RNA ซึ่งเป็นส่วนประกอบในสารพันธุกรรมที่ใช้ในการขยายพันธุ์ การเข้าทำลายเชื้อจุลินทรีย์ของแสงอัลตราไวโอเล็ตจะกระทำต่อโมเลกุลของ Pyrimidine โดยเฉพาะ Cytosine Thymine Uracil ทำให้โมเลกุลของ Pyrimidine สร้างพันธะต่อกัน ทำให้การ

แบ่งตัวของกรดนิวคลีอิกยากขึ้น และทำลายเกลียวไม่ให้เกิดการแบ่งตัว ซึ่งทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และตายในที่สุด (McGuigan *et al.*, 2006) โดย สุจิตรา, (2553) ได้รายงานการประมาณรังสีอัลตราไวโอเลตซี ที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้ประสิทธิภาพ 1 log (90%) และ 2 log (99%) ดังตารางที่ 2.9 อย่างไรก็ตามข้อควรระวังสำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำคือน้ำที่ใช้ในกระบวนการนี้จะต้องมีความขุ่นน้อย เพราะถ้าหากมีความขุ่นมาก ความขุ่นจะไปบดบังแสงอัลตราไวโอเลตทำให้ประสิทธิภาพลดลงไปได้ และหากใช้ความยาวคลื่นที่ไม่เหมาะสมหรือปริมาณแสงที่ไม่เพียงพออาจเป็นการกระตุ้นให้เชื้อแบคทีเรียในน้ำเจริญเติบโตได้ อีกทั้งเมื่อเวลาใช้งานไปประมาณ 1 ปี ความเข้มแสงของหลอดไฟจะลดลง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำต้องมีการทำความสะอาดหลอดแก้วเป็นประจำ

2.6.2.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอาทิตย์ (solar disinfection) การใช้แสงอาทิตย์เหมาะสมสำหรับพื้นที่ห่างไกล หรือประเทศที่กำลังพัฒนา เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง อุณหภูมิ และจะแปรผกผันกับความลึกของน้ำ ปัจจัยที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ด้วยแสงแดดลดลง ได้แก่ พีเอชของน้ำ ความขุ่นที่มีอยู่ในน้ำ สภาวะภูมิอากาศ อุณหภูมิ นอกจากนี้จุลินทรีย์แต่ละชนิดที่อยู่ในน้ำจะถูกยับยั้งในช่วงเวลาที่ไม่เท่ากัน (Boyle *et al.*, 2008, Lonnen *et al.*, 2005) ดังแสดงในตารางที่ 2.10

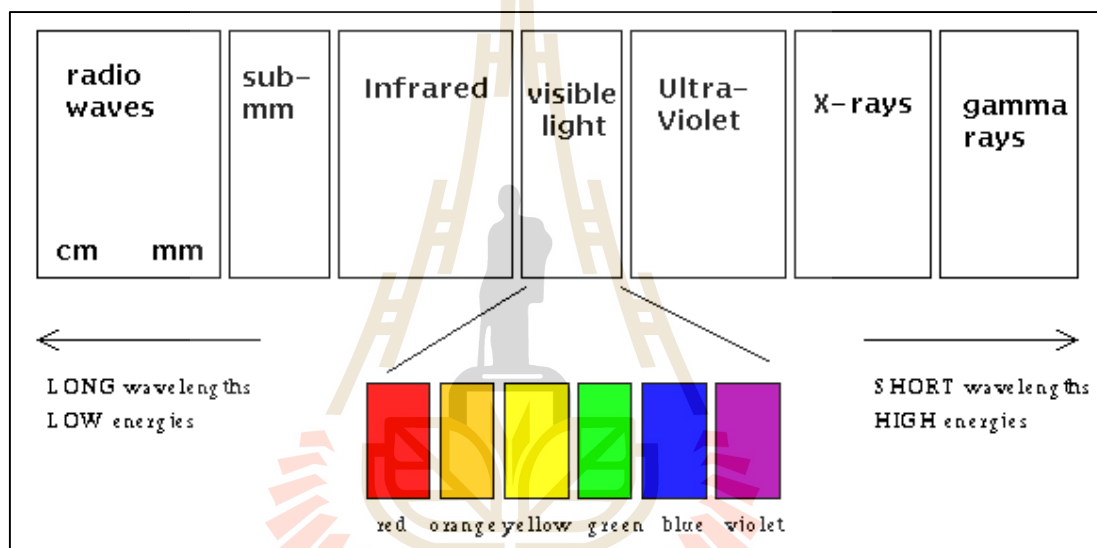
ตารางที่ 2.9 ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตซี ที่กำจัดจุลินทรีย์ได้ ประสิทธิภาพ 1 log และ 2 log ในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Microorganism	log reduction		Microorganism	log reduction	
	1	2		1	2
BACTERIA			<i>Fecal coliforms</i>	3.4	6.8
<i>Bacillus anthracis</i>	4.5	8.7	<i>Salmonella enteritidis</i>	4	7.6
<i>Bacillus subtilis</i>	7.1	11	<i>Salmonella typhi</i>	2.1	-
<i>Clostridium tetani</i>	12	22	<i>Shigella dysenteriae</i>	2.2	4.2
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	3.4	6.5	<i>Shigella flexneri</i>	1.7	3.4
<i>Escherichia coli</i>	5	6.6	<i>Shigella sonnei</i>	3	5
<i>Klebsiella terrigena</i>	2.6	-	<i>Staphylococcus aureus</i>	4	-
<i>Legionella pneumophila</i>	0.9	2.8	<i>Streptococcus faecalis</i>	4.4	-
<i>Sarcina lutea</i>	20	26.4	<i>Streptococcus pyogenes</i>	2.2	-

ที่มา: (สุจิตรา, 2553)

ตารางที่ 2.10 ช่วงเวลาการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

ชนิดของแบคทีเรีย	ช่วงเวลาในการยับยั้ง (ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร)	ที่มา
<i>Escherichia coil</i>	2.5 ชั่วโมง	Boyle <i>et al.</i> , 2008
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	2 ชั่วโมง	Lonnen <i>et al.</i> , 2005
<i>Yersinia enterocolitica</i>	3 ชั่วโมง	Lonnen <i>et al.</i> , 2005
	5 ชั่วโมง	Boyle <i>et al.</i> , 2008

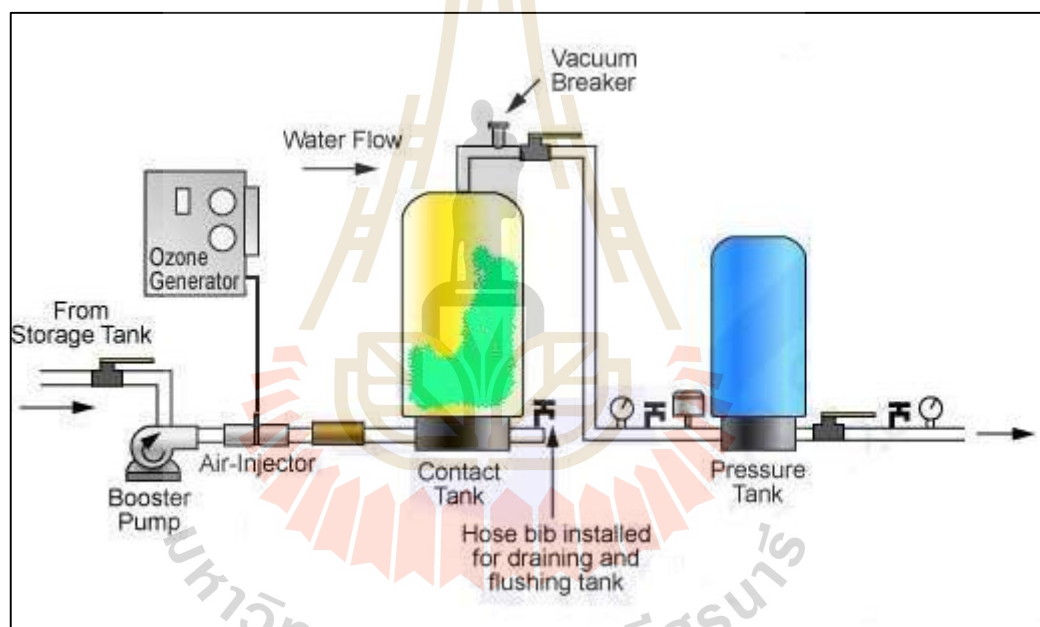


รูปที่ 2.11 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ที่มา: <http://loke.as.arizona.edu>)

2.6.3 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยการใช้ออโซน

ออโซนเป็นก๊าซธรรมชาติที่เกิดขึ้นในอากาศ มีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือเป็นตัวออกซิแดนท์ที่ดี (มีค่าออกซิเดชั่นสูงถึง 2.07 Volts) มีสภาพเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ จึงมีการนำมาใช้เป็นตัวยับยั้งและทำลายเชื้อโรค แบคทีเรีย ไวรัส ที่ปนเปื้อนมากับน้ำ โดยออโซนความเข้มข้น 0.05 – 0.45 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร สามารถทำลายเชื้อโรคได้ทุกชนิด การผลิตออโซนโดยทั่วไปจะใช้หลักการของ Electric Discharge คือการที่สนามไฟฟ้าแรงสูงทำให้โมเลกุลออกซิเจน (O_2) แตกออกเป็นออกซิเจนอะตอม (O) แล้วรวมกับออกซิเจนโมเลกุลอื่นๆกลายเป็นออโซน (O_3) ระบบการผลิตออโซนทำโดยใช้อากาศแห้ง หรือออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง (15-20 กิโลโวลต์) ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจน แล้วรวมตัวเป็นออโซน

ผังรูปที่ 2.12 แสดงรูปเครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยปกติ น้ำ 1000 ลูกบาศก์เมตร ต้องการ โอโซนประมาณ 1-6 กิโลกรัมเพื่อฆ่าเชื้อโรคอากาศแห่ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือ 1.4% โดยปริมาตร จะเห็นว่าการผลิตโอโซนมีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก มีราคาแพง อีกทั้งโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่คงตัว สลายตัวได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องนำเครื่องผลิตโอโซนติดตั้งไว้ที่โรงผลิตน้ำ และยังคงมีการออกแบบอุปกรณ์การเติมโอโซนให้กับน้ำอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดการสูญเสียโอโซนน้อยที่สุด อีกทั้งยังพบว่าการใช้โอโซนในการทำปฏิกิริยานั้น จะได้ผลพลอยได้เป็นสารปนเปื้อนกลุ่มของออการ์โนฮาโลเจน เช่น ไตรฮาโลมีเทน สารปนเปื้อนเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ส่งผลให้ความนิยมในการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อในระบบบำบัดนั้นลดลง (เกรียงศักดิ์, 2547)



รูปที่ 2.12 เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

(ที่มา: <http://www.oocities.org/ultrazone92/residentialti.htm>)

2.6.4 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination)

คลอรีน (Chlorine) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคลอรีนสามารถทำลายเชื้อโรคได้มากกว่า 99% ซึ่งนอกจากคลอรีนจะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้และยังให้ผลในระยะยาวอีกด้วย โดยคลอรีนที่เติมลงไปจะละลายน้ำอยู่ในรูปของคลอรีนอิสระทำหน้าที่ฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนมาในภายหลัง (กองสุขาภิบาลอาหารและสิ่งแวดล้อม, 2549)

2.6.4.1 ชนิดของสารคลอรีน สารคลอรีนที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 3 ชนิดดังนี้

(1) ชนิดคลอรีนก๊าซ (Cl₂)

นิยมใช้กันมากในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ มีสีเหลืองแกมเขียว มีความหนาแน่นประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ และเมื่อเป็นของเหลว (คลอรีนเหลว 99%) จะมีสีเหลืองอำพัน มีความหนาแน่นเป็น 1.44 เท่าของน้ำซึ่งเป็นอันตรายต่อปอดและเนื้อเยื่อต่าง ๆ โดยจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจ เชื้อบวม และผิวหนัง ซึ่งผลกระทบที่เป็นอันตรายจากการสัมผัสกับก๊าซคลอรีน คือที่ความเข้มข้นประมาณ 5 พีพีเอ็ม ขึ้นไป และที่ความเข้มข้น 5-10 พีพีเอ็ม จะทำให้การหายใจติดขัด น้ำตาไหล ระคายเคืองผิวหนัง ระคายเคืองปอด และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เช่น หากได้รับก๊าซคลอรีนในปริมาณ 1,000 พีพีเอ็ม จะทำให้เสียชีวิตได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ความระมัดระวัง และต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้งและควบคุมการทำงานเสมอ

(2) ชนิดแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calcium hypochlorite)

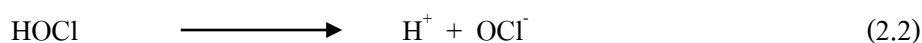
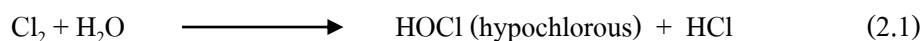
นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก เป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้ดี มีสูตรทางเคมี คือ Ca(OCl)₂ ให้มีความเข้มข้นระหว่าง 60-70% โดยน้ำหนัก คลอรีนผงชนิดนี้หาได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์เลี้ยงอย่างรุนแรง สะดวกต่อการใช้งาน และสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพได้ง่าย

(3) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite)

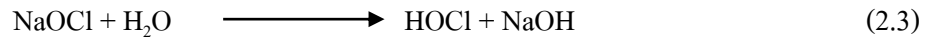
นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก เป็นสารละลายสีเหลืองอมเขียวมีสูตรทางเคมี คือ NaOCl ความเข้มข้นประมาณ 16% โดยน้ำหนัก มีความเสถียรน้อยกว่าแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ทำให้เสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว จึงควรเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิไม่สูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพื่อชะลออัตราการเสื่อมคุณภาพ อายุในการเก็บไม่ควรเกิน 60-90 วัน สำหรับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เมื่ออยู่ในสภาวะ pH ต่ำ จะระเหยเป็นหมอกคลอรีนสามารถเกิดการระเบิดได้

2.6.4.2 ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ

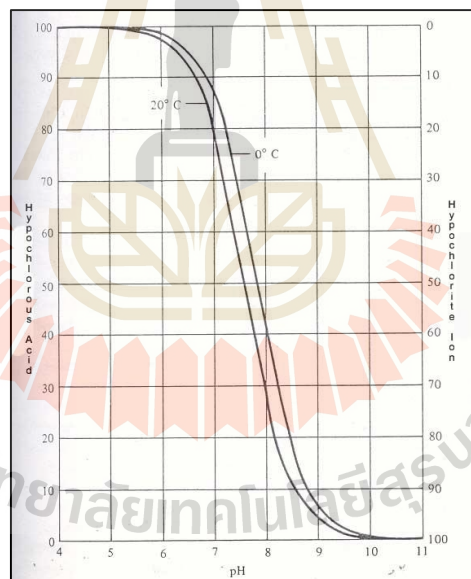
คลอรีนที่อยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน (Cl₂) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส และ กรดไฮโปคลอไรต์ ดังสมการ 2.1 และกรดไฮโปคลอรัสแตกตัวในน้ำจะให้ไฮโดรเจนไอออน และไฮโปคลอไรต์ดังสมการ 2.2



เมื่อใช้สารแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ หรือ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ แทนก๊าซคลอรีนก็จะได้ สาร HOCl และต่างดั่งสมการ 2.3 และ 2.4



คลอรีน กรดไฮโปคลอรัส และไฮโปคลอไรด์ เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (free residual chlorine) ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันขึ้นอยู่กับสภาพพีเอชของน้ำ ที่พีเอชของน้ำต่ำกว่า 1 คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีนทั้งหมดและจะระเหยสู่บรรยากาศ ส่วนที่พีเอช 1 ถึง 3.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ทั้งในรูปของก๊าซและกรดไฮโปคลอรัส ขณะที่พีเอชในช่วง 3.5 ถึง 5.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปกรดไฮโปคลอรัสทั้งหมดที่พีเอชในช่วง 5.5 ถึง 9 จะอยู่ทั้งในรูปของกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปคลอไรด์ และที่พีเอชตั้งแต่ 9 ถึง 7 ขึ้นไป คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปไฮโปคลอไรด์ (เกรียงศักดิ์, 2557) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สัดส่วนของ HOCl และ OCl⁻ ในน้ำที่พีเอชต่าง ๆ (เกรียงศักดิ์, 2557)

คลอรีนอิสระในรูปของกรดไฮโปคลอรัสมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่า คลอรีนในรูปไฮโปคลอไรด์ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงควรจะมีคลอรีนในรูปของกรดไฮโปคลอรัสเหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งค่าแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่พีเอชของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU (เกรียงศักดิ์, 2557)

2.6.4.3 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังนี้

(1) ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (Free chlorine residual)

ปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำสามารถวัดได้หลังจากช่วงระยะเวลาสัมผัส ซึ่งการเติมคลอรีนที่น้อยเกินไป จะไม่ทำให้เกิดคลอรีนอิสระขึ้นและอาจจะทำลายเชื้อโรคในน้ำได้ไม่ทั้งหมด แต่การเติมคลอรีนในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้น้ำมีกลิ่นฉุนของคลอรีน และทำให้รสชาติของน้ำเสียไปด้วย ทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองคลอรีนโดยใช่เหตุ นอกจากนี้ คลอรีนยังมีฤทธิ์กัดกร่อน อาจทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เสียหายได้ ดังนั้น ในการเติมคลอรีนจึงต้องเติมในปริมาณที่พอเหมาะ คือ สามารถฆ่าเชื้อโรคได้หมด รวมทั้งก่อให้เกิดคลอรีนอิสระที่แนะนำ คือระหว่าง 0.2-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.2-0.5 พีพีเอ็ม) ณ เวลาสัมผัส 30 นาที กล่าวคือ ภายหลังจากที่ทำการเติมสารละลายคลอรีน ไปแล้ว 30 นาที ต้องสามารถวัดปริมาณคลอรีนอิสระได้ระหว่าง 0.2-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อโรค (contact time)

ถ้าเวลาสัมผัสนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดีขึ้น

(3) อุณหภูมิ (Temperature)

มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำคือ กรณีที่อุณหภูมิของน้ำต่ำ คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัสมากซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง 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 เนื่องจากคลอรีนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยาก่อนก่อนเสมอ นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้เกิดสารจำพวก THMs (Trihalomethane) ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำด้วยวิธีการเติมคลอรีน จะมีความต้องการปริมาณความเข้มข้นของคลอรีน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไปตามชนิดของจุลินทรีย์ (เกรียงศักดิ์, 2557) ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคชนิดต่าง ๆ

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

ที่มา: (กองสุขาภิบาลอาหารและสิ่งแวดล้อม, 2549)

2.6.4.4 สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-product, DBPs)

การใช้สารคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคทำให้เกิดสารพิษได้ ซึ่งเกิดจากการใช้ปฏิกิริยาของสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคกับสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่วัตถุประสงค์หลักในการทำงานเรียกว่า “สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค” ซึ่งในน้ำเมื่อมีสารอินทรีย์ละลายน้ำเช่น ฮิวมิกในน้ำผิวดินที่ได้จากการเน่าเปื่อยของพืชผัก ใบไม้ธรรมชาติ จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นพิษได้ คือ สารไตรฮาโลมีเทน และ กรดฮาโลอะซิติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (ประพัฒน์, 2555) โดยมีหลายหน่วยงานที่ศึกษาความเป็นพิษและพบว่าเกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง ซึ่งองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา องค์การอนามัยโลก และสหภาพยุโรปได้มีข้อเสนอแนะหรือเกณฑ์มาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ข้อเสนอแนะหรือเกณฑ์มาตรฐานกำหนดค่าสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค

ค่าสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
US EPA Regulation	DBP MCL (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Total THMs	0.080
Haloacetic acids	0.060
Bromate	0.010
World Health Organization Guideline	DBP Guideline value (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Chloroform	200
Bromodichloromethane	60
Dibromochloromethane	100
Bromoform	100
Cyanogen chloride	70
Trichlorophenol	200
Formaldehyde	900
European Union Standard	Standard value (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Total THMs	100
Bromate	10

ที่มา (Richardson., 2003)

การเลือกวิธีในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้ ปริมาณ และความต้องการใช้ เช่น ถ้าระบบประปาในเขตเมือง จำเป็นต้องใช้สารฆ่าเชื้อโรคที่ค้างในเส้นท่อ หรือระบบแจกจ่ายน้ำ ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้สารคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในขณะเดียวกันในระบบ ทำให้น้ำประปาดื่มได้ต้องใช้ความสะอาดของเครื่องมือ การใช้แสงยูวีและการใช้โอโซนจะมีความเหมาะสมกว่าแต่ราคาจะสูงกว่าการใช้คลอรีน โดยความยากง่ายในการเลือกใช้วิธีการฆ่าเชื้อโรคในระบบประปาจะสรุปได้ดังตาราง 2.13

ตารางที่ 2.13 ระดับความยากง่ายในการเลือกใช้วิธีฆ่าเชื้อโรคในระบบประปา

หัวข้อในการพิจารณา	การเติมคลอรีน	การใช้โอโซน	การใช้แสงยูวี	การใช้ความร้อน
ความเหมาะสมของเครื่องมือ	ดี	ดี	ดี	ต่ำ
ความซับซ้อนของเทคโนโลยี	ง่าย	ซับซ้อน	กลาง	ง่าย
การคงค้างของสารในเส้นท่อ	มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การฆ่าเชื้อไวรัส	ไม่ได้	ได้	ได้	ได้
การฆ่าเชื้อแบคทีเรีย	ดี	ดี	ดี	ดี
การเกิดสารพลอยได้	มี	มี	ไม่มี	ไม่มี
การบำรุงรักษา	ต่ำ	สูง	สูง	ต่ำ

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า วิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะมีข้อจำกัดหลายด้านของแต่ละวิธี ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ลดข้อจำกัดในการใช้งานเหล่านั้นและลดผลกระทบต่อเกิดกับมนุษย์ เทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในจุดมุ่งหมายคือ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคือ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายเปลี่ยนแปลง กำจัดมลสารต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำได้

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจึงเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก และจุลชีพต่าง ๆ ในน้ำ ว่าเป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูง และได้ผลเป็นอย่างดีในการกำจัดสารมลพิษในน้ำ

2.7 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

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

- **แบบสถานะเดียว (Homogeneous)** สถานะของตัวโฟโตคะตะลิสต์กับสารที่จะนำมาทำปฏิกิริยานั้นอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ เป็นต้น
- **แบบต่างสถานะ (Heterogeneous)** สถานะของตัวโฟโตคะตะลิสต์กับสารที่จะนำมาทำปฏิกิริยาอยู่ต่างสถานะกัน เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2/UV เป็นต้น

2.7.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่ง ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

2.7.1.1 การเกาะหรือดูดซับ (Adsorption process) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของแข็งโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับของโมเลกุลบนผิวของสารในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก โดยที่การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว เมื่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารถูกดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างกัน สารถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากผิวตัวดูดซับได้

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

2.7.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดได้แก่

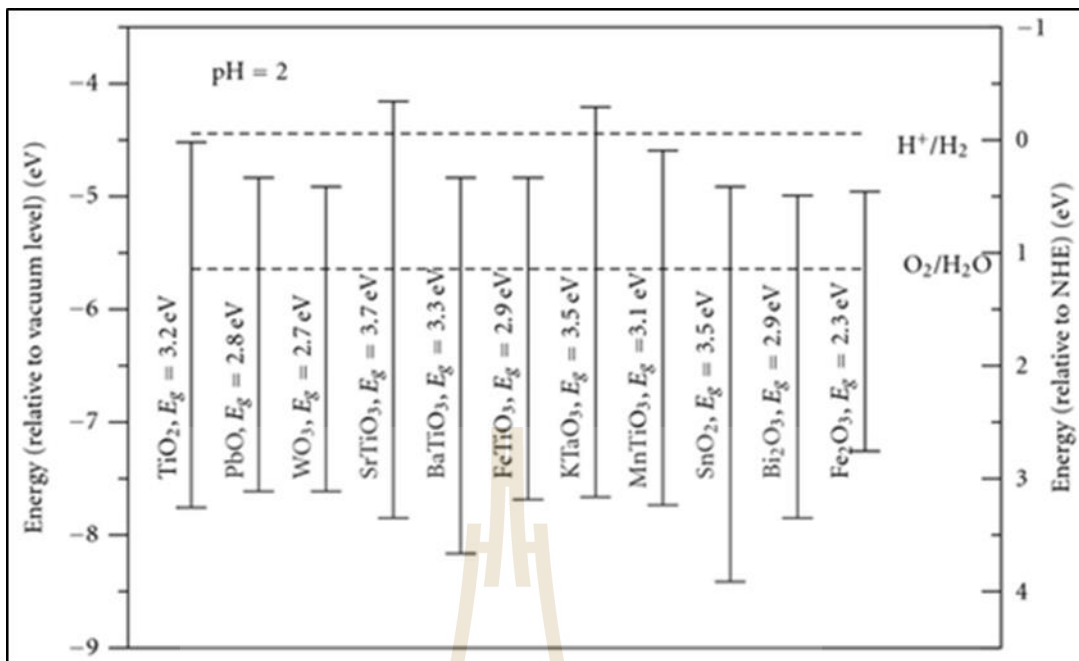
2.7.2.1 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น

2.7.2.2 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) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ โฮลนั้นมีค่าสูง จึงทำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะทรานซิชันนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ปฏิกิริยาชนิดโลหะกึ่งตัวนำได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย (Sahijpal *et al.*, 2000) โดยโลหะกึ่งตัวนำที่นำมาใช้มีหลายชนิด (Hoffman *et al.*, 1995) โดยจะมีค่าช่องว่างพลังงานที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ตำแหน่งช่องว่างพลังงาน และขนาดช่องว่างพลังงานของโลหะกึ่งตัวนำชนิดต่าง

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

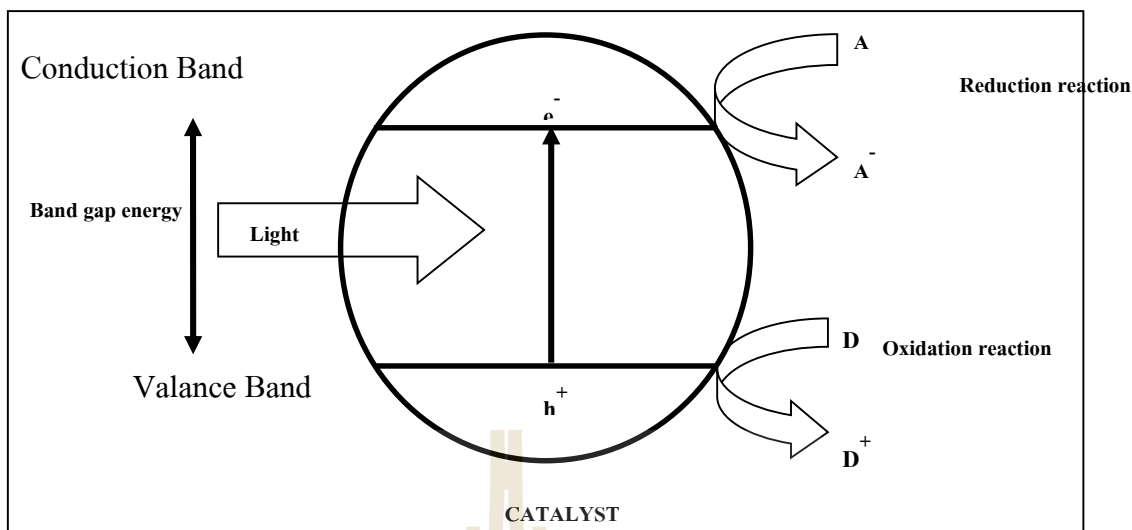
ที่มา: (Robertson., 1996)



รูปที่ 2.14 ค่าช่องว่างของพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ (Arslan, 2000)

2.7.3 โครงสร้างของวัสดุกึ่งตัวนำ (Structure of Semiconductor)

โครงสร้างของวัสดุกึ่งตัวนำที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอน โดยแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างที่เรียกว่า แบนด์แกป (Band gap) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานเพียงพอ หรือมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แกปของตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กตรอน (e⁻) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์จะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นคอนดักชันแบนด์จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h⁺) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์กลายเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอน (e⁻/h⁺) ในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.15 ในกรณีที่ไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นนี้ สามารถรวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีก เกิดเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Recombination แต่ในกรณีที่มีตัวให้หรือตัวรับอิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันต่อไป (พวงรัตน์, 2557)



รูปที่ 2.15 การเกิดอิเล็กตรอน (e^-) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (hole: h^+) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.7.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Mechanism of Photocatalysis Reaction)

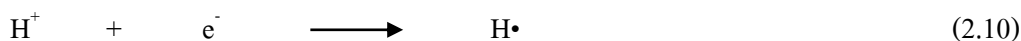
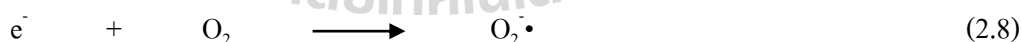
กลไกของกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.5 ถึงสมการที่ 2.11



- การกระตุ้น



- การเกิดแรดิคอลจาก e^- , h^+



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



เมื่อโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มากกว่าหรือเพียงพอที่จะทำให้ให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดที่ว่าง (h^+) ของ

อิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ขึ้น ดังสมการที่ 2.6 ซึ่ง h^+ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical: $OH\cdot$) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) ในคอนดักชันแบนด์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่อยู่รอบ ๆ ตัวเร่งปฏิกิริยา และเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical: $O_2\cdot^-$) ดังสมการที่ 2.8 และสามารถเกิดเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical: $OH_2\cdot$) ดังสมการที่ 2.9 กรณีที่ในระบบการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอน (h^+) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ (สมการที่ 2.5) จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทนและเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical: $H\cdot$) ตามสมการที่ 2.10 ซึ่งเรดิคัลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบ โดยเฉพาะไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$) ซึ่งเป็นสารออกซิเดนต์หลักในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก (รองจาก $F\cdot$ แต่สูงกว่า $Cl\cdot$) และสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำได้ทุกชนิด แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวรับหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนสามารถกลับมารวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้ เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า Recombination ตามสมการ 2.11 (พวงรัตน์, 2557)

2.7.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.7.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของสารที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่จะที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดของแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นได้

2.7.5.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษไว้บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษ ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Gupta *et al.*, 2005)

2.7.5.3 ค่าพีเอช ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการติดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไป ยกตัวอย่างเช่นไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออยู่ในน้ำ ประจุลบบนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้แตกต่างกันตามพีเอชของน้ำนั้น ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการเป็น Amphoteric ของกลุ่มไฮดรอกซิลที่พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประจุลัพท์ที่พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นบวก เมื่อมีค่าพีเอชของน้ำน้อยกว่า 6.2 และประจุลัพท์ที่พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นลบเมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่ามากกว่า 6.2 ผลของประจุที่

เปลี่ยนแปลงไปตามพีเอชของน้ำ จะส่งผลต่อการบำบัดและกำจัดมลสารมลพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์ ถ้าสารมลพิษนั้นถูกดูดติดผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มากจะทำให้ประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย (พวงรัตน์, 2557)

2.7.5.4 ความเข้มของแสง ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้น จำเป็นจะต้องมีพลังงานโฟตอนที่มากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาระบุไว้ว่าการเพิ่มความเข้มของแสงนั้นจะส่งผลให้ปริมาณของจำนวนโฟตอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูงขึ้นตามไปด้วย (Zhao *et al.*, 2003)

2.7.5.5 ถังปฏิกิริยา เป็นหนึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องควรคำนึงถึงความสามารถในส่งผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ต และปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นกับแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา วัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถังปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ แก้วควอทซ์ อะคลิลิก เป็นต้น (Thomas *et al.*, 2003)

2.7.5.6 อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย โดยทั่วไปกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20–80 องศาเซลเซียส

2.7.5.7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่จับกับอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล โดยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีเพิ่มขึ้นเพราะ โมเลกุลออกซิเจนจะรวมตัวอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์-ออกไซด์ออนแรคคัล และสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนรุนแรงอีกตัวหนึ่ง โดยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการย่อยสลายมลพิษ ได้มากขึ้นด้วย (Chen *et al.*, 2009)

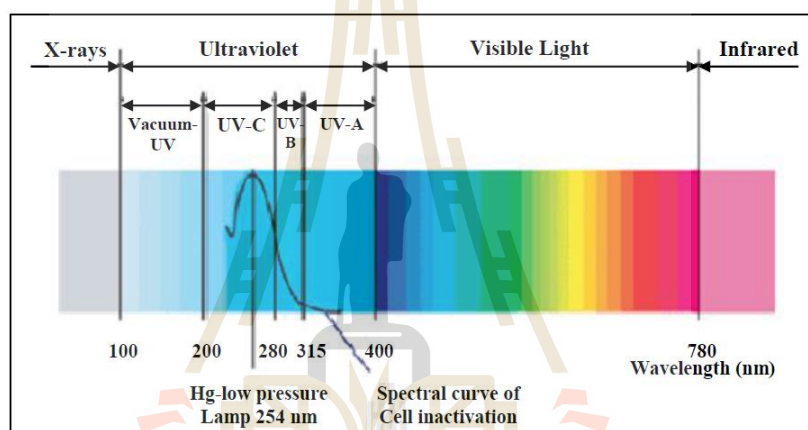
2.7.6 พลังงานแสงสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

จากหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า สิ่งที่เป็นสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคือแสงที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถจำแนกแสงตามช่วงความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV)

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

ที่มา: Venturini *et al.*, 2009



รูปที่ 2.16 ความยาวคลื่นของแสง (Venturini *et al.*, 2009)

ความเข้มแสง คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงาน คือ พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา โดยที่อนุภาคแสง 1 โฟตอน มีความถี่ (ν) และความยาวคลื่น (λ) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.12

$$\nu = c / \lambda \quad (2.12)$$

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

พลังงานของโฟตอน สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความยาวคลื่นของโฟตอน ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.13

$$\text{Photon energy (E)} = h\nu = hc/\lambda \quad (2.13)$$

เมื่อ h เท่ากับ 1.24 อิเล็กตรอนโวลต์นาโนเมตร

หลังจากทราบค่าแถบพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำ จะสามารถคำนวณหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่มามีค่า แถบพลังงานเท่ากับวัสดุกึ่งตัวนำนั้นได้ ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าแถบพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.14

$$\lambda = hc/E \quad (2.14)$$

แทนค่าสมการ

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

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

ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าค่าความยาวคลื่นแสงที่มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ของวัสดุกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์คือ 388 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต

2.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโลหะกึ่งตัวนำที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีช่วงของช่องว่างพลังงานที่กว้างเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะกึ่งตัวนำอื่น ๆ ยกเว้นโลหะกึ่งตัวนำชนิดที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ แต่เนื่องจากสังกะสีมีความเป็นพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย จึงไม่นิยมใช้อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโลหะกึ่งตัวนำที่มีเสถียรภาพที่สุด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ และสามารถรีดักชันออกซิเจนได้ ในด้านสิ่งแวดล้อมมีการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านการทำน้ำให้บริสุทธิ์ การบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคในน้ำ เป็นต้น (ฉัฐพันธุ์, 2556)

2.8.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียม

ไทเทเนียมเป็นโลหะในกลุ่มทรานซิชันจัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลก และอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ ได้แก่ แร่รูไทล์ (rutile) และ แร่อิลเมนไนต์ (ilmenite) แร่เหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเปลือกโลก พบมากในประเทศออสเตรเลีย มาเลเซีย ญี่ปุ่น แคนาดา ฟินแลนด์ แชมเบีย นอร์เวย์ โปตุเกส เซเนกัล ศรีลังกา อาร์เจนตินา อียิปต์ บราซิล คองโก สเปน แอฟริกาใต้ และรัสเซีย (sellers., 2009) สำหรับประเทศไทยพบแร่อิลเมนไนต์มากในแถบภาคใต้ ซึ่งเป็นแหล่งดิบบุกมาก่อน ได้แก่ จังหวัดภูเก็ต พังงา ระนอง กระบี่ สงขลา และยะลา แร่อิลเมนไนต์มีสูตรทางเคมีเป็น FeTiO_4 หรือ FeTiO_2 ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “กากแร่” ที่ได้หลังจากการแยกเอาดิบบุกออกมาแล้วนำไปทำการสกัดเพื่อให้ได้ไทเทเนียมที่บริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอมเท่ากับ 22 และมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 47.867 รัศมีอะตอมไทเทเนียมเท่ากับ 147 พิโคเมตร มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดคือ 166.7 องศาเซลเซียส และ 328.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ 4.50 กรัมต่อเซนติเมตร และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 42.0 ไมโครโอห์มเซนติเมตร สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ทางเคมีที่มักจะเกิดขึ้นมากที่สุดคือ 4+ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาส เกิดขึ้นมากที่สุดคือ โมเลกุลจำพวก ไดออกไซด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น 4- ดังนั้น โครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นส่วนใหญ่ (พวงรัตน์, 2557)

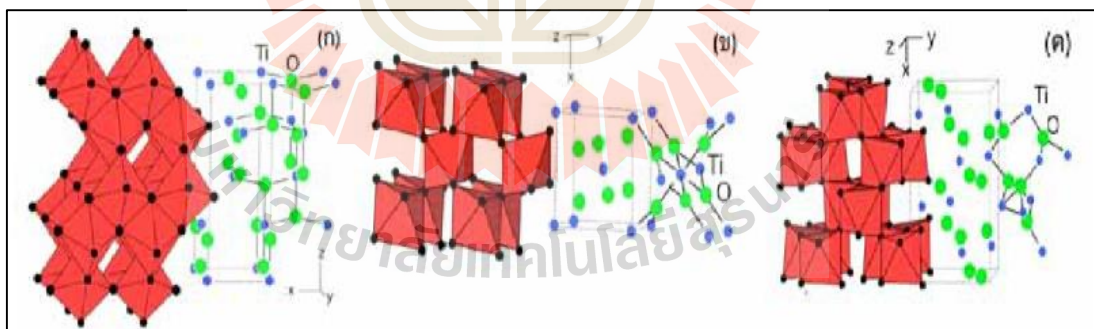
2.8.2 ลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งเป็นวัสดุนาโนโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ 3 รูปแบบ (Fujishima *et al.*, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ได้แก่

- รูไทล์ (Rutile) สามารถนำมาใช้ให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร เป็นต้น
- อนาเทส (Anatase) สามารถนำมาใช้ให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง
- บรูคไคท์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic)

สำหรับโครงสร้างผลึกที่นำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิส นั่นคือ โครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส และรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) และมีอะตอมของออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยที่มุมระหว่างแกนของออกตะฮีดรอล ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 องศา และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาเทสนั้นจะมีค่ามุมระหว่าง

แกนเท่ากับ 78.12 ดีกรี และ 92.43 ดีกรี จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละ โครงสร้างมีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์จะพบว่า มีพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐานสำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า 889.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสที่มีค่าเท่ากับ -884.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนั้น มีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าว จึงทำให้ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนั้นมีค่าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานเพียง 3.00 อิเล็กตรอนโวลต์ (Bessekhouad *et al.*, 2003) จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีสมบัติทางด้านความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และบรูคไคท์ ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ อิเล็กตรอน (e⁻) และ โฮล (h⁺) ได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น (บุรภัทร์, 2548)

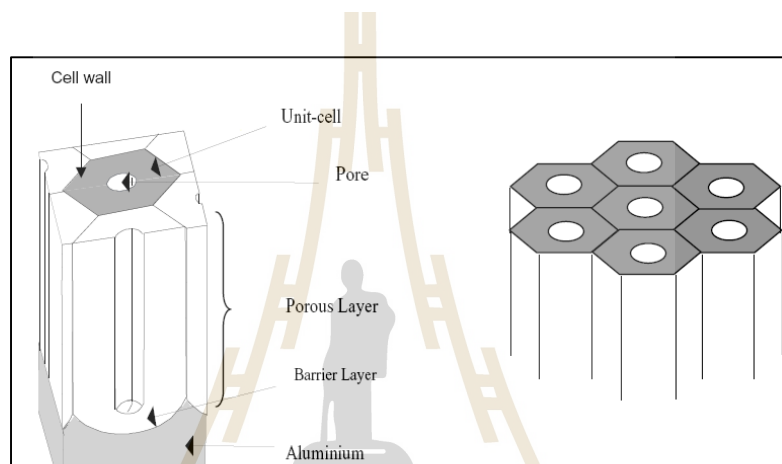


รูปที่ 2.17 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม (ก) แบบรูไทล์ (ข) อนาเทส และ (ค) บรูคไคท์ (Bessekhouad *et al.*, 2003)

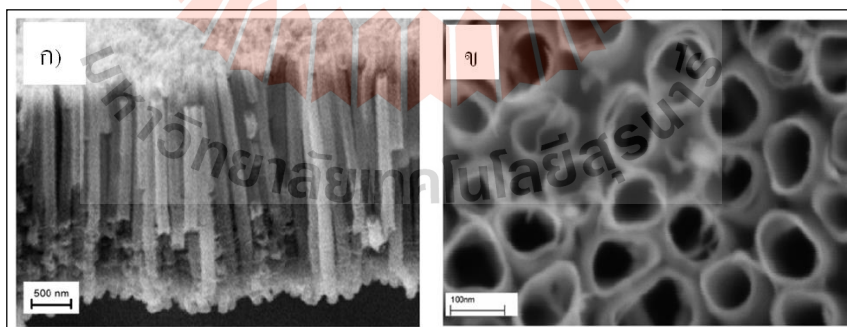
2.8.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization process)

กระบวนการแอโนไดซ์เซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะ โดยใช้การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ (Working Electrode) ที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายที่นำ

ไฟฟ้าได้ (Electrolyte) กระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick *et al.*, 1987) เริ่มแรกได้ทดลองใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูก (Substrate) ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนแรกคือ ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่า ชั้น Barrier ซึ่งชั้น Barrier มีความหนาประมาณ 0.1-2.0 % ของความหนาทึบทั้งหมดของชั้นออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และส่วนที่สอง ได้แก่ ชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะเห็นได้ว่าการก่อตัวเป็นท่อซึ่งมีผนังท่อ (Cell wall) ให้เห็นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เซลล์โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wernick *et al.*, 1987)

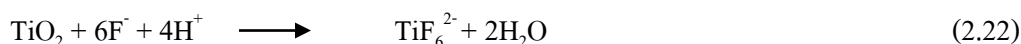
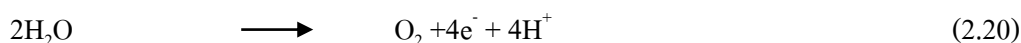
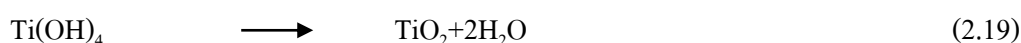


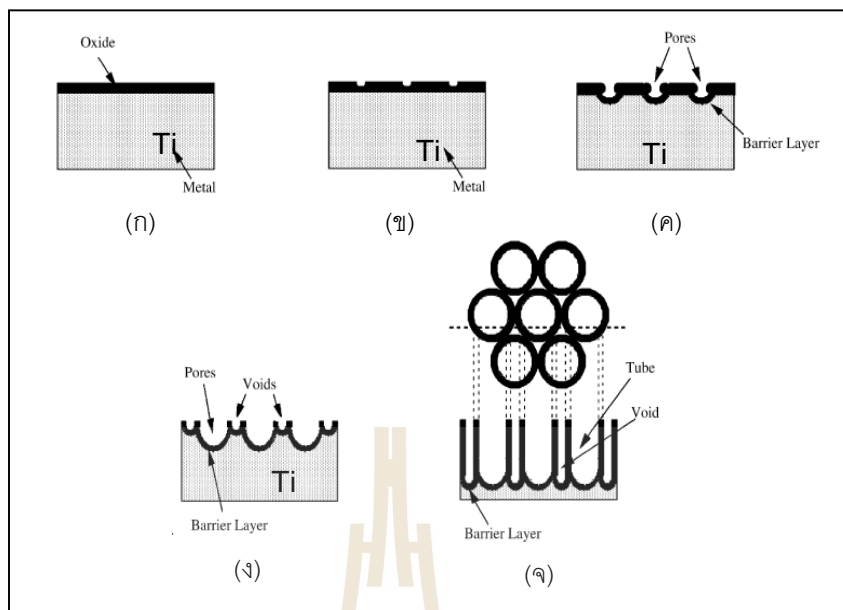
รูปที่ 2.19 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (ก) ภาพตัดขวางชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ลักษณะผิวหน้าออกไซด์ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (De Tacconi *et al.*, 2006)

Mor *et al.*, (2006) ได้เสนอว่าการก่อตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีรูพรุนนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันและเป็นพื้นฐานของการก่อตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน (TiO_2

nanotubes) กระบวนการแอโนไดซ์เซชันเริ่มโดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าร่วม โดยใช้แผ่นโลหะเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า คือ โลหะไทเทเนียม และใช้กราไฟท์ เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นโลหะ โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปแบบลักษณะแบบท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูป 2.19

กลไกในการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแสดงดังรูป 2.20 โดยบนผิวของกราไฟท์จะเกิดไฮโดรเจนขึ้น (Liao *et al.*, 2010) ดังสมการที่ 2.15 การก่อตัวของออกไซด์บนชั้นของผิวโลหะไทเทเนียมในช่วงแรกนั้นจะเกิดออกไซด์ขึ้นบนผิวโลหะก่อน เนื่องจากแรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนแผ่นไทเทเนียม โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำ (Mor *et al.*, 2006, Choi *et al.*, 2011, Liu *et al.*, 2010) ดังสมการ 2.16 ถึง 2.21 หลังจากนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเกิดขึ้นบนชั้นออกไซด์ เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลาย (สารละลายที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน (F^-)) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกัดกร่อนจะสลายตัวออกมารวมตัวกับฟลูออไรด์ไอออนในน้ำ (TiF_6^{2-}) ได้ดังสมการที่ 2.22 ถึง 2.24 ต่อมารูพรุนเหล่านี้จะเพิ่มความลึกขึ้นเรื่อย ๆ จนเป็นท่อที่มีขนาดนาโนเมตร โดยที่ท่อเหล่านี้จะเกิดขึ้นทั่วพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์





รูปที่ 2.20 การพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อขนาดนาโน (TiO_2 nanotubes) (Mor *et al.*, 2006)

(ก) การก่อตัวของชั้นออกไซด์ (ข) การเริ่มเกิดรูพรุนเล็กๆ บนชั้นออกไซด์

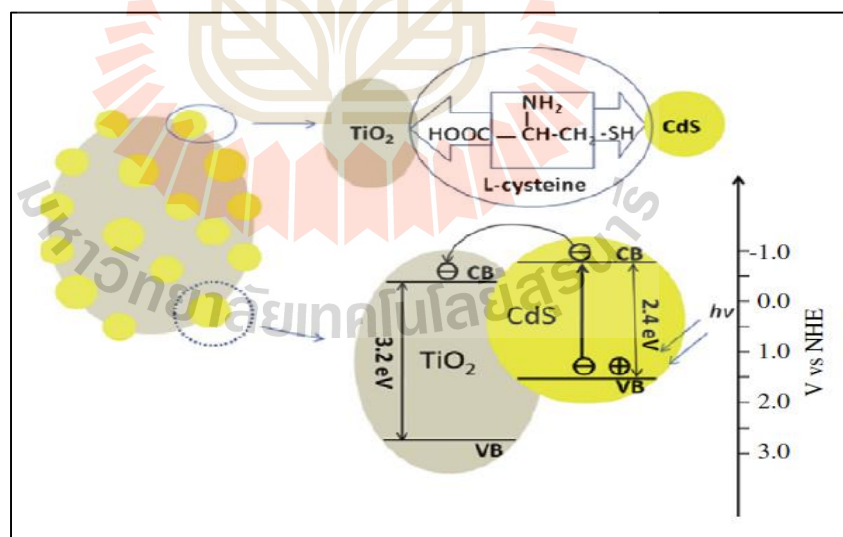
(ค) การเกิดชั้น Barrier (ง) การขยายขนาดของรูพรุนและเกิดเป็นผนังท่อ

(จ) การพัฒนาอย่างสมบูรณ์ของไทเทเนียมรูปท่อขนาดนาโน (TiO_2 nanotubes)

2.8.4 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ตอบสนองต่อแสงวิชิเบล

จากพื้นฐานของการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต้องใช้พลังงานจากแสงนั้น ค่าพลังงานระหว่างช่องว่างของคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ประมาณ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ และ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับโครงสร้างผลึกอนาเทส ซึ่งค่าพลังงานดังกล่าวนี้เป็นช่วงค่าพลังงานที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต (<400 นาโนเมตร) ทำให้ในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นจะต้องใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นแหล่งพลังงาน ในการพัฒนาลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์จึงต้องคำนึงถึงประเด็นการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาและประหยัดค่าใช้จ่าย ทั้งนี้เนื่องจากในแสงอาทิตย์มีรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นส่วนประกอบเพียงร้อยละ 5 เท่านั้น ในขณะที่แสงวิชิเบลมีร้อยละ 44 การที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงวิชิเบลได้จึงต้องมีการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์โดยลดช่องว่างระหว่างคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ให้อยู่ในช่วงค่าที่สามารถดูดกลืนแสงวิชิเบลได้ (400-700 นาโนเมตร) (พวงรัตน์, 2557)

การปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ตอบสนองต่อแสง visible มีวิธีการหลายวิธี เช่น การปะติดด้วยโลหะ (Metal Deposition) การเจือไอออน (Ion Doping) การเจือด้วยสี (Dye sensitization) และการสร้างวัสดุกึ่งตัวนำประกอบเป็น Composite TiO_2 เช่นการปะติดด้วยโลหะ โลหะมีค่าต่าง ๆ เช่น Ru, Rh, Pd, Ag, Pt and Au จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากมีระดับ Fermi ต่ำกว่าคอนดักชันแบนด์ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากการได้รับพลังงานแสงจะถูกกักไว้ที่โลหะมีค่าต่าง ๆ เหล่านี้ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ลดการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและที่ว่างเดิมของอิเล็กตรอน (recombination) ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้มีศักยภาพที่จะทำปฏิกิริยากับสารที่มีอยู่ในระบบได้อย่างเต็มที่ ส่วนวิธีการสร้างวัสดุกึ่งตัวนำประกอบเป็น Composite TiO_2 ก็จะมีวัตถุประสงค์คล้ายๆกันคือลดการเกิดการ recombination และเป็นการเพิ่มศูนย์กลางการทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้สารกึ่งตัวนำที่มีช่วงแถบพลังงาน (Band gap) กว้าง เช่น TiO_2 มาประกอบกับสารกึ่งตัวนำที่มีช่วงแถบพลังงานแคบ เช่น CdS (Gao *et al.*, 2012) ซึ่งแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุประกอบ TiO_2/CdS แสดงดังรูปที่ 2.21 ซึ่งวัสดุประกอบ TiO_2/CdS มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อช่วงแสง visible ที่ดีกว่า TiO_2 และมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูง อีกทั้งยังช่วยลดการเกิด recombination ด้วย



รูปที่ 2.21 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงในวัสดุประกอบ TiO_2/CdS (Gao *et al.*, 2012)

อย่างไรก็ตามในการปรับปรุงคุณสมบัติ ฌฐพล, (2554) ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธี photodeposition, impregnation, chelating-photodeposition พบว่าเมื่อเตรียมด้วยวิธี

photo deposition จะให้ผลค่าว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าวิธีอื่น ๆ เช่นเดียว Wang *et al.*, (2013) วิธีการ photo deposition จะให้ขนาดของผลึกที่เล็กส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่ง Zhong *et al.*, (2015) ใช้ Sb_2S_3 มาเป็นวัสดุประกอบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจาก Sb_2S_3 ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีเสถียรภาพสูง (Ail *et al.*, 2015,) และมีแบนด์แกปที่เหมาะสมกับแสงวิซิเบิลเท่ากับ 2.1 อิเล็กตรอน โวลต์ (Guilherme *et al.*, 2013) ซึ่งการใช้ Sb_2S_3 มาเป็นวัสดุประกอบกับ TiO_2 ยังมีการศึกษาไม่มากนัก แต่ในงานวิจัยของ Zhong *et al.*, (2015) ก็ได้แสดงให้เห็นว่า Sb_2S_3 จะช่วยให้ TiO_2 มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสงในช่วงแสง visible ได้มากขึ้น

2.8.5 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

ในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีด้วยกันอยู่หลายรูปแบบได้แก่

2.8.5.1 ผงไทเทเนียม การนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำ เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อด้อยหลายประการที่ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงมีขนาดอนุภาคในระดับนาโน เมื่ออยู่ในน้ำจะมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับคอลลอยด์ ในการนำมาใช้งานจึงเกิดการแขวนลอยในน้ำ ทำให้เกิดการบดบังแสงที่ส่องผ่านเข้ามา ส่งผลต่อการได้รับพลังงานและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้การทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีประสิทธิภาพไม่สูงเท่าที่ควร นอกจากนี้หลังจากปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนที่ต้องดำเนินการต่อเนื่องคือการแยกผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แม้ว่าผงไทเทเนียมนั้นจะมีพฤติกรรมที่รวมตัวกัน (aggregate) แต่อนุภาคก็ยังมีน้ำหนักเบากว่าที่จะจมตัวลงมาจากการแขวนลอยในลักษณะคอลลอยด์ จึงต้องใช้วิธีในการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำ เช่น การกรอง เป็นต้น

2.8.5.2 ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ จากปัญหาการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงในการบำบัดมลพิษ ทำให้มีการพัฒนาวิธีในการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้งาน โดยการเคลือบบนตัวกลาง เช่น แผ่นแก้ว แผ่นสแตนเลส และ แผ่นโลหะต่าง ๆ วิธีการเหล่านี้ได้รับการยอมรับว่ามีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส จากการพัฒนาของวิธีการนี้ ส่งผลให้การดำเนินการของระบบโฟโตคะตะไลซิสเป็นไปได้ง่าย โดยการนำตัวกลางใส่ลงไปในน้ำและฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตไปยังตัวกลางทำให้ปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเกิดขึ้น นอกจากนี้จะสะดวกในการดำเนินการแล้ว ยังลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายของกระบวนการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำหลังจากการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นอีกด้วย

2.8.5.3 ท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์ การสังเคราะห์ท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการพัฒนาวัสดุนาโนอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการขึ้นรูปท่อด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการ แอโนไดซ์เซชัน เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดเป็นท่อยาว ท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้โดยง่าย และยังคงมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ในการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอน ท่อนานไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีกว่าฟิล์มบางนาโนที่มีรูพรุนสูง รวมทั้งฟิล์มบางมีโอกาสที่อิเล็กตรอนโฮลสามารถเกิดการรวมตัวกันได้ง่าย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโชน 1.5 เท่า (พวงรัตน์, 2557)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาน

จากบททวนวรรณกรรมเกี่ยวกับกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน พบว่า ปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า สารละลายนำไฟฟ้า และระยะเวลา

ความต่างศักย์ไฟฟ้า สารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาในการสังเคราะห์ (Chen *et al.*, 2007) โดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชันอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำปฏิกิริยาให้เกิดออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำบนพื้นผิวโลหะ ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวไทเทเนียม 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)

สารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชันนั้นโดยส่วนมากจะมีฤทธิ์กัดกร่อน โดยพบว่า สารเคมีที่มีฟลูออไรด์ไอออน (F) ผสมอยู่จะทำให้เกิดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบท่อนาน ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) และแอมโมเนียม

ฟลูออไรด์ (NH_4F) เป็นต้น การใช้สารละลายที่มีฟลูออไรด์ไอออนเพียงอย่างเดียวจะทำให้ท่อที่เกิดขึ้นมีลักษณะการจัดเรียงของท่อไม่เป็นระเบียบมีการกระจุกตัวของท่อ การเกิดท่อซ้อนกัน และเกิดการสลายตัวของท่อในระยะเวลาการสังเคราะห์ไม่นาน (Chen *et al.*, 2007, Zhao *et al.*, 2005) จึงมีการใช้สารเคมีที่มีความหนืดสูงมาผสมลงไปในการสังเคราะห์ เช่น กลีเซอรอล และเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น เพื่อชะลอปฏิกิริยาของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความรุนแรงต่อการเกิดออกไซด์ ให้การก่อตัวของออกไซด์ช้าลง ทำให้ท่อเกิดขึ้นอย่างราบรื่น มีแนวสันท่อที่ชัดเจน พร้อมทั้งปรับปรุงพื้นผิวออกไซด์ให้ราบเรียบเป็นระเบียบ โดย ศรีบุญญา, (2555) ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ NH_4 0.30 โมลาร์โดยเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่าง กลีเซอรอล:น้ำ (60:40) และ โพลีเอทิลีนไกลคอล:น้ำ (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า สารละลายที่ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีลักษณะผิวหน้าเรียงตัวกันสม่ำเสมอ มีลักษณะท่อชัดเจน ไม่มีการเชื่อมติดกันของผนังท่อคือสารละลายที่ใช้ อัตราส่วน กลีเซอรอล:น้ำ (60 : 40)

ระยะเวลาในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีความสำคัญมากต่อลักษณะโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยเมื่อใช้เวลานานขึ้นก็จะทำให้ความหนาของออกไซด์เพิ่มขึ้น และโครงสร้างเป็นแบบท่อจะชัดเจนขึ้น (Premchand *et al.*, 2006, Sun *et al.*, 2011) โดยจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ 0.067 โมลาร์ NH_4F 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) และมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชันที่ระยะเวลาต่างกัน 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 ลักษณะท่อก็ยาวมากขึ้น (Kontos *et al.*, 2012)

2.9.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ปัจจุบันได้มีการนำเอากระบวนการโฟโตคะตะไลซิส มาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในน้ำเสียมากขึ้น ทั้งนี้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคของประเทศไทยจะใช้

การเติมคลอรีน ซึ่งเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำหรือน้ำเสียจะทำให้เกิดสารพลอยได้ (by-products) ที่อยู่ในรูปของไตรฮาโล-มีเทน และกรดฮาโลอะซิติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Freuze *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 สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเจือจางไปบนตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้แสงความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่าสามารถยับยั้งเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^6 CFU/ml ได้ 100% ในเวลา 1 ชั่วโมง และ Yanan *et al.*, (2016) ได้ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัททังสเทน (Bi_2WO_6) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ทำการฆ่าเชื้อ *E.coli* ความเข้มข้น 10^7 CFU/ml ใช้แสงซินอน 300 วัตต์ สามารถยับยั้งเชื้อได้ 100% ในเวลา 1 ชั่วโมง และ Danae *et al.*, (2014) ได้ใช้วิธีการตกตะกอนร่วม ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเจือโคบอลและแมงกานีส 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

การออกแบบการทดลองการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในน้ำหรือน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีหลากหลายกันไป โดย Deng *et al.*, (2007) ทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 10% และ ผ้าฝ้ายที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดเชื้อ *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 (TiO₂-multiwall nanotube) เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผง P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *Bacillus Cereus* 90% ในเวลา 198 นาที ขณะที่ TiO₂-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% เนื่องจากสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับเชื้อ *E. coli* ลดลง เพราะเรดิคอลส่วนหนึ่งไปทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำ

ตารางที่ 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

อ้างอิง	เชื้อแบคทีเรีย	TiO ₂		แสง		ระยะเวลา	ประสิทธิภาพ
		รูปแบบ	ความเข้มข้น	ชนิดแสง	ความเข้มแสง		
Bekbolet <i>et al.</i> , (1996)	<i>E.coli</i>	ผง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	5.6 mV/cm ²	30 นาที	90%
	<i>E.coli</i>	ผง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	5.6 mV/cm ²	60 นาที	97%
Ibanez <i>et al.</i> , (2003)	<i>E.coli</i>	ผง	10 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	5.5 mV/cm ²	40 นาที	99.999%
Lonnen <i>et al.</i> , (2005)	<i>Salmonella choleraesuis subsp</i>	ผง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	3 mV/cm ²	30 นาที	62%
	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	ผง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	3 mV/cm ²	31 นาที	80%
	<i>Salmonella choleraesuis</i>	ผง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	3 mV/cm ²	180 นาที	99%
	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	ผง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UV	3 mV/cm ²	180 นาที	99%
Yao <i>et al.</i> (2007)	<i>Enterobacter cloacae</i>	กระจก	-	UV	-	60 นาที	99.50%
	<i>Erwinia carotovora subsp.</i>	กระจก	-	UV	-	60 นาที	99.90%

ตารางที่ 2.16 (ต่อ) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

อ้างอิง	เชื้อแบคทีเรีย	TiO ₂		แสง		ระยะเวลา	ประสิทธิภาพ
		รูปแบบ	ความเข้มข้น	ชนิดแสง	ความเข้มแสง		
Yanan <i>et al.</i> , (2016)	<i>E.coli</i>	แผ่น	-	UV	-	60 นาที	100%
Deng <i>et al.</i> , (2007)	<i>E.coli</i>	สารละลาย	10%	UV	-	24 ชั่วโมง	96%
	<i>E.coli</i>	เคลือบบนผ้า	-	UV	-	24 ชั่วโมง	93%
	<i>B. subtilis</i>	สารละลาย	10%	UV	-	24 ชั่วโมง	91.60%
	<i>B. subtilis</i>	เคลือบบนผ้า	-	UV	-	24 ชั่วโมง	88.90%
Lee <i>et al.</i> , (2005)	<i>Bacillus Cereus</i>	ผง	-	UV	9.2 mV/cm ²	198 นาที	90%
	<i>Bacillus Cereus</i>	เคลือบบนท่อ นาโนคาร์บอน	-	UV	9.2 mV/cm ²	84 นาที	90%
Alrousan <i>et al.</i> , (2009)	<i>E.coli</i>	กระจก	-	UV	-	90 นาที	100%
Majeda <i>et al.</i> , (2015)	<i>E.coli</i>	แผ่น	-	UV	-	60 นาที	100%

บทที่ 3

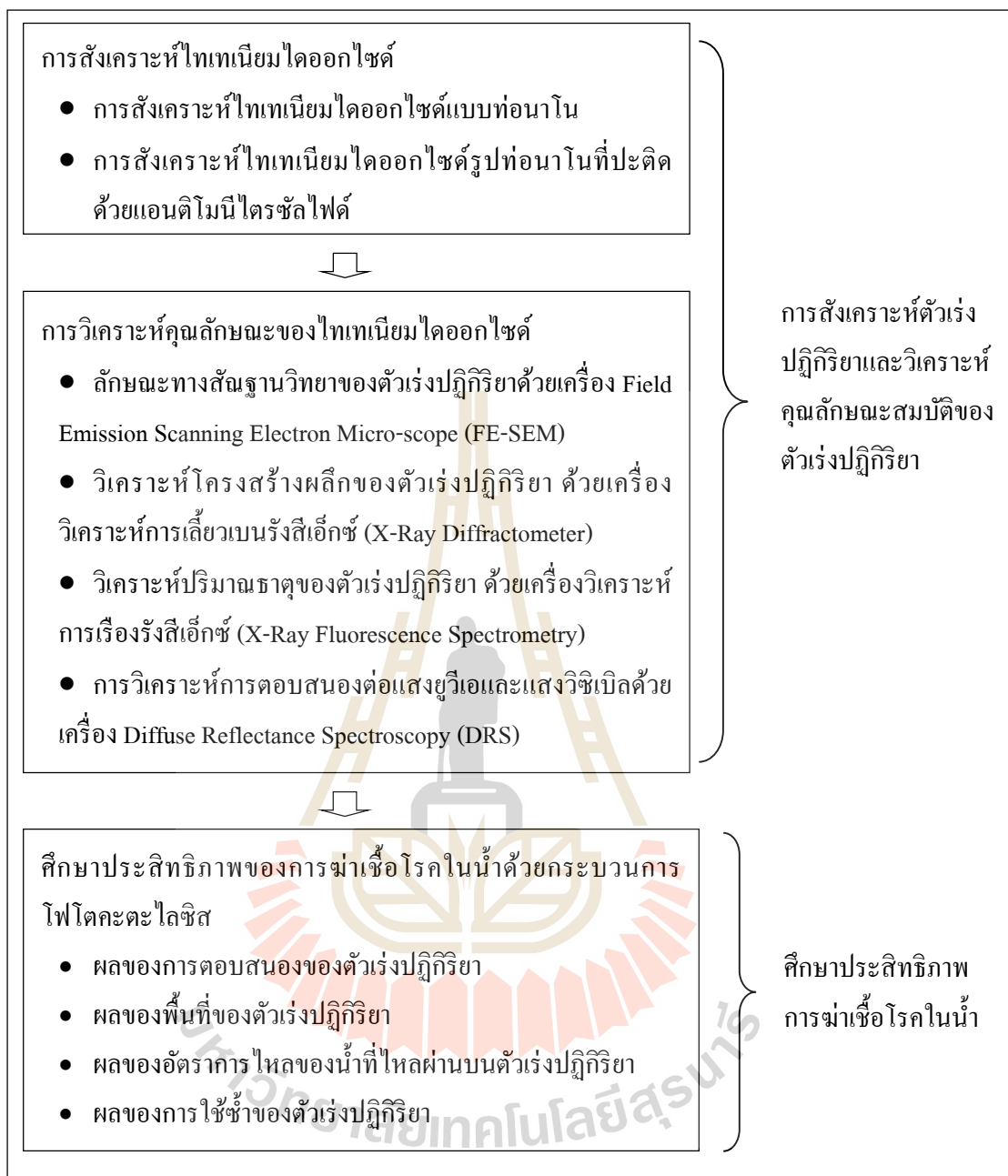
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อหาแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ซึ่งกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง ที่ได้รับความนิยมในงานหลายด้าน มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยา โดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารหรือเปลี่ยนความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลงจนถึงไม่มีความเป็นพิษเลย (พวงรัตน์., 2557) ในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นถึงการนำหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมาประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ เนื่องจากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยวิธีเดิมจะใช้กระบวนการเติมคลอรีนลงไป ในน้ำ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน หรือกรดฮาโลอะซิติก ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสารอินทรีย์ในน้ำ สารเหล่านี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ มีผลต่อความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอดบุตร การไหลเวียนของโลหิต และส่งผลต่ออวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกาย

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

3.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน สามารถทำได้โดยกระบวนการแอโนดไอซ์เซชัน เป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียม มีลักษณะเป็นท่อนานาโน (Nanotubes) กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของแผ่นไทเทเนียม เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrodechemical cell) ซึ่งประกอบด้วยสองขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นไทเทเนียม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

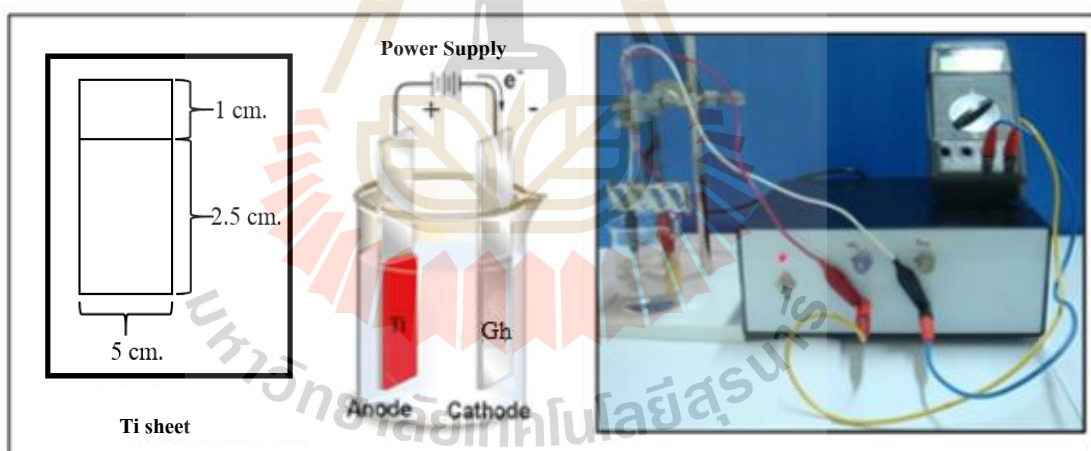
ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันนั้น จะใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยกรรไกรให้ได้ขนาดที่ต้องการคือ ต้องการไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 12.50 ตารางเซนติเมตร ตัดแผ่นไทเทเนียมให้มีขนาด 5 x 3.5 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 17.50 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่สำหรับเกิดออกไซด์ขนาด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

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

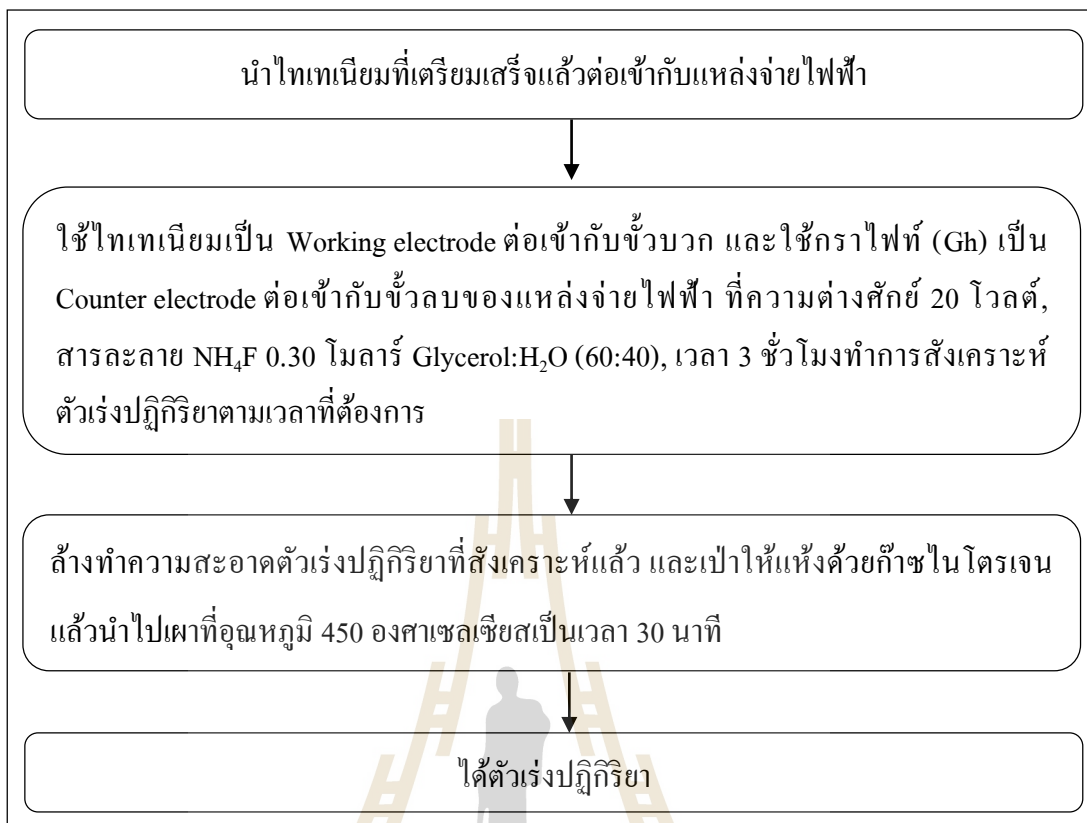


รูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

(2) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน มีลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โวลต์มิเตอร์ สายไฟ ไทเทเนียม (Ti) กราไฟท์ (Gh) สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารละลายนำไฟฟ้า คือ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นต้น ในการทดลองจะใช้แผ่นไทเทเนียมมาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และใช้กราฟท์เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol: H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากที่ตั้งเครื่องเสร็จ จะนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์อื่นบนพื้นผิวของไทเทเนียมหลังการสังเคราะห์ และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้คงคุณสมบัติของโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่มีลักษณะสัณฐานเป็นแบบอนาเทส (Anatase) (ศรีัญญา, 2555) แสดงวิธีสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนดังรูปที่ 3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ จะนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสต่อไป



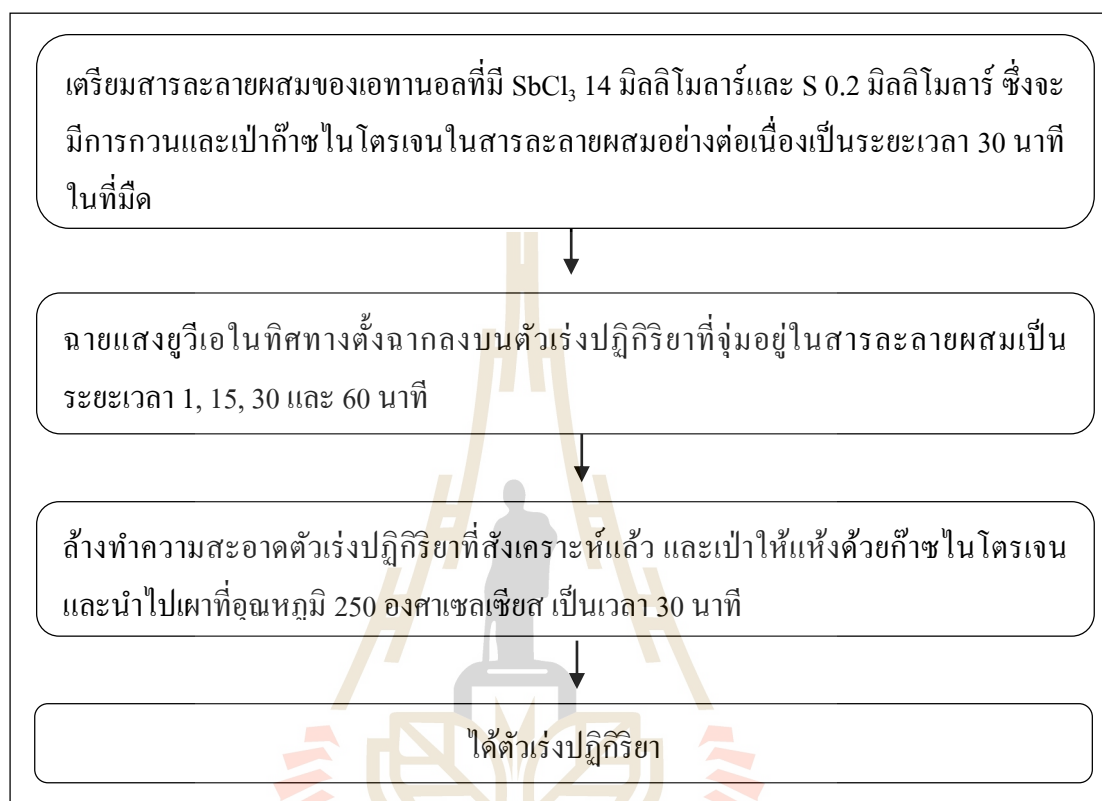
รูปที่ 3.3 ลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน



รูปที่ 3.4 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน

(3) ขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการตอบสนองต่อแสงวิซิเบิล (visible) เพิ่มมากขึ้น จะใช้การปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ (Sb_2S_3) กับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน โดยประยุกต์ตามวิธีของ Zhong *et al.*, (2015) มีขั้นตอนดังนี้ หลังจากได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ทำการสังเคราะห์ตามวิธีข้างต้นเรียบร้อยแล้ว จะนำไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน จุ่มลงในสารละลายผสมของเอทานอลที่มี SbCl_3 14 มิลลิโมลาร์และ SnCl_4 0.2 มิลลิโมลาร์ ซึ่งจะมีการกวนผสมและเป่าก๊าซไนโตรเจนในสารละลายผสมอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 นาทีในที่มืด จากนั้นทำการฉายแสงยูวีเอในทิศทางตั้งฉากลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยหลอดไฟฮาโลเจน (Philips floodlight 500W) และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์สำหรับการนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสต่อไป แสดงวิธีสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

หลังจากทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์แล้ว จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

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

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว (Morphology) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นโดย

เครื่องมือจะบันทึกอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้และแปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์แสดงเป็นภาพบนหน้าจอ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเป็น 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) ร่วมด้วยเพื่อหาองค์ประกอบของวัสดุชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่มีการตรวจวัด

3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นให้ไปกระทบกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่ถูกยิงออกไปยังมุมที่แตกต่างกัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการตรวจสอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้

3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

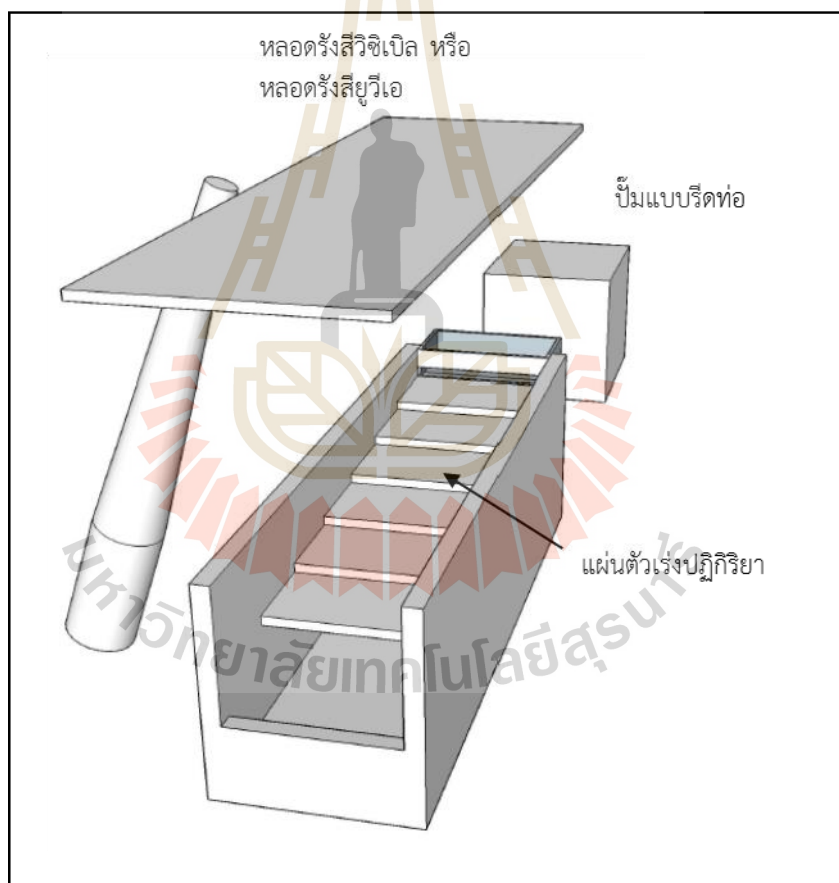
เครื่องมือ X-Ray Fluorescence Spectrometry สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เครื่องมือนี้ทำงานโดยใช้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิจากหลอดรังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนผิวตัวอย่าง เป็นผลทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกมาจากอะตอมในรูปแบบโฟโตอิเล็กตรอน ทำให้เกิดช่องว่างในวงอิเล็กตรอนชั้นใน 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 ถึงปฏิบัติการสำหรับใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโตะคะตะไลซิส

สำหรับการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะใช้ชุดการทดลองหรือถึงปฏิบัติการในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งถึงปฏิบัติการมีส่วนประกอบดังนี้ (1) ภายในตัวถึงปฏิบัติการภายในด้านล่างจะมีไว้ใส่น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (2) พื้นผิวด้านบนที่เป็นชั้นบันไดจะมีไว้เพื่อวางแผ่นชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยาซ้อนกันหลายแผ่น (3) น้ำตัวอย่างจะถูกดูดโดยปั๊มชนิดรีดท่อให้ไหลบนแผ่นชิ้นงานที่วางอยู่บนชั้นบันได (4) ด้านบนเป็นอุปกรณ์จำลองแสงวิชิเบลหรือแสงยูวีเอที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ถึงปฏิบัติการที่ใช้ในการทดสอบการฆ่าเชื้อโรค

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

- 1) ใช้หัวจ่ายเชื้อ เขี่ยเชื้อ *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 ปิเปิดผสมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ D.I. ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 4) นำไปสร้างกราฟระหว่างความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม
- 5) นำไปสร้างกราฟระหว่างจำนวนเชื้อแบคทีเรียกับความหนาแน่นของเซลล์ (Optical Density) เพื่อเลือกปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่จะทำการทดลอง

3.4.2 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย *E.coil*

- 1) เริ่มจากการใช้หัวจ่ายเชื้อ เขี่ยเชื้อ *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 ปิเปิดผสมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ D.I. ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ซึ่งจะเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบให้มีปริมาณตามที่ได้เลือกไว้ในหัวข้อ 3.4.1

3.4.3 การเตรียมน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus*

- 1) เริ่มจากการใช้ห้วงถ่ายเชื้อ เชื้อเชื้อ *Fecal Streptococcus* ที่เลี้ยงไว้ในบน nutrient agar ใส่งใน flask ที่มี อาหารเหลว (nutrient broth) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำเชื้อ *Fecal Streptococcus* ที่ได้ ปิเปิดผสมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ D.I. ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ซึ่งจะเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบให้มีปริมาณตามที่ได้เลือกไว้ในหัวข้อ 3.4.1

3.5 การศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโพโตคะตะไลซิส

ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้น้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในหัวข้อ 3.4 โดยจะทำการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำกับน้ำตัวอย่างที่มีเชื้อแบคทีเรีย *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 คัดตั้งลงบนชั้นบันไดทั้ง 6 ชั้น (6 แผ่น) ในถังปฏิกิริยา โดยมีสภาวะการทดลองดังแสดงตารางที่ 3.1 พลังงานแสงที่ใช้เป็นหลอดไฟแสงวิซิเบิล 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 ตามสมการด้านล่าง
- สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.1 สถานะการทดลองการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สถานะ
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	แสงวิซิเบิล
	แสงยูวีเอ
	ไม่มีแสง
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน	แสงวิซิเบิล
	แสงยูวีเอ
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์	แสงวิซิเบิล
	แสงยูวีเอ

3.5.2 การศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

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

2) ในการทดลองจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.1 ซึ่งจะกำหนด อัตราการไหล 120 ลิตรต่อนาที โดยมีสถานะการทดลองดังตารางที่ 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* บนจานเพาะเชื้อ โดยจะนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งคำนวณและแสดงเป็นสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ ตามสมการด้านล่าง

สัดส่วนของเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลานั้น ๆ = (ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลานั้น ๆ / ค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น)

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ	พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางเซนติเมตร)
มีตัวเร่งปฏิกิริยา*	แสงวิซิเบล	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*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาปริมาตร 200 มิลลิลิตร

2) ในการทดลองจะเลือกใช้พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 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) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 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 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

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

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.5.1 และเลือกใช้พื้นที่ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5.2

3.5.4 การศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในการการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนการศึกษาถึงผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

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

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

2) ในการทดลองจะเลือกใช้สภาวะการทดลองและเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นที่ผิว 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 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำกรณี่ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะ 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

** แหล่งกำเนิดแสงและอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.5.3

3.5.4.2 ศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำกรณินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง

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

2) ในการทดลองจะเลือกใช้สภาวะการทดลองและเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นที่ผิว 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 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำกรณินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง

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

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาและแสงที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจาก

หัวข้อที่ 3.5.1 พื้นที่ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5.2

** แหล่งกำเนิดแสงและอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.5.3

3.5.5 การศึกษาผลของการตอบสนองของแสงยูวีต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*)

ในน้ำ

- 1) น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมได้ดังหัวข้อที่ 3.4.3 (*Fecal Streptococcus*) โดยจะเติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปในตัวถังที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิบัติการปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 2) ในการทดลองจะเลือกใช้สภาวะการทดลองและเลือกใช้พื้นที่ผิว และอัตราการไหลและแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 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 STREPTOCOCCUS 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 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของการตอบสนองของแสงยูวีต่อการฆ่าเชื้อโรค (*Fecal Streptococcus*) ในน้ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะ
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	ไม่มีแสง
	แสงยูวีเอ
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน	แสงยูวีเอ
ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติ-โมนิไตรซัลไฟด์	แสงยูวีเอ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1.1 ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

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

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา

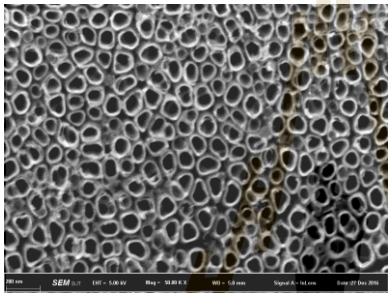
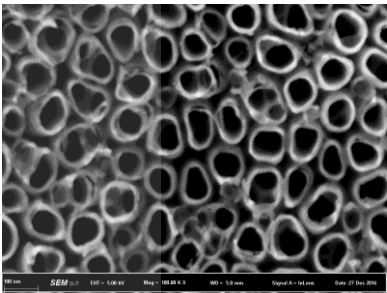
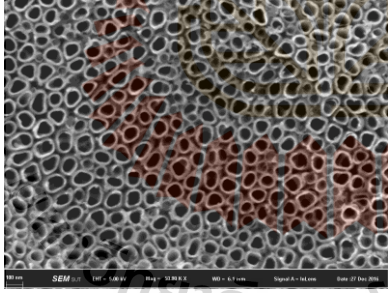
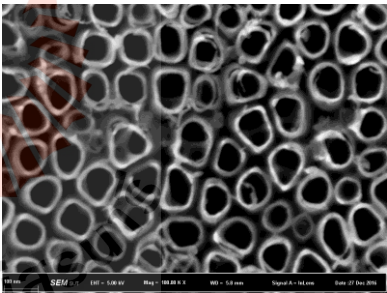
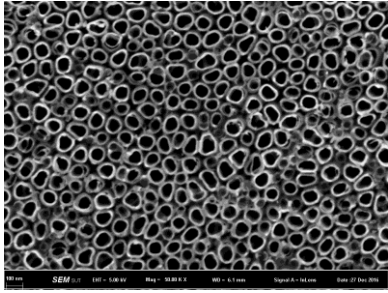
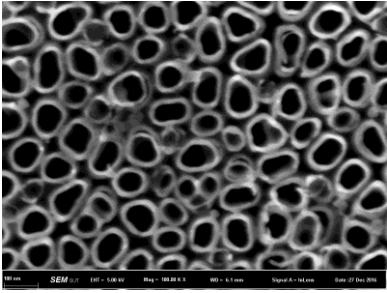
เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แบ่งการสังเคราะห์ออกเป็น การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน และการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนโดยการปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน ดังนั้นผลการศึกษาในกระบวนการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อดังนี้

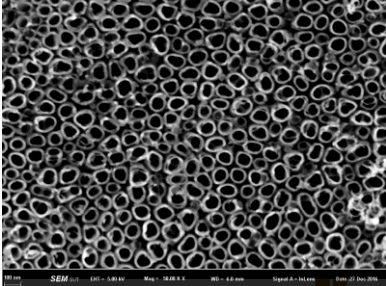
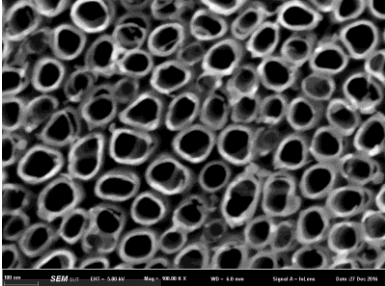
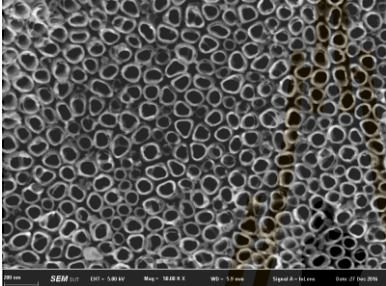
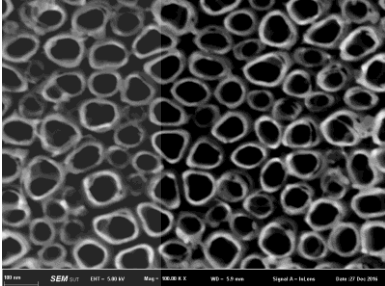
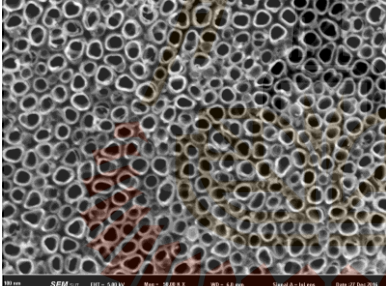
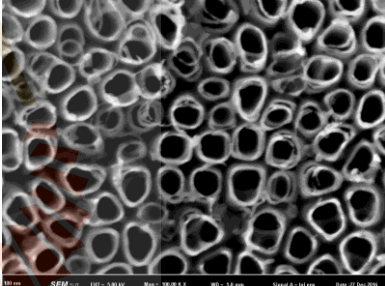
4.1.1.1 ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

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 จากนั้นก็จะนำไปเผาที่

อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโน จากนั้นจะนำไปศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้อง FE-SEM ได้ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM

แผ่นที่	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
1		
2		
3		

แผ่นที่	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
4		
5		
6		

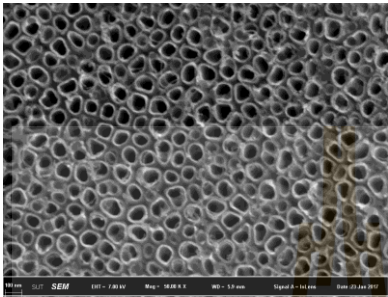
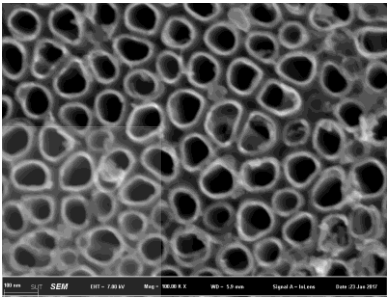
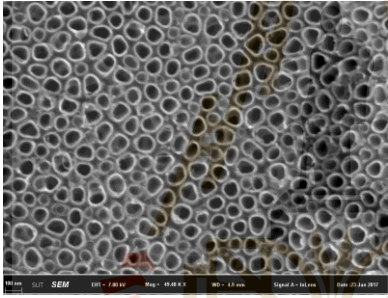
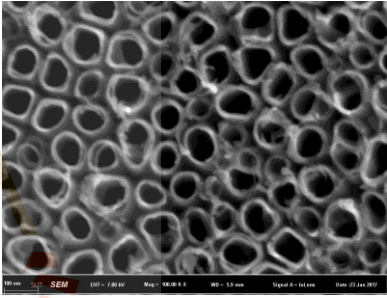
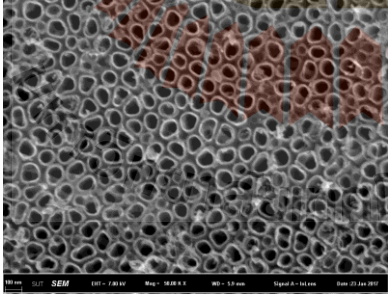
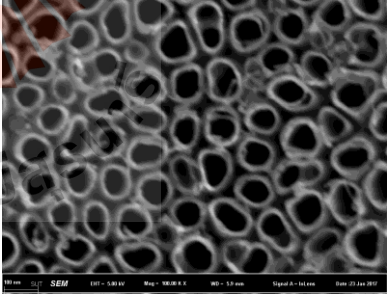
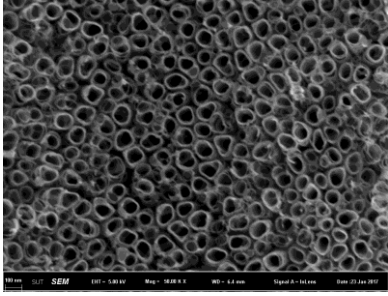
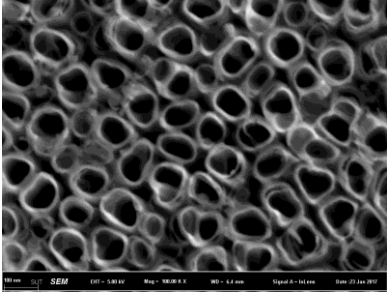
จากผลการทดลองในตาราง 4.1 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง FE-SEM ที่กำลังขยายของเครื่อง 50,000 เท่า พบว่าลักษณะออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นรูปท่อจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น มีลักษณะของท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า จะเห็นว่าลักษณะท่อที่เกิดขึ้น เป็นท่อที่แยกจากกันค่อนข้างชัดเจน ท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ ในการวิเคราะห์ FE-SEM ร่วมกับการใช้เทคนิค Tube Density จะพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอนโนไดซ์เซชัน โดยควบคุมสภาวะในการสังเคราะห์ให้เหมือนกันทุกครั้งคือ ศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลา และ ความเข้มข้นของสารละลาย พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 6 แผ่น จะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานที่มีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด ซึ่งในขนาดพื้นที่ 8.86×10^5 ตารางนาโนเมตร จะเกิดจำนวนท่อของไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ

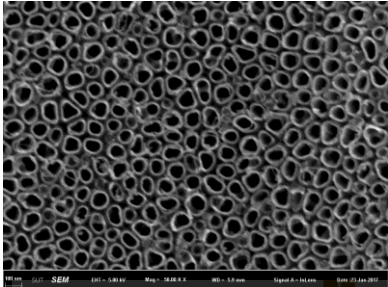
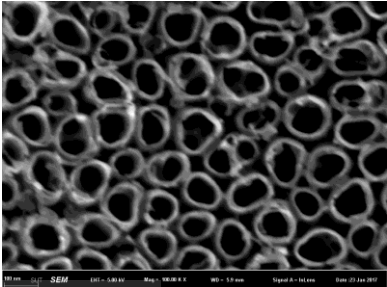
82 ± 5 ท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 20 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร สอดคล้องกับการศึกษาของ ศรีบุญญา, (2555) ที่ทำการทดลองการแอโนไดซ์เซชันในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol : H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ มีลักษณะของท่อชัดเจน เป็นท่อที่แยกจากกันชัดเจน และมีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ การศึกษาของ Sun *et al.*, (2011) ได้ทำการทดลอง แอโนไดซ์เซชันในสารละลาย 0.3 M NH_4F ใน ethylene glycol : H_2O (98 : 2) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ระยะเวลา 120 นาที จะทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน ขึ้น และการศึกษาของ Kontos *et al.*, (2012) โดยมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชันที่ ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.5 M NH_4F ใน ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า จะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน โดยความหนาของออกไซด์มีขนาด 7, 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.1.1.2 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วย แอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition)

ในขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล (visible) เพิ่มมากขึ้นด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน จะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ได้จากสังเคราะห์จากหัวข้อ 4.1.1.1 มาทำการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยจะนำไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน จุ่มลงในสารละลายผสมที่มี SbCl_3 14 มิลลิโมลาร์และ Stuffer 0.2 มิลลิโมลาร์ และทำการฉายแสงลงในทิศทางตั้งฉากบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ นำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง FE-SEM ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

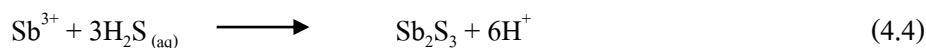
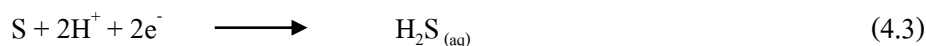
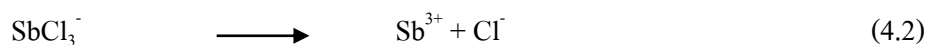
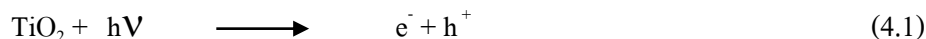
ตารางที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตร-ซัลไฟด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM

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

เวลา	กำลังขยาย	
	50000 เท่า	100000 เท่า
60 นาที		

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ด้วยกล้อง FE-SEM พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ทั้ง 6 แผ่น มีลักษณะที่คล้ายกันทั้งหมด และยังมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่คล้ายกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโน ซึ่งในการใช้เทคนิค Tube Density ก็พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ให้ข้อมูลของ Tube Density ที่ใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ขนาดพื้นที่ 8.86×10^7 ตารางนาโนเมตร จะเกิดจำนวนท่อของไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ 80 ± 4 ท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 20 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Meng *et al.*, (2013) ที่เมื่อทำการประดิษฐ์แอนติโมนีไตรซัลไฟด์ลงไปบนไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัณฐานวิทยาเนื่องจากแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ประดิษฐ์ลงไปมีขนาดเล็กมากไม่สามารถศึกษาได้ด้วยการใช้เทคนิค FE-SEM เพียงอย่างเดียว

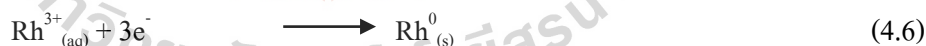
ดังนั้นในขั้นตอนของการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาจะใช้เทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) เพื่อหาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่มีการตรวจวัด โดยผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จะเกิดตำแหน่งของธาตุ Sb (จุดสีแดง) และ S (จุดสีเหลือง) กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ และจากการสังเกตจะพบว่าธาตุ Sb (จุดสีแดง) และธาตุ S (จุดสีเหลือง) จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากตามระยะเวลาในการฉายแสงตั้งแต่ 1 นาทีถึง 60 นาที ซึ่งกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (Photodeposition) เกิดขึ้นดังนี้ (Avilez *et al.*, 2016)



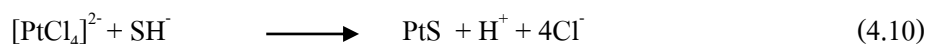
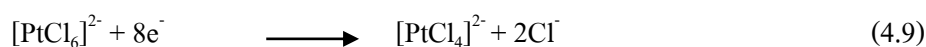
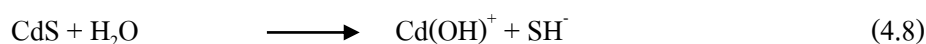
ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงก็จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลดังสมการที่ 4-1 ในสารละลายผสม(SbCl_3 และ S) สาร SbCl_3 จะเกิดการแตกตัวได้ Sb^{3+} และ Cl^- ดังสมการที่ 4.2 และสาร S รวมกับ e^- ได้ H_2S ที่อยู่ในรูปสารละลายดังสมการ 4.3 ต่อมาจะเกิดการรวมกันของ Sb^{3+} และ H_2S ทำให้เกิดการประติด้วยแอนติโมนีลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนดังสมการที่ 4.4 ซึ่งหลังจากการผ่านกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) แล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะคล้ายกับงานวิจัยของ Wenderich *et al.*, (2016) ที่แสดงถึงกลไกของกระบวนการโฟโตเดโพสิชันว่าเกิดขึ้นจากการที่สารที่เราต้องการให้ประติบนตัวเร่งปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน และเปลี่ยนสถานะจากสารละลายเป็นของแข็งติดอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ 4.5



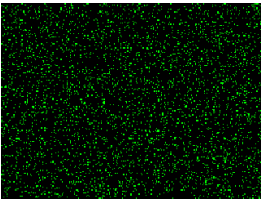
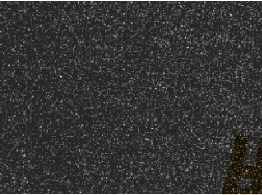

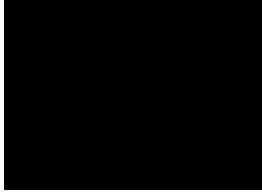
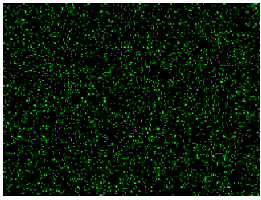
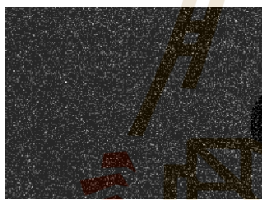
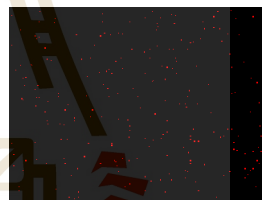
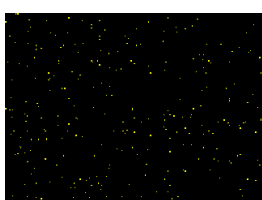
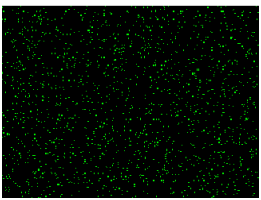
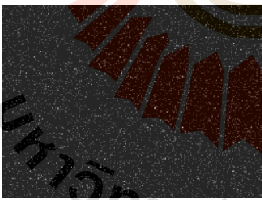

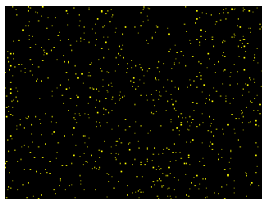
และ Busser *et al.*, (2012) ได้มีการทำให้โรเดียมและโครเมียมออกไซด์นั้นประติอยู่บนแกลเลียมออกไซด์ดังสมการ 4.6-4.7

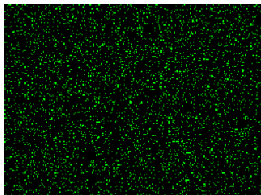
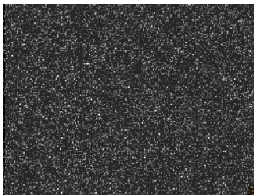
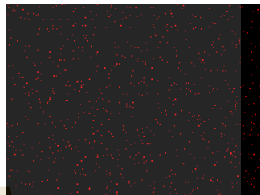
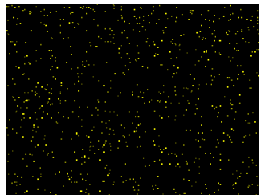
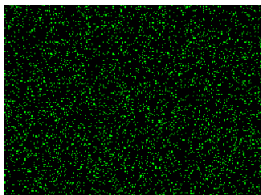
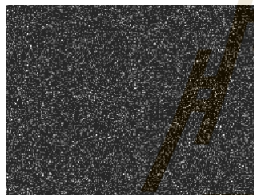
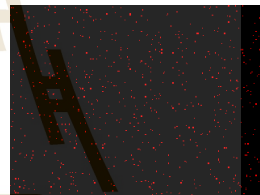
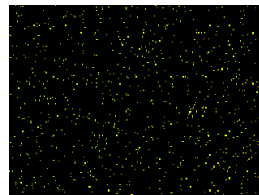


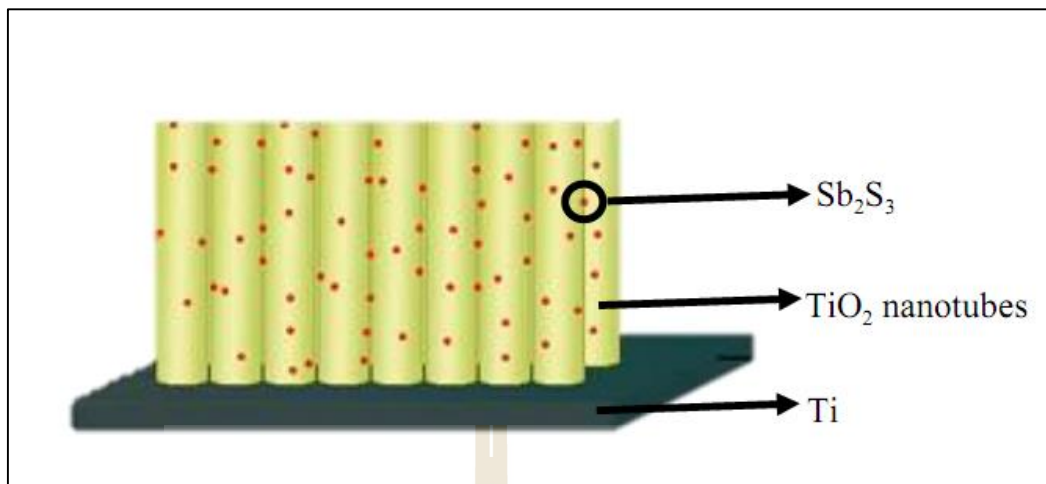
งานวิจัยของ jin *et al.*,(2015) ได้ทำการประติ Pt ลงบน CdS ในสารละลาย $[\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ ดังสมการ 4.8-4.10



ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

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 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาคำด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry) จากตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน และ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) โดยการฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนมีปริมาณของไทเทเนียมอยู่ร้อยละ 59.950 และ ปริมาณออก-ออกซิเจนอยู่ร้อยละ 40.050 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติด

ด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ จะมีปริมาณของแอนติโมนิเท่ากับร้อยละ 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 จะเห็นได้ว่าปริมาณของธาตุแอนติโมนิและธาตุซัลเฟอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 1 นาทีจนถึง 60 นาที แต่จากการสังเกตจะพบว่าหลังจากผ่านนาที่ที่ 15 ไปปริมาณของธาตุแอนติโมนิและธาตุซัลเฟอร์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยคือ นาที่ที่ 15 ถึง 30 ปริมาณของธาตุแอนติโมนิเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.005 ในขณะที่

จาก 1 นาทีถึง 15 นาที ธาตุแอนติโมนีเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 0.022 และนาที่ที่ 30 ถึงนาที่ที่ 60 ปริมาณของธาตุแอนติโมนีเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.003 ซึ่งสาเหตุก็อาจเกิดเนื่องจากการกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.1.2 ที่ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาน จะมีผลกับการปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป ปริมาณของ Sb_2S_3 ก็จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ จนเต็มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อนาน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถทำทราบถึงระยะเวลาสูงสุด (optimum) ของกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) ของการปะติดแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นคือระยะเวลาการฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายผสมของ $SbCl_3$ 14 มิลลิโมลาร์และซัลเฟอร์ 0.2 มิลลิโมลาร์เป็นระยะเวลา 15 นาที

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

Element Sample	Ti (%)	O (%)	Sb (%)	S (%)
	TiO₂ 0 min	59.950	40.050	None
TiO₂/Sb₂S₃ 1 min	59.909	40.043	0.040	0.007
TiO₂/Sb₂S₃ 15 min	59.889	40.038	0.062	0.011
TiO₂/Sb₂S₃ 30 min	59.876	40.042	0.067	0.015
TiO₂/Sb₂S₃ 60 min	59.875	40.036	0.070	0.019

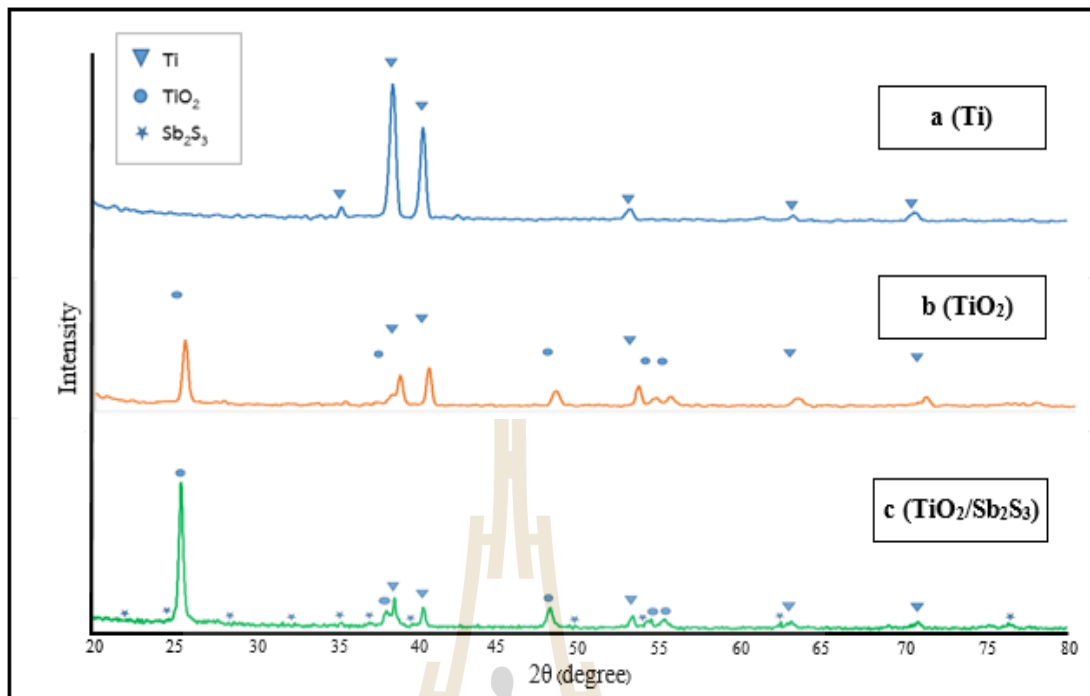
4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน และ ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จะใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (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 แสดงดังรูปที่ 4.2 (a) แสดงลักษณะผลึกแผ่นไทเทเนียม JPCDS NO. 44-1294 เท่ากับ 35.16° , 38.49° , 40.00° , 53.06° , 63.03° และ 70.68° ให้สัญลักษณ์เป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นแผ่นไทเทเนียม (Substrate)

จากรูปที่ 4.2 (b) แสดง XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดซ์เซชันใน สารละลายนำไฟฟ้า 0.30 โมลาร์ NH $_4$ F, Glycerol:H $_2$ O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะให้ XRD pattern ที่เป็นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส (JPCDS NO. 21-1272) ปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ 25.15° , 37.88° , 48.12° , 53.90° และ 54.15° แสดงสัญลักษณ์เป็นรูปวงกลม ซึ่งจากโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนี้ งานวิจัยหลายชิ้นได้นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเนื่องจากสามารถให้การตอบสนองแสงได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น (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 ของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ โดยทำการฉายแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จาก XRD pattern (JCPDS No. 42-1393) จะปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ 25.06° , 28.68° , 32.29° , 35.59° , 37.12° , 39.49° , 50.97° , 54.22° , 62.26° และ 76.80° ให้สัญลักษณ์เป็นรูปดอกจันทร์ ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Zhong *et al.*, 2015 พบว่าการทำให้แอนติโมนีไตรซัลไฟด์เกิดเป็นผลึก (Crystallinity) จะทำให้การตอบสนองต่อแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นได้ดีกว่าแบบไม่เกิดผลึกของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

4.1.4 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิชิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยา

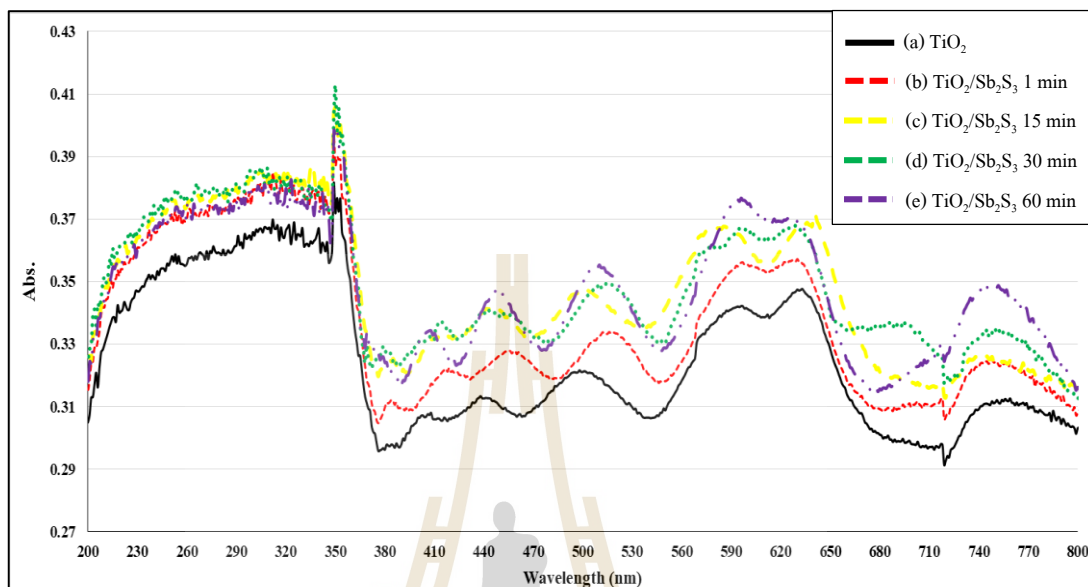
ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา และ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแสงของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะทำการตรวจวัดทั้งในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและช่วงคลื่นวิชิเบิล (200-800 นาโนเมตร) โดยใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectra (DRS) ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer, UV-2550 ดังมีผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 แบ่งเป็น รูปที่ 4.3 (a) เส้นทึบสีดำ เป็นการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา, รูปที่ 4.3 (b) เส้นประสีแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ทำการฉายแสงเป็นเวลา 1 นาที, รูปที่ 4.3 (c) เส้นประสีเหลือง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ทำการฉายแสงเป็นเวลา 15 นาที และ รูปที่ 4.3 (d)

เส้นประสีเขียว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ที่ทำการฉายแสงเป็นเวลา 30 นาที

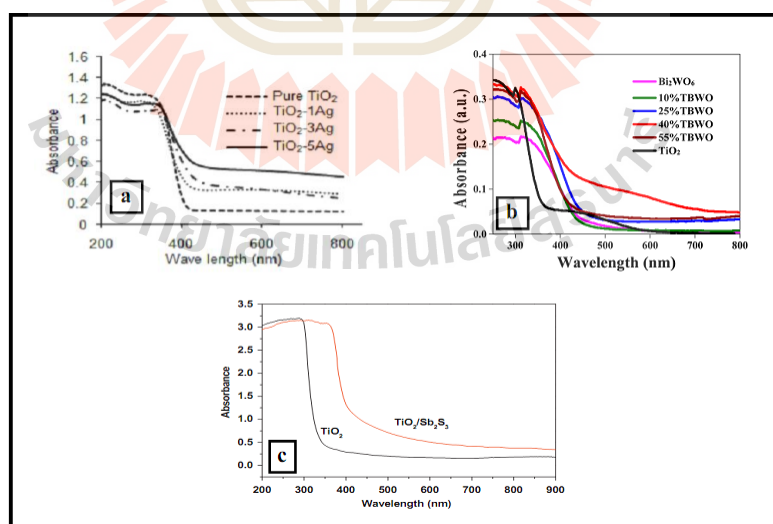
จากรูปที่ 4.3 (a) จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนจะให้การดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (ต่ำกว่า 380 นาโนเมตร) ซึ่งในช่วงแสงวิซิเบิล (380-800 นาโนเมตร) ก็ให้การดูดกลืนแสงเพียงเล็กน้อย แต่หลังจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนด้วยการประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ทำให้การดูดกลืนแสงทั้งในช่วงแสงยูวีและแสงวิซิเบิลเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโน และซึ่งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.3 (c), รูปที่ 4.3 (d), รูปที่ 4.3 (e) จะพบว่า การดูดกลืนแสงทั้งช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงวิซิเบิลที่เวลา 15 30 และ 60 นาที จะมีค่าดูดกลืนแสงของทั้ง 3 สภาวะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลของการหาปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF จากหัวข้อที่ 4.1.2 จะพบว่า การประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) ในเวลา 15 30 และ 60 นาทีจะมีปริมาณของธาตุ Sb และ S ที่ใกล้เคียงกันจึงเป็นผลที่ทำให้การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดมีค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกันไปด้วย ดังนั้นในการทดลองนี้จะเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) เป็นเวลา 15 นาทีเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้การดูดกลืนแสงที่สูง การให้การดูดกลืนแสงที่สูงก็หมายความว่า การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสก็จะสูงขึ้นไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัยที่เลือกใช้เทคนิค DRS ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปเช่น งานวิจัยของ กรรณก, (2016) ที่ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 , $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ ด้วยวิธี Sol-gel และได้เลือกตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2\text{-5Ag}$ ไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปเนื่องจากให้ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด ดังแสดงรูปที่ 4.4 (a) งานวิจัยของ Yanan *et al.*, (2016) ได้ทำการสังเคราะห์ TBWO ด้วยวิธี Hydrothermal พบว่า TBWO 40% ให้การดูดกลืนแสงที่มากที่สุดจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (b) และงานวิจัยของ Meng *et al.*, (2013) ได้ทำการสังเคราะห์ TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ด้วยวิธี Hydrothermal พบว่าการเติม Sb_2S_3 จะทำให้การดูดกลืนแสงทั้งในช่วงยูวีและวิซิเบิลนั้นเพิ่มมากขึ้น และจะเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ไปทำการศึกษาต่อเนื่องจากให้การดูดกลืนแสงที่มากกว่า TiO_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (c)

สำหรับในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะเป็นการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะนำไปทดสอบการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมี 2 ชนิดคือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนและ (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมได

ออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยวิธีโฟโตเดโพสิชัน (photodeposition) เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.3 การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์



รูปที่ 4.4 งานวิจัยที่เลือกใช้เทคนิค DRS ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป (a) TiO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ (กรกนก, 2016), (b) TBWO (Yanan et al., 2016), (c) TiO_2 และ $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ (Meng et al., 2013)

4.2 การออกแบบถังปฏิกริยาที่ใช้ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

สืบเนื่องจากข้อจำกัดหลายด้านของการใช้ไทเทเนียมแบบผงในการทำปฏิกริยาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.8.5 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จึงได้มีการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์จากรูปแบบผงมาเป็นแบบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนตัวกลาง นอกจากจะสะดวกต่อการใช้งานแล้ว ยังสามารถทำได้ง่ายเมื่อต้องการเปลี่ยนวัสดุตัวกลางเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการเสื่อมสภาพจากการใช้งานอีกด้วย สำหรับถังปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสำหรับตัวเร่งปฏิกริยาแบบชนิดฟิล์มบางไปใช้งาน จะนิยมใช้เป็นถังปฏิกริยาแบบฟิกซ์เบด (Fix-bed photoreactor) โดยถังปฏิกริยาแบบฟิกซ์เบดนี้จะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนผิวของโลหะ และจะนำแผ่นโลหะนั้นมาวางไว้ในระนาบ 45 องศา โดยจะให้น้ำที่ต้องการบำบัดไหลผ่านจากบนลงล่างตามทิศทางที่กำหนดไว้ ซึ่งข้อควรระวังของการใช้ถังปฏิกริยาแบบแบบฟิกซ์เบด คืออัตราการไหลของน้ำที่สูงเกินไปจะทำให้มีการหลุดออกไปของฟิล์มบางระหว่างการบำบัดน้ำได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ความรู้พื้นฐานของถังปฏิกริยาแบบฟิกซ์เบดมาเป็นแนวคิดในการตัดแปลงรูปร่างของถังปฏิกริยา โดยจะให้การไหลของน้ำบนตัวเร่งปฏิกริยาเป็นแบบขึ้นบันได 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 เป็นส่วนที่จะวางแผ่นตัวเร่งปฏิกริยา ซึ่งมีแนวคิดจะใช้การออกแบบเป็นขึ้นบันไดเนื่องจากจะช่วยชะลอความเร็วของน้ำ เพื่อลดผลกระทบของความเร็วของน้ำที่ทำให้เกิดการหลุดของตัวเร่งปฏิกริยา สำหรับส่วนของขึ้นบันไดจะออกแบบให้แต่ละขั้นจะกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร เท่าขนาดของตัวเร่งปฏิกริยาที่ทำการสังเคราะห์จากขั้นตอนที่ 4.1 ซึ่งขนาดของแผ่นตัวเร่งปฏิกริยา กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร จะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกริยา

4) ความสูงของแต่ละชั้นบันไดห่างกัน 1 เซนติเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้วัสดุ Stainless Steel ที่ผู้รับเหมาแจ้งว่าต้องการจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมของ Stainless steel เพราะจะเกิดการ

รั้วภายหลังจากการใช้งานได้ง่าย จึงจะหันมาใช้เป็นการการพับของ Stainless steel เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความกว้างที่สามารถพับได้คือ 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 สำหรับใช้เปิดคูดน้ำตัวอย่างออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์

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

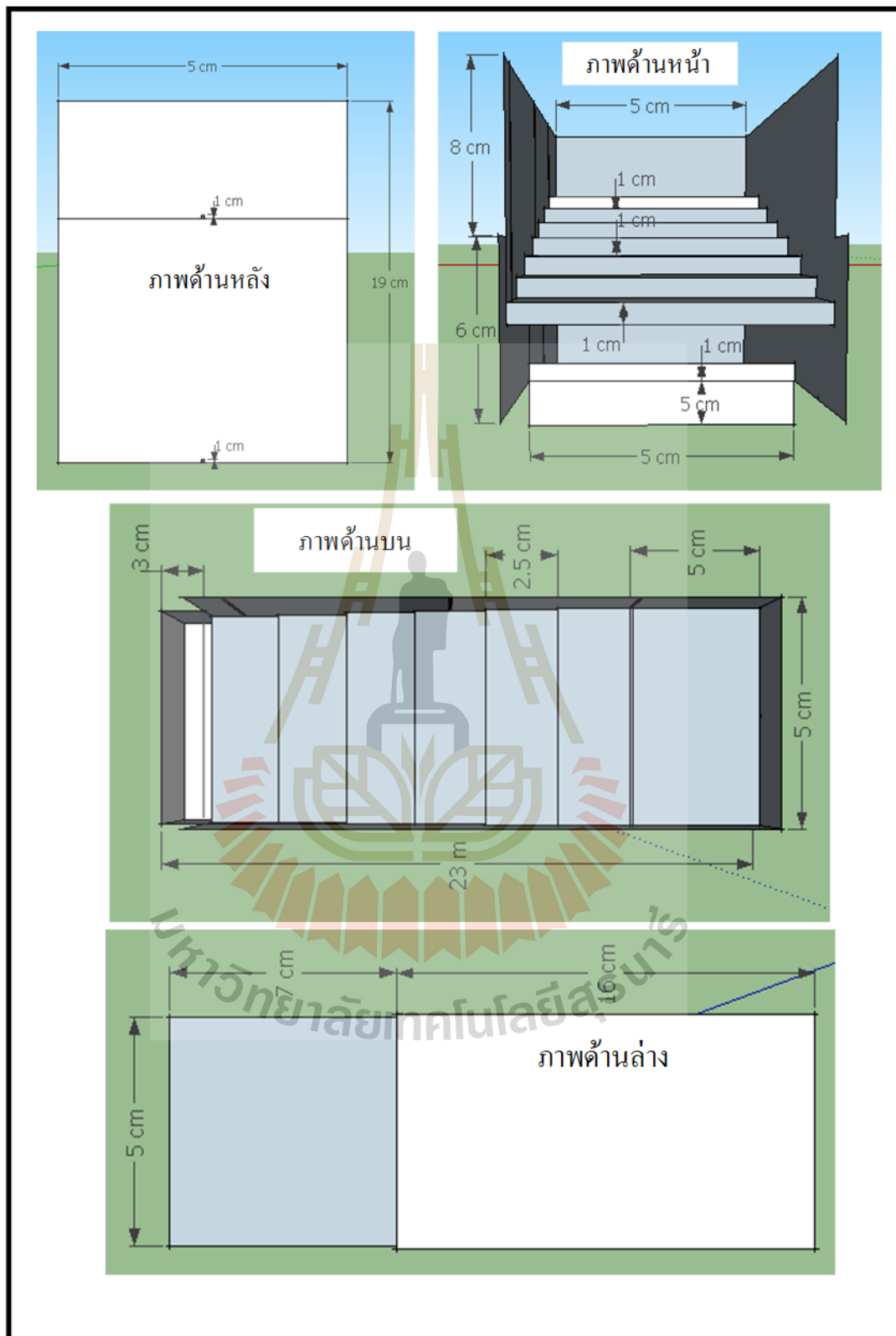
9) ปริมาณน้ำต่ำสุดคือ 200 มิลลิลิตร เป็นปริมาณน้ำต่ำสุดที่เมื่อทำการทดลองจะทำให้น้ำไหลเต็มแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา

10) อัตราการไหลต่ำสุดคือ 130 มิลลิลิตร/นาท เป็นอัตราการไหลที่น้ำจะสามารถไหลทั่วพื้นผิวแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาได้

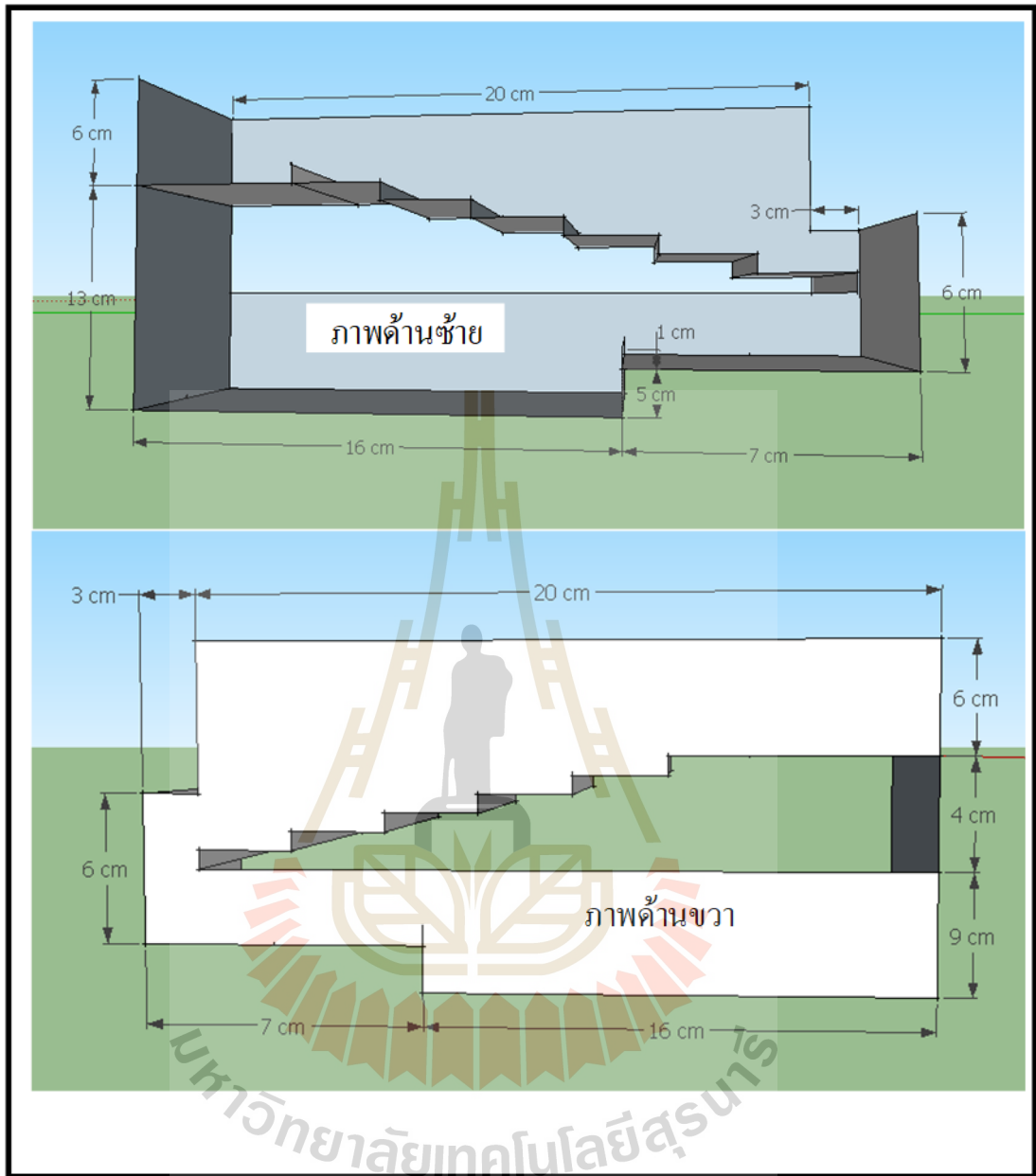
11) อัตราการไหลสูงสุดในการออกแบบคือ 500 มิลลิลิตร/นาท เนื่องจากปั๊มที่ใช้ในการทดลองเป็นปั๊มรีดมีอัตราการไหลสูงสุด 500 มิลลิลิตร/นาท

12) ลำดับการไหลของน้ำจะ ไหลวนเป็นลูป (loop) โดยเริ่มจากการใส่น้ำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ลงไปในส่วนที่ 1 เป็นส่วนกักเก็บน้ำ ซึ่งในช่องนี้จะใช้สายยางต่อจากช่องด้านหลังและมีปั๊มรีดเพื่อดึงน้ำจากด้านล่างเข้าสู่ด้านบนคือ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่กักเก็บน้ำและมีเวียร์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการกระจายน้ำให้ไหลทั่วพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 3 เป็นส่วนชั้นบันไดสำหรับวางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป และส่วนที่ 4 เป็นส่วนกักเก็บน้ำซึ่งมีช่องเปิดสำหรับใช้เปิดคูดน้ำตัวอย่างออกมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งน้ำจะไหลลงจากส่วนที่ 4 และเข้าสู่ส่วนที่ 1 อีกครั้ง

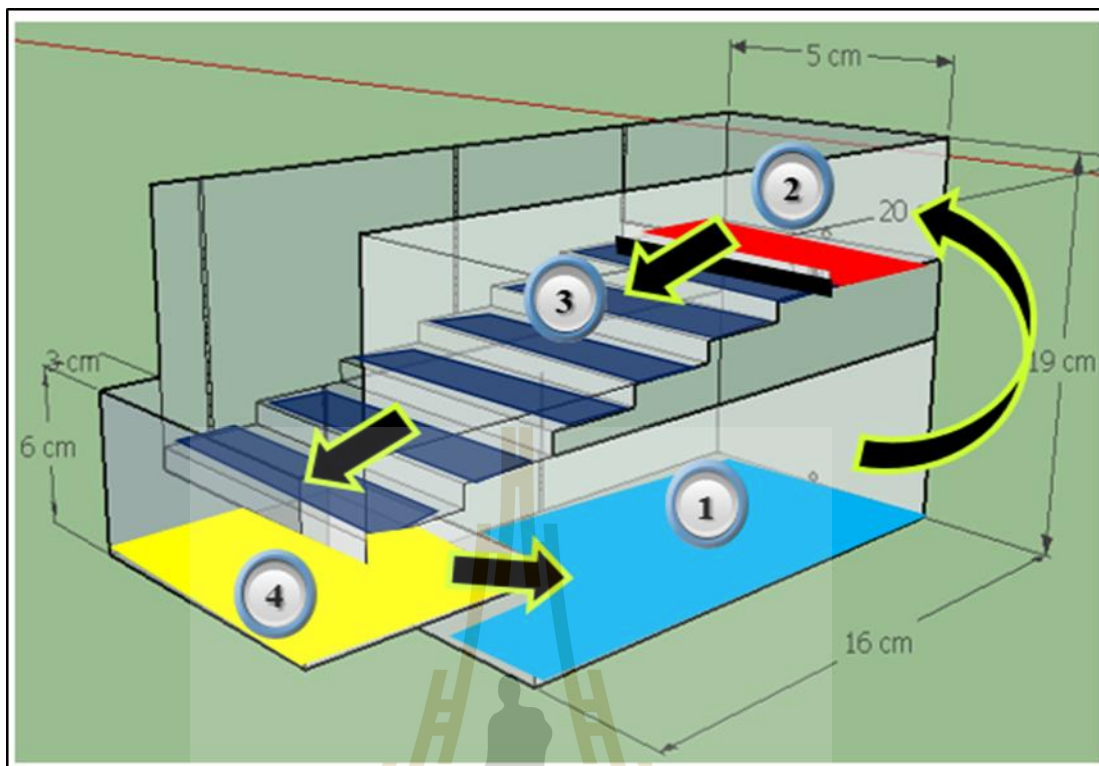
จากรายละเอียดการออกแบบสามารถแสดงแบบแปลนพร้อมรายละเอียดขนาดของถังปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.5 และการไหลวนของน้ำในถังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.6 และถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส รูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 แบบแปลนพร้อมขนาดของการออกแบบถังปฏิบัติการ



รูปที่ 4.5 แบบแปลนพร้อมขนาดของการออกแบบถังปฏิบัติการ (ต่อ)



รูปที่ 4.6 การไหลวนของน้ำในถังปฏิบัติการ



รูปที่ 4.7 ถังปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

หลังจากการออกแบบถังปฏิกิริยาแล้ว ผู้ทำการทดลองได้คำนวณการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลวนครบ 1 รอบ โดย ผู้ทำการทดลองได้จำลองสถานะของการทดลองโดยใช้อัตราไหลเท่ากับ 130 มิลลิลิตร/นาที และใช้น้ำที่อยู่ในถังด้านล่าง (ช่วงที่ 1) เท่ากับ 200 มิลลิลิตรพบว่าน้ำไหลครบ 1 รอบจะใช้เวลา 1 นาที 48 วินาที ตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างการคำนวณการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลวนครบ 1 รอบ

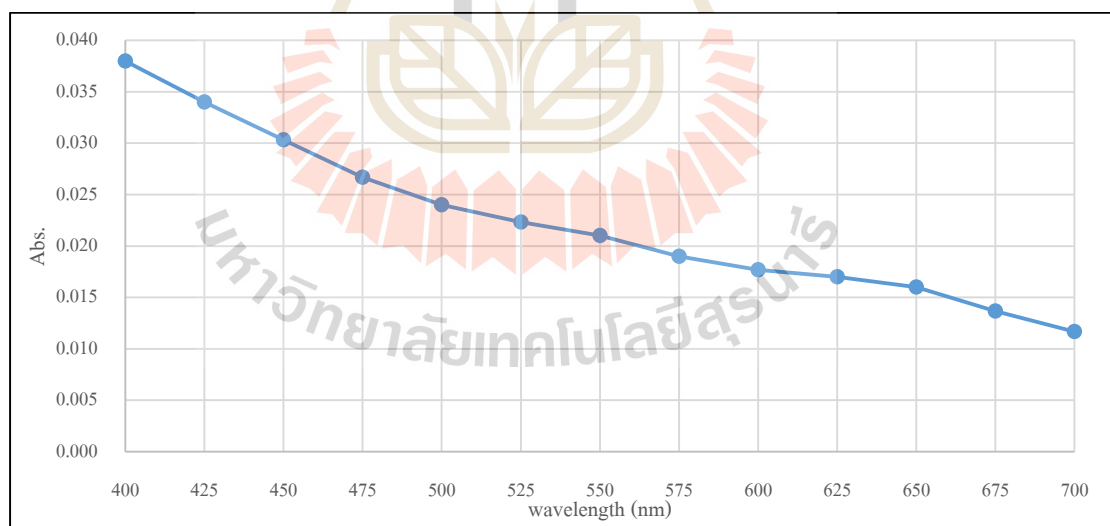
หา HRT ช่วงที่ 1					
Volume(V) = 16 x 5 x (1.85)	147	มิลลิลิตร			
Q (Flow)	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	67.97	วินาที	→	1.13	นาที
หา HRT ช่วงที่ 2					
V = ๒x๓x๕ = 3.5 x 5 x (1)	17.5	มิลลิลิตร			
Q	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	8.06	วินาที	→	0.13	นาที
หา HRT ช่วงที่ 3					
V = 15 x 5 x (0.45)	33.75	มิลลิลิตร			
Q	2.17	มิลลิลิตร/วินาที			
HRT = V/Q	15.55	วินาที	→	0.26	นาที
หา HRT ช่วงที่ 4					
V = 7 x 5 x (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 ด้วยการใช้อุปกรณ์ Spectrophotometer โดยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลของการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม

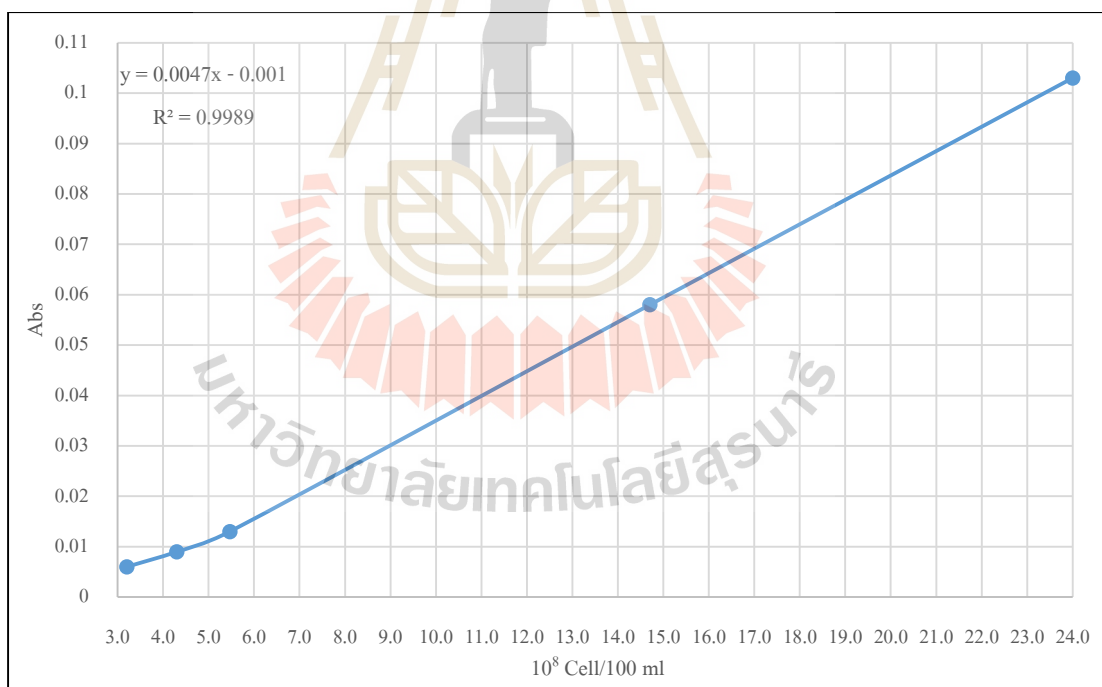
ในขั้นตอนแรกหลังจากที่ผสมน้ำ D.I. กับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* แล้ว จำเป็นจะต้องหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับแบคทีเรียโดยจะใช้เครื่อง Spectrophotometer, Spectro SC 2101 Labbo Med,inc ที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าความยาวคลื่นที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า Absorbance ของการวัดแบคทีเรียลดลงไปด้วย ซึ่งความยาวคลื่นที่แบคทีเรียสามารถดูดกลืนได้มากที่สุดคือ 400 นาโนเมตร 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 ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับจำนวนแบคทีเรีย จากงานวิจัยของสิทธิชัย., (2549) พบว่า ปริมาณของโคลิฟอร์มในแม่น้ำไกล่แหล่งเกษตรกรรมชุมชน สถานที่พักผ่อนหย่อนใจ จะอยู่ในช่วง 10^4 - 10^8 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นในการทดลองจะเลือกใช้ปริมาณของจำนวนแบคทีเรียสูงสุด คือ 10^8 เซลล์/100 มิลลิลิตร โดยแทนในสมการเส้นตรง $y = 0.0047x - 0.001$ จะทำให้ได้ ค่า O.D. เท่ากับ 0.022 ที่ 400 นาโนเมตร มีปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ 5×10^8 เซลล์/100 มิลลิลิตร ซึ่งจะใช้สภาวะนี้ในการเตรียมน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

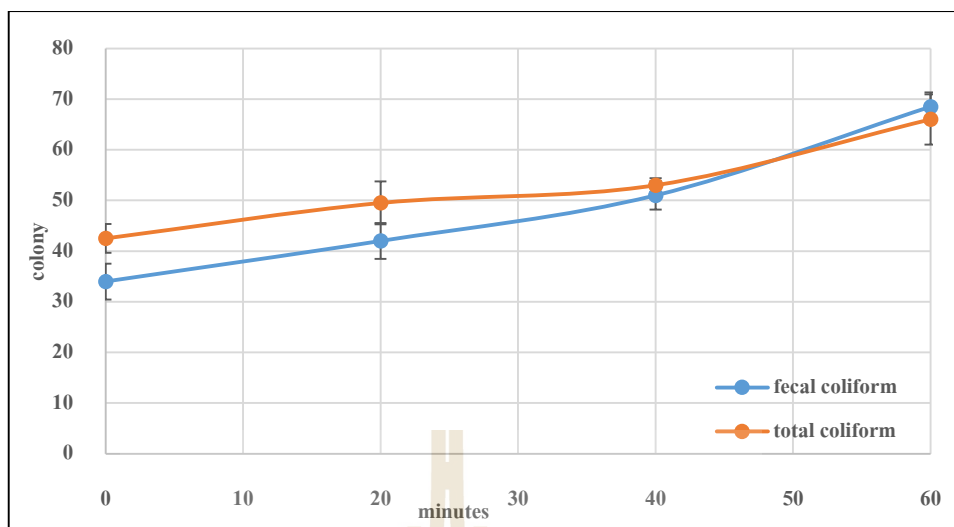


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับจำนวนแบคทีเรีย

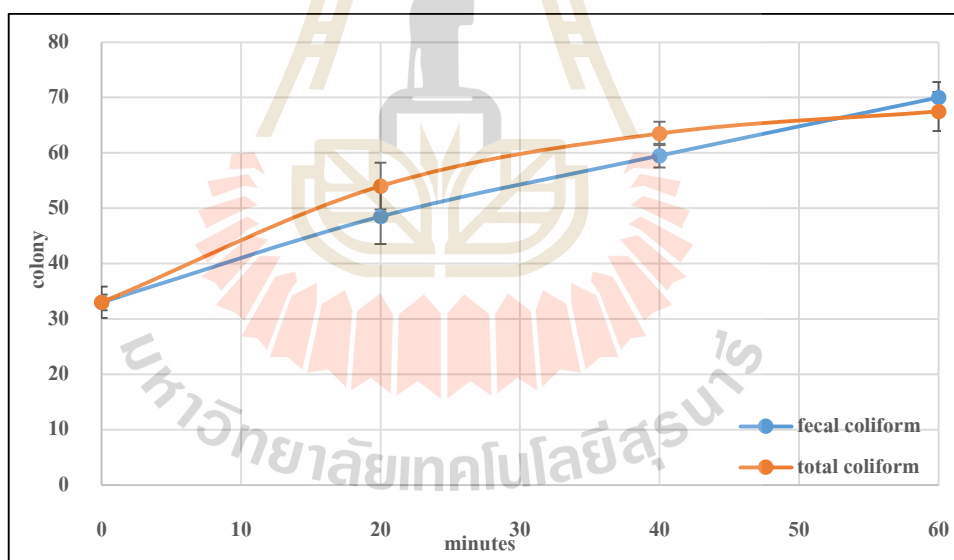
4.4 ผลการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ในขั้นตอนของการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนั้นจะใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Membrane Filter Technique ซึ่งจะมีการทดลองเบื้องต้น คือ การศึกษาการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* โดยทำการเปรียบเทียบการตรวจนับโดยการใช้ (1) วิธีการตรวจนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและ (2) การตรวจนับจำนวนแบคทีเรียฟัลลโคลิฟอร์ม โดยมีผลการทดลองดังแสดงรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4.10 พบว่าจำนวนของโคโลนีที่ตรวจพบเริ่มต้น (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 (นาที่ที่ 60: วิธี fecal coliform 68.5 โคโลนี, วิธี total coliform 66 โคโลนี) รูปที่ 4.12 จำนวนของโคโลนีที่ตรวจพบเริ่มต้น (นาที่ที่ 0: วิธี fecal coliform 33.5 โคโลนี, วิธี total coliform 37 โคโลนี) จะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นระยะเวลาผ่านไป (นาที่ที่ 60: วิธี fecal coliform 68 โคโลนี, วิธี total coliform 69.5 โคโลนี)

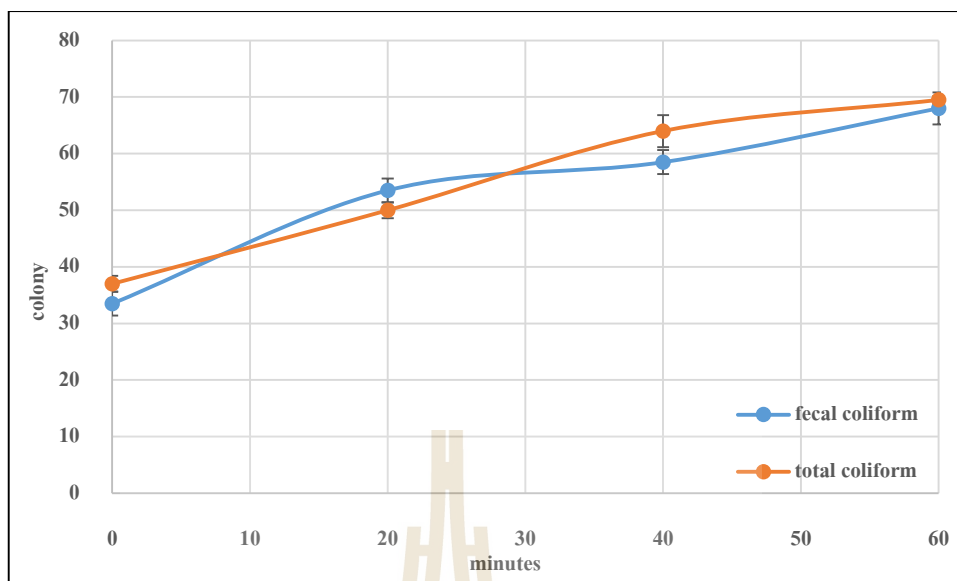
จากการทดลองทั้ง 3 ครั้งพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นและวิธีการตรวจนับทั้ง 2 วิธี (จำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและจำนวนฟัลลโคลิฟอร์ม) ในแต่ละซ้ำของการทดลองจะมีจำนวนที่ใกล้เคียงกันคือ มีจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* (เฉลี่ยของทั้งสองวิธีรวมกัน) เริ่มต้นนาที่ที่ 0, เท่ากับ $3.55 \times 10^8 \pm 0.4$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และนาที่ที่ 60, เท่ากับ $6.83 \times 10^8 \pm 0.3$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และเมื่อใช้การทดสอบทางสถิติ ด้วยวิธี pair sample t-test ของการตรวจนับทั้ง 2 วิธี พบว่าการตรวจนับแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและการตรวจนับจำนวนฟัลลโคลิฟอร์ม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนต่อไป จะใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อแบคทีเรียเทคนิค Membrane Filter Technique ด้วยการตรวจนับเพียงแบคทีเรียฟัลลโคลิฟอร์มเท่านั้น



รูปที่ 4.10 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และพีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1



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



รูปที่ 4.12 การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และพีคัล โคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3

4.4.1 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในขั้นตอนของการการศึกษากการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ต้องการที่จะเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากหัวข้อที่ 4.1 คือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนและ (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ 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 (เส้นทึบสีดำ) 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) สภาวะที่มีแสงวิซิ-

เบิล ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีเทา), รูปที่ 4.13 (c) สภาวะมีแสงวิชิเบิล มีตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน (เส้นประสีม่วง), และ รูปที่ 4.13 (d) สภาวะมีแสงวิชิเบิล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (เส้นประสีเหลือง) พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ทั้ง 3 สภาวะเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น อีกทั้งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.13 เส้นกราฟทั้ง 4 เส้น มีความใกล้เคียงกันมาก ไม่พบความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

จากปัญหาดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นมีปริมาณที่มากเกินไปทำให้การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระบบมากกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นจึงได้แก้ปัญหาโดยการลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เริ่มต้นลดลง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1 จะพบว่าปริมาณจำนวน โคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินในแม่น้ำสายสำคัญในประเทศไทย 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

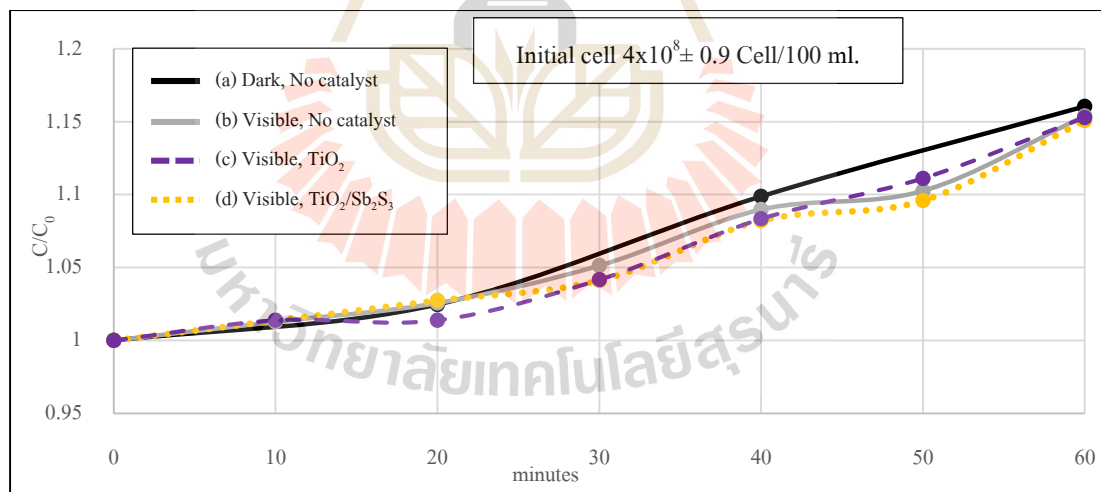
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.14 (a) ปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ในสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีดำ) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ 60 นาที จะเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้นเป็นร้อยละ 8 จากเวลาเริ่มต้นที่มีเชื้อแบคทีเรียประมาณ $3.5 \times 10^6 \pm 0.74$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และ 3 สภาวะถัดมาคือ รูปที่ 4.14 (b) สภาวะที่มีแสงวิชิเบิล ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีเทา), รูปที่ 4.14 (c) สภาวะมีแสงวิชิเบิล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน (เส้นประสีม่วง), รูปที่ 4.14 (d) สภาวะมีแสงวิชิเบิล มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (เส้นประสีเหลือง) พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ในแต่ละสภาวะเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น โดยที่ระยะเวลา 60 นาที มีการเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียมากขึ้นเป็นร้อยละ 7.1, 5.8, และ 4.4 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา

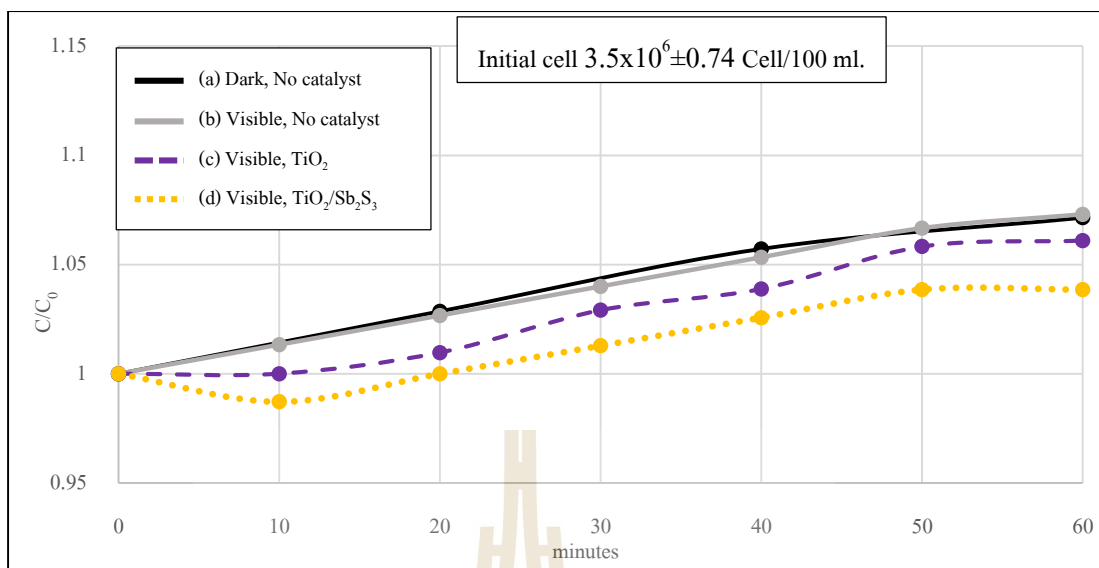
ในระบบไปลบการกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.15

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.15 (a, เส้นทึบสีเทา) สภาวะที่ใช้แสงวิชิเบิลเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 0 % ที่ระยะเวลา 60 นาที รูปที่ 4.15 (b, เส้นประสีม่วง) สภาวะที่ใช้แสงวิชิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 1.8% และรูปที่ 4.15 (b,เส้นประสีเหลือง) สภาวะที่ใช้แสงวิชิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 3.3%

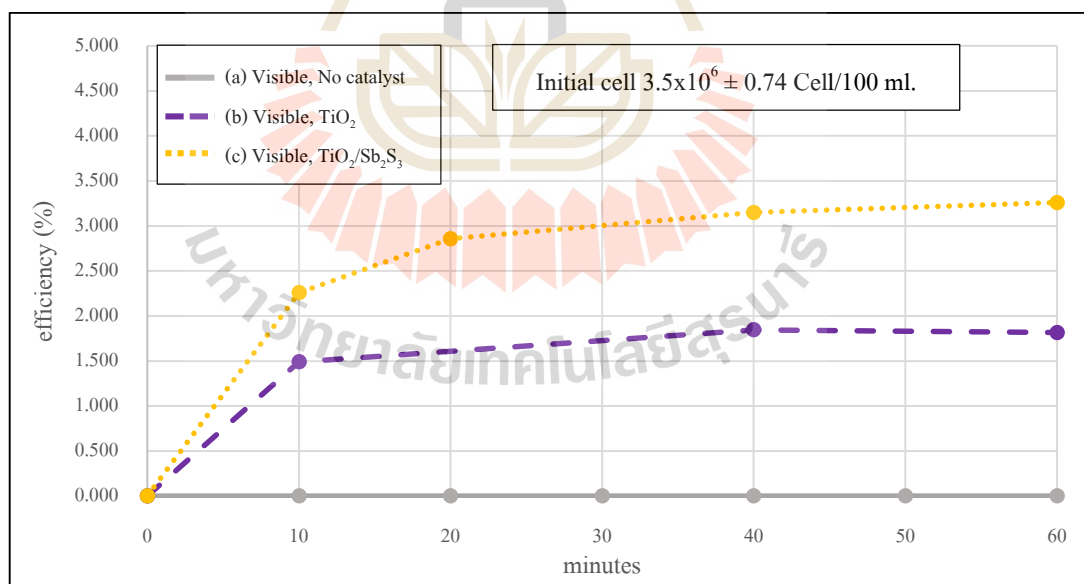
จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ที่มีความสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้มากที่สุด ดังนั้นจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ไปทำการศึกษาในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนต่อไป



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



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



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

4.4.1.2 ผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเลตต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาทั้งหมด 4 สภาวะ มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยรูปที่ 4.16 (a) สภาวะแรกจะเป็นสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีดำ) 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 (เส้นทึบสีเทา), รูปที่ 4.16 (c) มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน (เส้นประม่วง), รูปที่ 4.16 (d) สภาวะแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ (เส้นประสีเหลือง) พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ทั้ง 3 สภาวะ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แบคทีเรียมากขึ้น อีกทั้งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.16 เส้นกราฟทั้ง 4 เส้น มีความใกล้เคียงกันมาก ไม่พบความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

จากปัญหาดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นมีปริมาณที่มากเกินไปทำให้การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระบบมากกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นจึงได้แก้ปัญหาโดยการลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *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 4.17

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 (a) ปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ในสภาวะคอนโทรลคือ ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีดำ) 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 (เส้นทึบเทา), รูปที่ 4.17 (c) มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน (เส้นประสีม่วง), รูปที่ 4.17 (d) สภาวะแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ (เส้นประสีเหลือง) พบว่าปริมาณของแบคทีเรีย *E.coli* ในสภาวะ (b, เส้นทึบเทา) มีแสงยูวีเอ ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และ สภาวะ (c, เส้นประสีม่วง) มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเพิ่มจำนวนของจำนวนแบคทีเรียมากขึ้นโดยที่ระยะเวลา 60 นาที มี

การเพิ่มจำนวนเซลล์แบคทีเรียเป็นร้อยละ 4.0, 2.6 ตามลำดับ ต่างกับสภาวะ (d, เส้นประสีเหลือง) ที่มีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของเชื้อแบคทีเรียจะลดลง โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของจำนวนแบคทีเรียลดลงจากเริ่มต้นร้อยละ 3

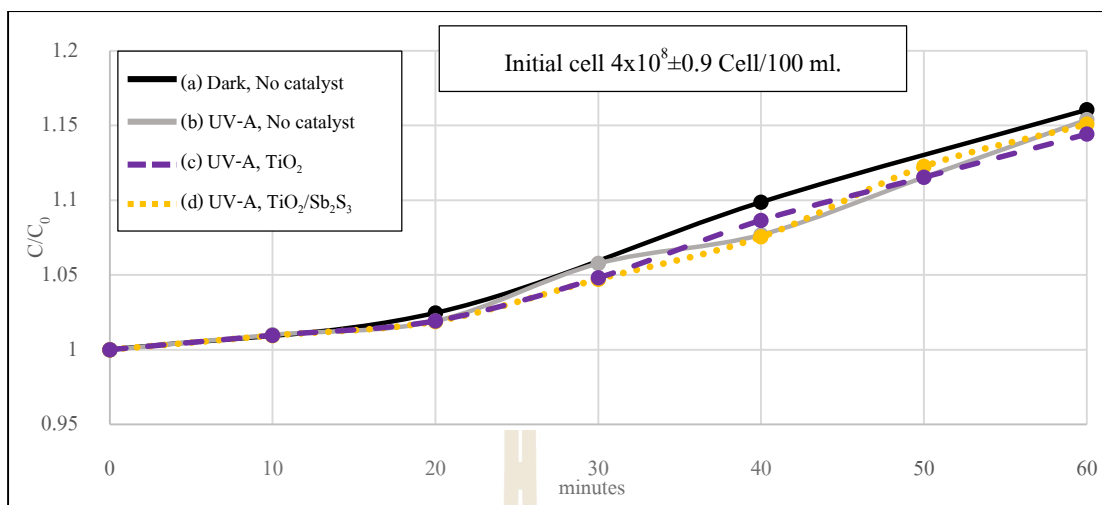
อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.18

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.18 (a, เส้นทึบสีเทา) สภาวะที่ใช้แสงยูวีเอเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 3.6 % รูปที่ 4.18 (b, เส้นประสีม่วง) สภาวะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 5% และรูปที่ 4.18 (b, เส้นประสีเหลือง) สภาวะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 10%

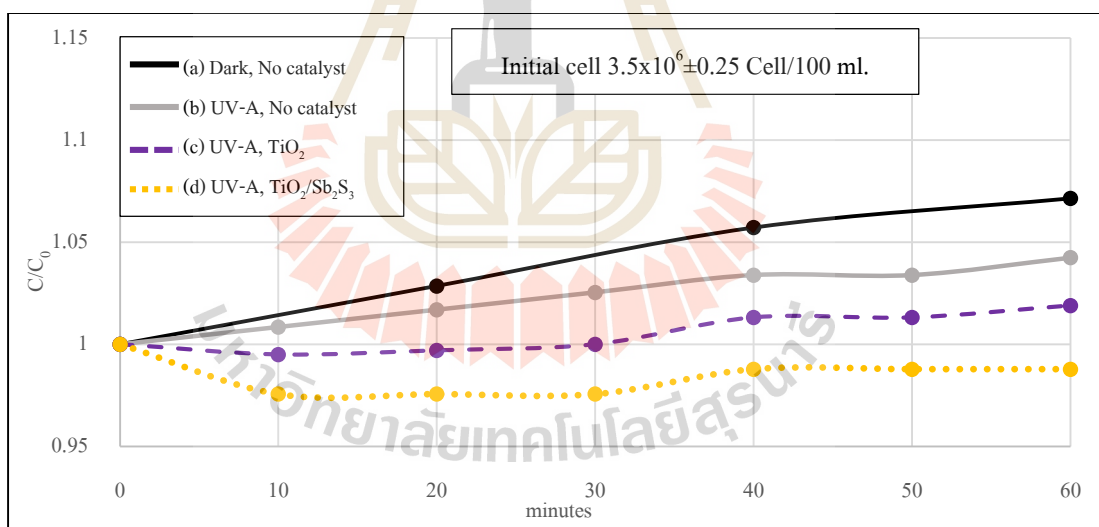
จากข้อมูลข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้มากที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ เนื่องจากการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนนั้น การจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ต้องใช้พลังงานแสงที่สูง (แสงในช่วงยูวี) ซึ่งต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ ที่แอนติโมนิไตรซัลไฟด์นั้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีช่วงแบนด์แกปที่แคบ การใช้พลังงานแสงต่ำ (แสงในช่วงวิซิเบิล) ก็สามารถกระตุ้นทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ ยิ่งถ้าได้รับพลังงานแสงที่สูงขึ้น

(เท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา) อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งมากขึ้น การเกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้นนั้นจะหมายถึงการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลที่มากขึ้น เมื่อไฮดรอกซิลเรดิคัลมากขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์จึงสูงตามไปด้วย ดังนั้นจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ไปทำการศึกษาในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนต่อไป

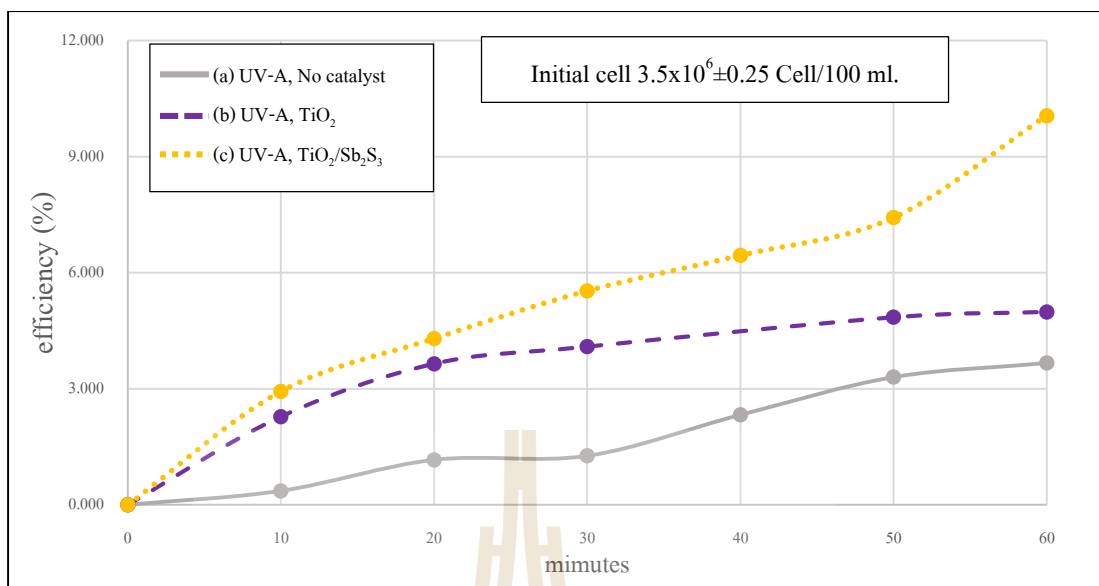
จากที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดแล้ว ข้อมูลข้างต้นสามารถเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ที่ใช้ร่วมกับแสงยูวีเอ และแสงวิซิเบิล (จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1.1) โดยใช้การทดสอบทางสถิติ วิธี pair sample t-test ของประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองแหล่งกำเนิดแสงจะพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองแหล่งกำเนิดแสงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในสถานะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ จะให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่สูงกว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ร่วมกับแสงวิซิเบิล สาเหตุเนื่องมาจากพลังงานของแสงที่แตกต่างกัน โดยแหล่งพลังงานแสงวิซิเบิลนั้น จะมีความยาวคลื่นมาก พลังงานน้อย พลังงานในการกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจึงน้อยกว่าแสงยูวีเอ ที่มีความยาวคลื่นสั้น พลังงานสูง พลังงานในการกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นจึงมาก การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลก็มาก ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงมากขึ้นตามไปด้วย



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



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



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

4.4.2 ผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในการศึกษาผลของพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองหัวข้อที่ 4.4.1 โดยจะนำมาศึกษาเกี่ยวกับการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ตั้งแต่ 0-75 ตารางเซนติเมตร โดยกำหนดอัตราการไหลเท่ากับ 130 มิลลิลิตร/นาที น้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร แหล่งกำเนิดแสง คือ หลอดไฟแสงวิชิเบิลขนาด 10 วัตต์ เตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4 \times 10^8 \pm 1.04$ เซลล์/100 มิลลิลิตร มีผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.19

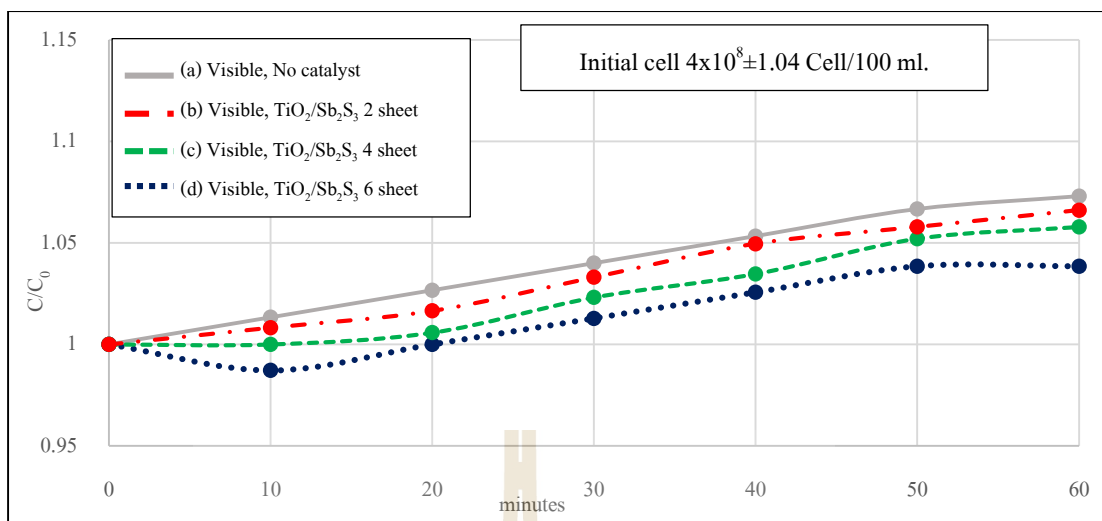
จากผลการทดลองทั้ง 4 สภาวะ คือ รูปที่ 4.19 (a) สภาวะมีแสงวิชิเบิลเพียงอย่างเดียว ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีเทา), รูปที่ 4.19 (b) สภาวะมีแสงวิชิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จำนวน 2 แผ่น พื้นที่ 25 ตารางเซนติเมตร (เส้นประสีแดง), รูปที่ 4.19 (c) สภาวะมีแสงวิชิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จำนวน 4 แผ่น พื้นที่ 50 ตารางเซนติเมตร (เส้นประสีเขียว) และ รูปที่ 4.19 (d) สภาวะมีแสงวิชิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ จำนวน 6 แผ่น พื้นที่ 75 ตาราง

เซนติเมตร (เส้นประสีน้ำเงิน) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนมากขึ้น โดยที่ ระยะเวลา 60 นาทีจะมีปริมาณของจำนวนแบคทีเรียร้อยละ 7.1, 6.6, 5.7 และ 3.3 ตามลำดับ

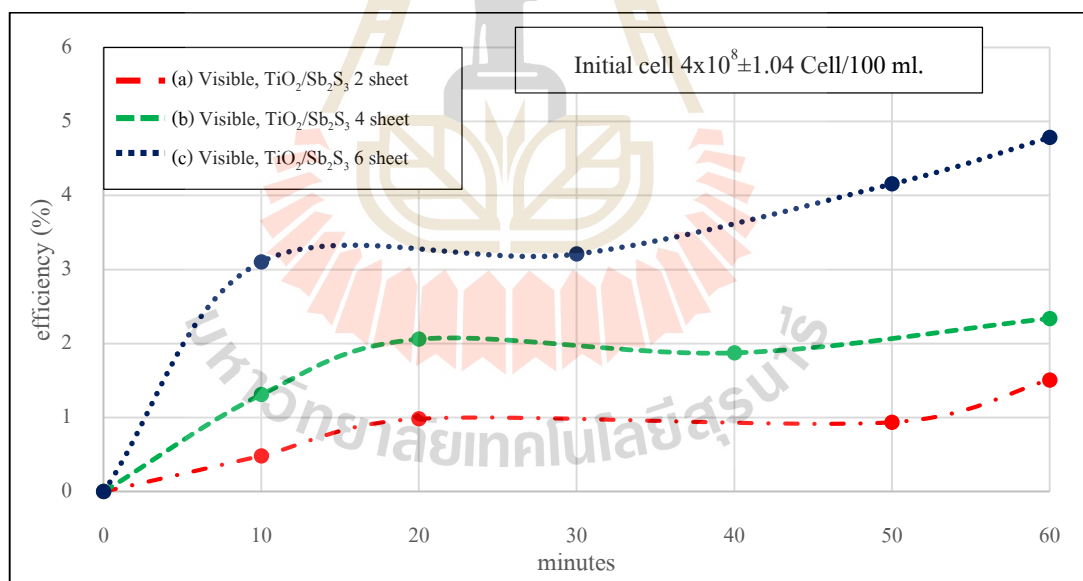
อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียนั้นน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษากการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.20

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

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ยังมีปริมาณของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์มากขึ้น พื้นที่สำหรับการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลก็จะมากขึ้น การเกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่มาก ไฮดรอกซิลเรดิคอลลก็จะมากขึ้น ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่มีพื้นที่ผิว 75 ตารางเซนติเมตร หรือ 6 แผ่น



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E. coli* ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E. coli* กับระยะเวลาของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

4.4.3 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

ในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลอง หัวข้อที่ 4.4.1 และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.2 โดยจะนำมาศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

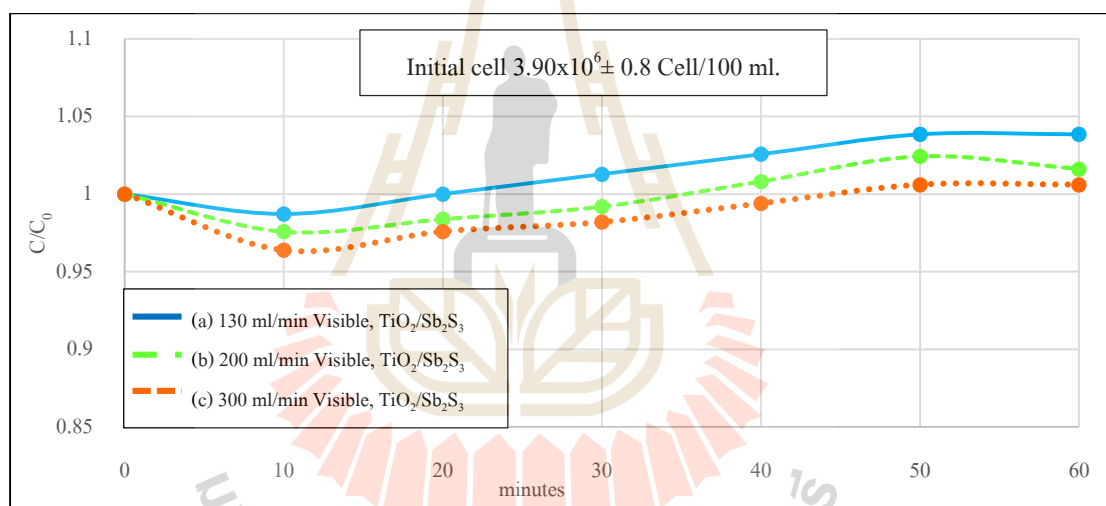
4.4.3.1 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงวิซิเบิลต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ เพื่อให้ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษาผลของอัตราการไหลนี้จึงมุ่งเน้นไปศึกษากับแสงวิซิเบิล โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงคือหลอดไฟแสงวิซิเบิลขนาด 10 วัตต์ โดยเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $3.90 \times 10^6 \pm 0.8$ เซลล์/100 มิลลิลิตร และจะแปรเปลี่ยนอัตราการไหลเท่ากับ 130, 200 และ 300 มิลลิลิตร/นาที่ โดยมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21

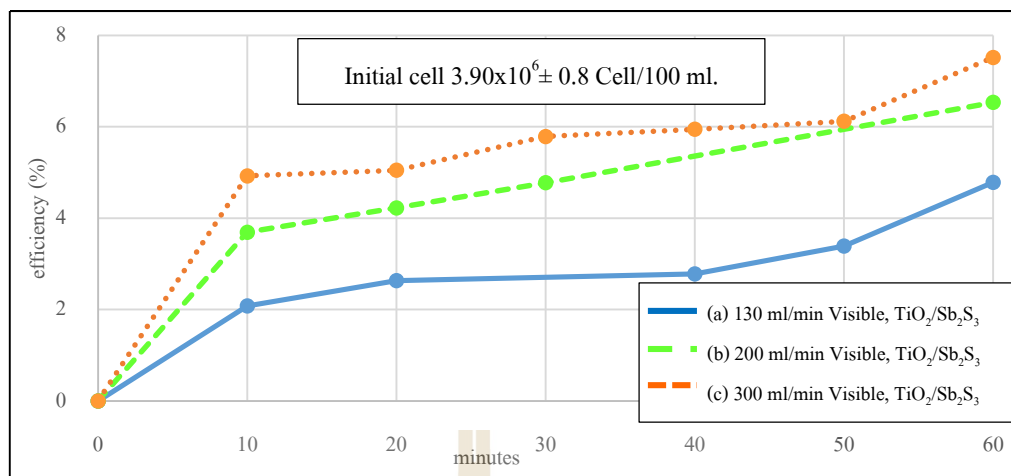
จากผลการทดลองของ 2 สภาวะ คือ รูปที่ 4.21 (a) สภาวะอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ (เส้นทึบสีฟ้า) และรูปที่ 4.21 (b) สภาวะอัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่ (เส้นประสีเขียว) เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นตามระยะเวลา โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของจำนวนเซลล์แบคทีเรียเท่ากับร้อยละ 3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

อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แค่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีน้น้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ซึ่งการศึกษการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตรดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.22

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.21 (a, เส้นทึบสีฟ้า) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 4.7% รูปที่ 4.21 (b, เส้นประสีเขียว) สภาวะที่ใช้ใช้อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 6.5% รูปที่ 4.21 (c, เส้นประสีส้ม) สภาวะที่ใช้ใช้อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 7.5% ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่มากที่สุดคืออัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตร/นาที่



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E. coli* ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลร่วมกับแสงวิซิเบิล



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยน อัตราการไหลร่วมกับแสงวิชีเบิล

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 การใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์จะให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำสูงกว่าการใช้แสงวิชีเบิลในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ 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

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

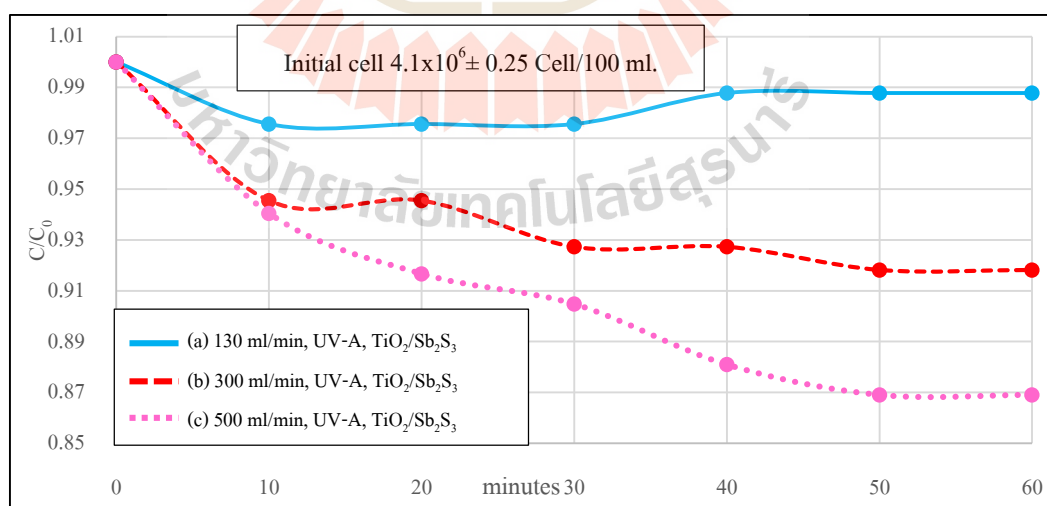
อย่างไรก็ตามหากทำการวิเคราะห์แต่เพียงสภาวะที่ทำการทดลองเพียงสภาวะเดียว ก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่เรื้อรังน้อยมากหรือไม่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เลย จึงต้องทำการศึกษาถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วยการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อในสภาวะที่ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (control) จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 จะมีเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นในระบบประมาณ 5.5×10^4 เซลล์/100 มิลลิลิตรดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.24

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.24 (a, เส้นประสีฟ้า) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 8.8% รูปที่ 4.24 (b, เส้นประสีแดง) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 16.2% รูปที่ 4.21 (c, เส้นประสีชมพู) สภาวะที่ใช้อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 21.2%

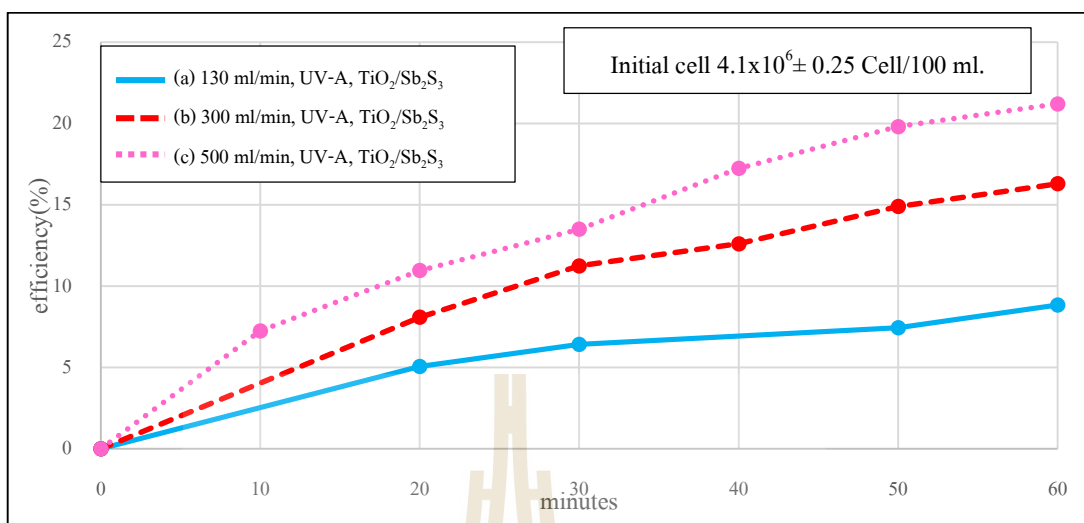
นอกจากนี้ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพของอัตราการไหลน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะใช้การทดสอบทางสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐานว่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของอัตราการไหลที่ 130 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที่ มีความแตกต่างกันจริง โดยจะใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ 2 วิธีคือ 1. ใช้วิธี pair sample t-test เพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหล 3 คู่ คือ อัตราการไหล 130 กับ 300 มิลลิลิตร/นาที่ อัตราการไหล 300 กับ 500 มิลลิลิตร/นาที่ และ อัตราการไหล 130 กับ 500 มิลลิลิตร/นาที่ 2. วิธี ANOVA ใช้ในการเปรียบเทียบตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม จากการทดสอบด้วยวิธี pair sample t-test ของทั้ง 3 คู่ พบว่าให้ผลการทดสอบที่เหมือนกันคือ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่แตกต่างกับ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่แตกต่างกับ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% และ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที่แตกต่างกับ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% การทดสอบด้วยวิธี ANOVA พบว่า

ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของทั้ง 3 อัตราการไหล มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติทั้ง 2 วิธี (ANOVA และ pair sample t-test) ก็ให้ผลการทดสอบที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และจากผลการทดสอบ ANOVA เมื่อดูจากค่าเฉลี่ยเลขที่คณิต (mean) สามารถบอกได้ว่าประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของอัตราการไหลที่ 500 มิลลิลิตร/นาทีก มีค่าสูงสุดสุด รองลงมาเป็นอัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตร/นาทีก และต่ำสุดคืออัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาทีก

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมากสูงขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาทีก > ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาทีก > ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาทีก เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงจะทำให้จำนวนรอบที่น้ำไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมากขึ้นตามไปด้วย จากการคำนวณพบว่า อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาทีก ใน 1 ชั่วโมงน้ำจะไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 75.2 รอบ ในขณะที่การใช้อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาทีก ใน 1 ชั่วโมงน้ำจะไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 15.55 รอบ ซึ่งจำนวนรอบที่ไหลเวียนที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลกับการที่น้ำสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะใช้อัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำสูงที่สุดคือ อัตราการไหลที่ 500 มิลลิลิตร/นาทีก



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E.coli* ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *E.coli* กับระยะเวลาของการแปรเปลี่ยน อัตราการไหลร่วมกับแสงยูวีเอ

4.4.4 ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ

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

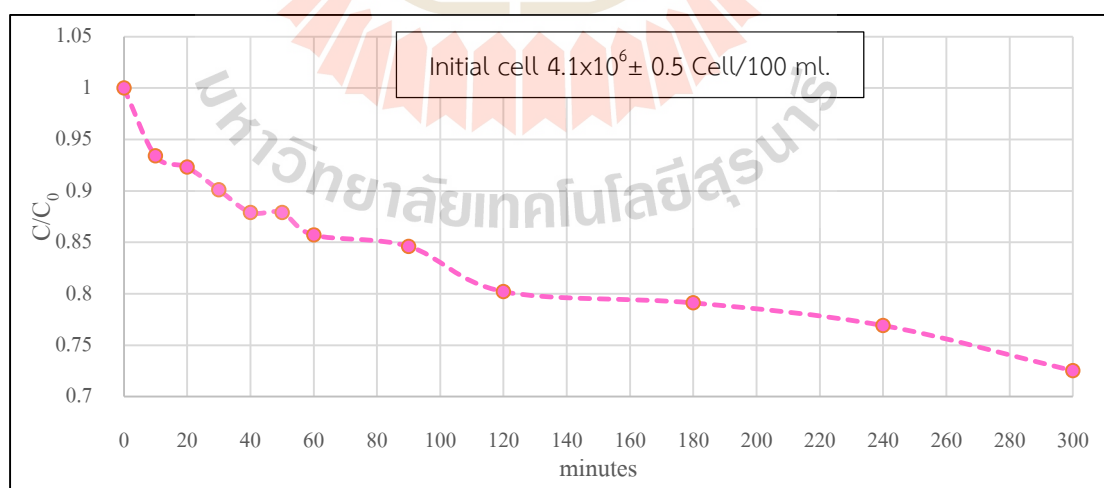
4.4.4.1 ผลของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะเวลา 300 นาที

เนื่องจากในการศึกษาขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาถึงการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลานาน ซึ่งข้อจำกัดในการทดลองนี้คือ ในระหว่างการทดลอง จะไม่สามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เกิดขึ้นในการทดลองได้เลย โดยการทดลองจะต้องมีการเก็บน้ำตัวอย่าง และนำไปหาปริมาณเซลล์แบคทีเรียด้วยวิธี Membrane Filter ที่จะต้องบ่มเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงจะสามารถนับปริมาณโคโลนีที่เกิดขึ้น ถึงจะทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการกำหนดระยะเวลาในการศึกษาต่อเนื่องกัน

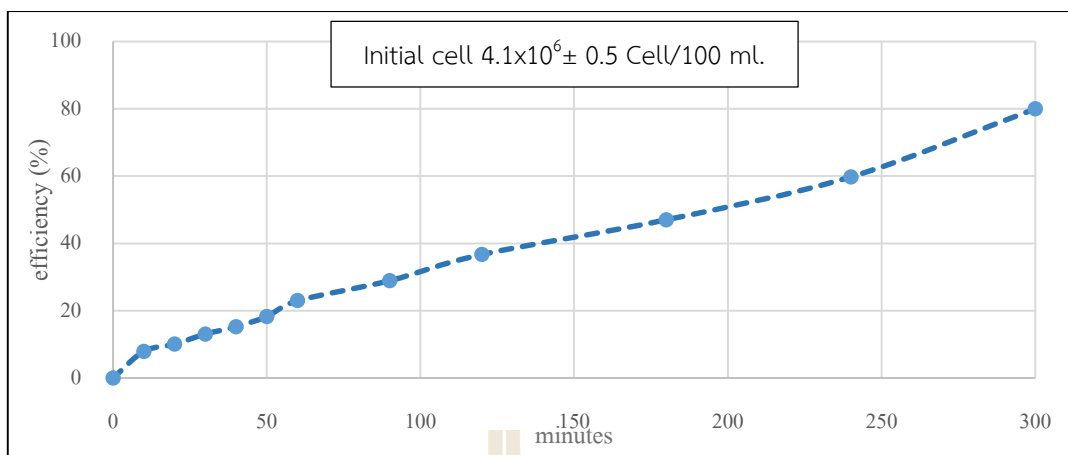
ทั้งหมด 300 นาที และในการศึกษาขั้นตอนนี้จะทำการเตรียมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นประมาณ $4.1 \times 10^6 \pm 0.5$ เซลล์/100 มิลลิลิตร มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงตามระยะเวลา โดยระยะเวลาที่ 300 นาที ปริมาณของจำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงจากเริ่มต้นเป็นร้อยละ 26.5 ซึ่งในการทดลองนี้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์แต่เพียงสถานะที่ทำการทดลองเพียงสถานะเดียวได้ จะต้องคำนึงถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสถานะในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.26

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



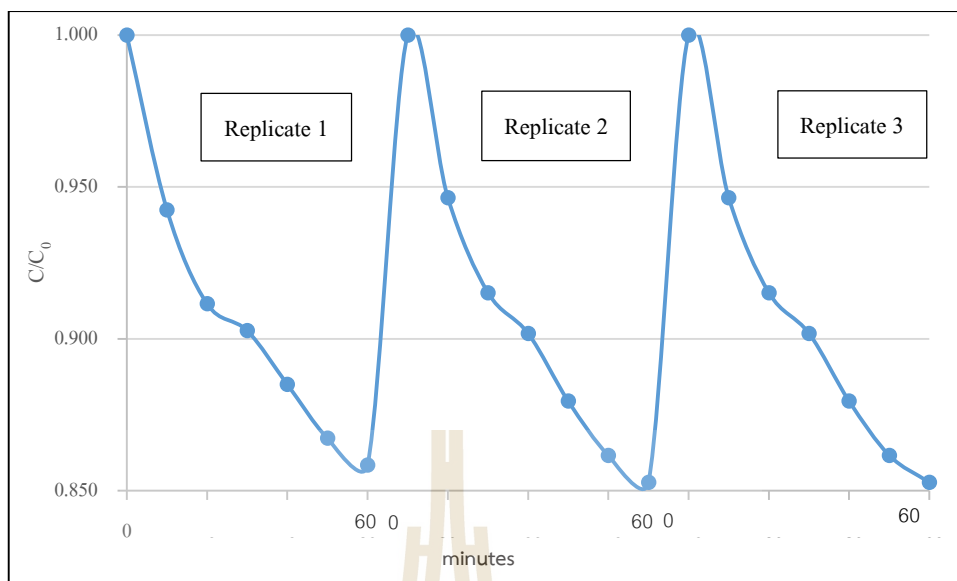
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E. coli* ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องในระยะเวลา 300 นาที



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

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 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์สามารถใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งาน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *E. coli* ที่คงเหลืออยู่กับระยะเวลาของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 3 ครั้ง

4.4.5 ผลของการตอบสนองของแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค (Fecal Streptococcus) ในน้ำ

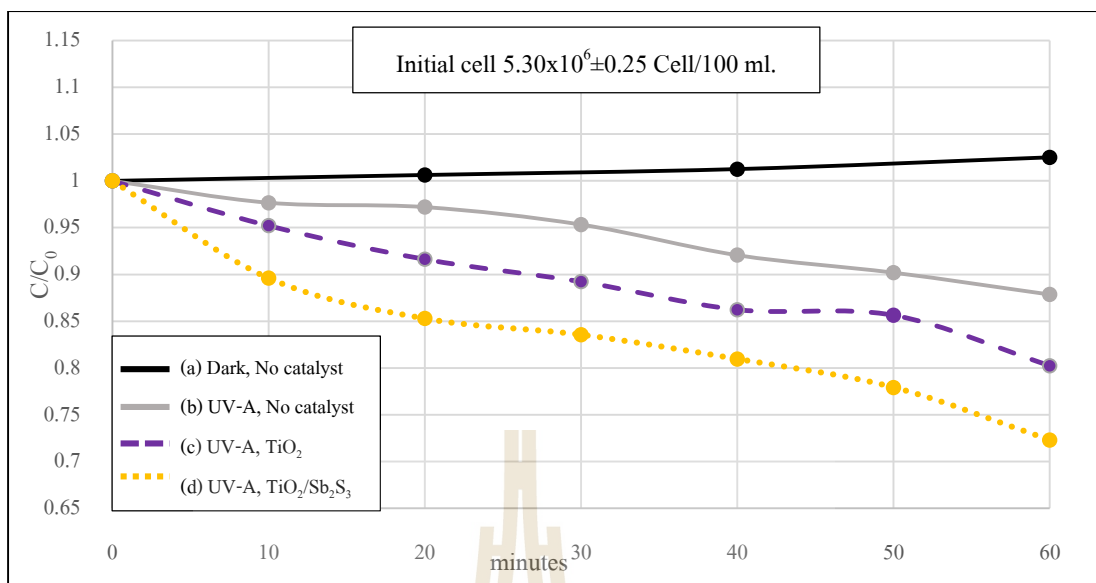
ในการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในขั้นตอนนี้จะใช้แบคทีเรียแกรมบวกคือ แบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* และจะใช้สภาวะที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดจากการทดลองกับเชื้อ *E. coli* คือ การใช้แสงยูวีเอ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร) อัตราการไหลเท่ากับ 500 มิลลิลิตร/นาที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

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.28 (a) สภาวะแรกจะเป็นสภาวะคอนโทรลคือไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นทึบสีดำ) 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 (เส้นทึบสีเทา), รูปที่ 4.28 (c) สภาวะมีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโน (เส้นประสีม่วง), รูปที่ 4.28 สภาวะมีแสงยูวีเอ มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (เส้นประสีเหลือง) จะพบว่าปริมาณของเซลล์แบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ทั้ง 3 สภาวะ เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะลดลงตาม

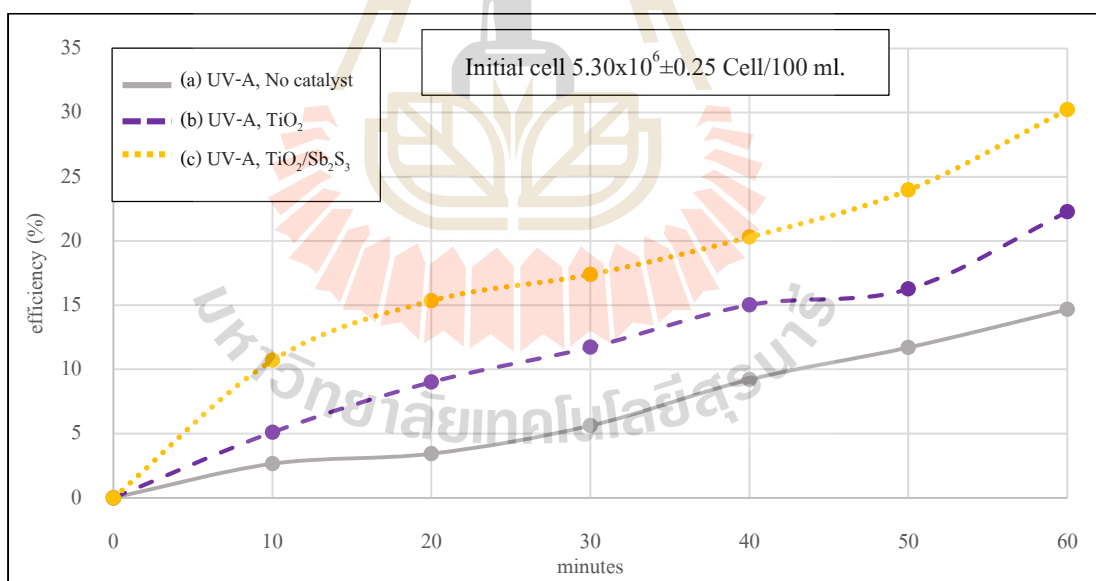
ระยะเวลา โดยที่ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณของเซลล์แบคทีเรียจะลดลงจากเริ่มต้นเป็นร้อยละ 12.2, 19.7 และ 22.2 ตามลำดับ

ซึ่งในการทดลองในขั้นตอนนี้ จะไม่สามารถทำการวิเคราะห์แต่เพียงสถานะที่ทำการทดลองเพียงสถานะเดียวได้ จะต้องคำนึงถึงการเจริญเติบโตของเชื้อในระบบที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วย ดังนั้นจะต้องนำข้อมูลของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในระบบไปลบการกับสถานะอื่น ๆ ในการทดลองก็จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังแสดงในรูปที่ 4.29

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.29 พบว่า รูปที่ 4.29 (a, เส้นทึบสีเทา) สถานะที่ใช้แสงยูวีเอเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 14.6 % รูปที่ 4.29 (b, เส้นประสีม่วง) สถานะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 22.2% และรูปที่ 4.29 (b, เส้นประสีเหลือง) สถานะที่ใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ที่ 60 นาทีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 30.2% ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้



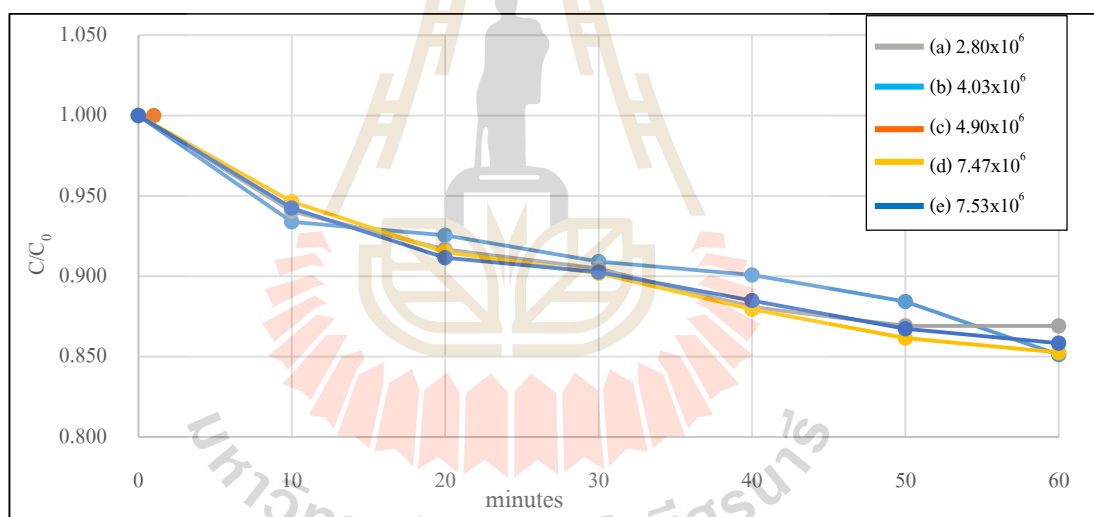
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของจำนวนแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* ที่คงเหลืออยู่ กับระยะเวลาของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรค



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรีย *Fecal Streptococcus* กับเวลาของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงยูวีเอต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

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 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนี-ไตรซัลไฟด์ ขนาด 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร) พลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอขนาด 10 วัตต์ ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที พบว่า ในปริมาณของเชื้อเริ่มต้นในแต่ละค่า เมื่อเวลาผ่านไปมีการลดลงของปริมาณเชื้อโรคอย่างต่อเนื่อง 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/100มิลลิลิตร ระยะเวลา 60 นาที คือร้อยละ 13.1, 14.9, 14.3, 14.7 และ 14.2 ตามลำดับ

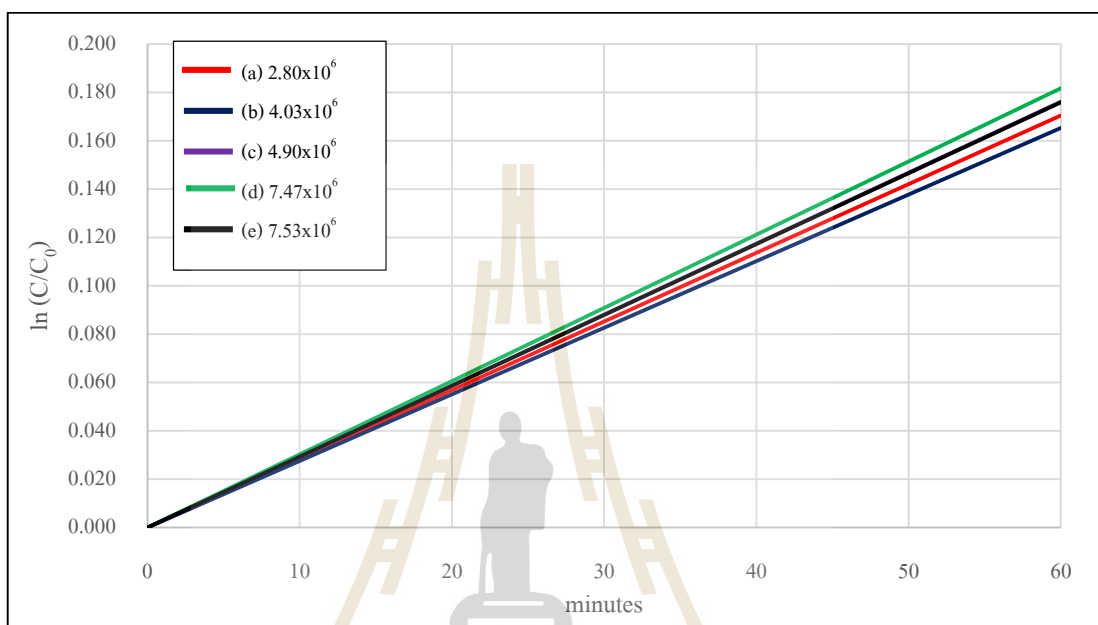


รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกัน

การศึกษาลจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส 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

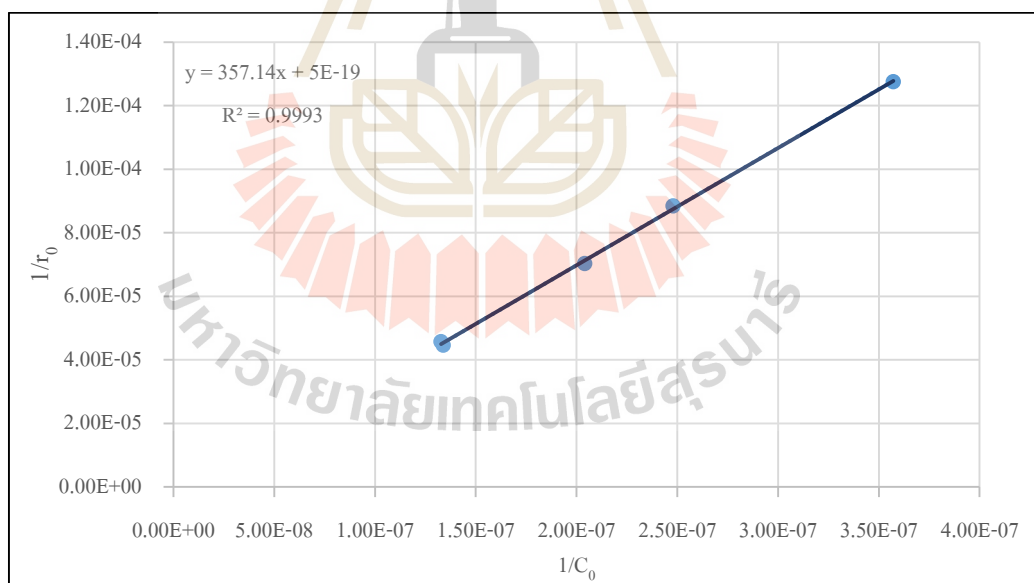
C_0 (เซลล์/ 100 มิลลิลิตร)	k_{app} (นาที)	Initial reaction rate, (r_0) (เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที)	$1/r_0$	$1/C_0$
2.80E+06	0.0028	7.84E+03	3.57E-07	1.28E-04
4.03E+06	0.0028	1.13E+04	2.48E-07	8.85E-05
4.90E+06	0.0029	1.42E+04	2.04E-07	7.04E-05
7.47E+06	0.003	2.24E+04	1.34E-07	4.46E-05
7.53E+06	0.0029	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) กับค่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา r_0 ได้ดังสมการที่ 4.13 และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 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} ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_p) เท่ากับ 2.5×10^5 เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที่ และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 1.4×10^{-21} เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที่

4.6 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

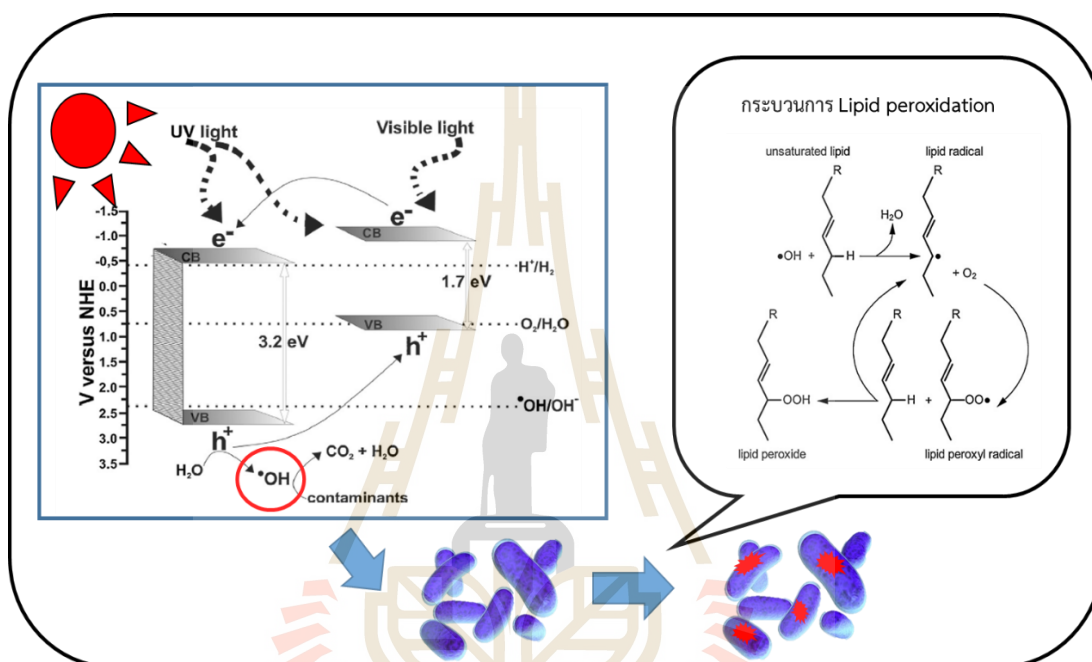
จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กลไกหลักในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมาจากการเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งเกิดหลังจากที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงแล้ว โดยมี $\text{OH}\cdot$ เข้าทำปฏิกิริยาเซลล์ของจุลินทรีย์ โดย *saito et al.*, (1992), *Chun et al.*, (2007) ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระเหล่านี้กับผนังเซลล์ของเชื้อ *E.coli* โดยอนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถทำลายผนังเซลล์และทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนโพแทสเซียมไอออน (K^+) ออกจากเซลล์ สามารถลดอัตราการอยู่รอดของเซลล์ได้สูง อีกทั้งอนุมูลอิสระยังเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบที่เป็นไขมันในส่วนของฟอสโฟลิปิดที่ไม่อิ่มตัว (polyunsaturated phospholipid) ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเซลล์ส่งผลให้เซลล์ตาย คล้ายกับ *Mannes et al.*, (1999), *Hinthong et al.*, (2010) ได้กล่าวถึงการทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ (*E.coli*) ของอนุมูลอิสระจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการทำลายชั้นไขมัน โดยเฉพาะในส่วนของลิพอพอลิซัคคาไรด์ (lipopolysaccharides layer) ของผนังเซลล์ชั้นนอก และชั้นเพพทิโดไกลแคน (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 ($\text{TiOH}\cdot$) 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 ($\text{R}\cdot$) จะสามารถเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่

แบบนี้ไปเรื่อยๆ จนนำไปสู่การทำลายชั้นลิปิดในผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ถูกทำลาย และเกิดการแตกออกของผนังเซลล์ได้



รูปที่ 4.33 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนให้ตอบสนองต่อแสงวิชิเบิล แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อใช้ศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ คือ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา และแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน คือ แสงยูวี และแสงวิชิเบิล 2) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 3) อัตราการไหลผ่านของน้ำบนพื้นผิวดังกล่าว และ 4) การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถสรุปผลการศึกษา ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโน

1) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนด้วยวิธีแอโนดไลซ์เซชันในสารละลายนำไฟฟ้า (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) พบว่าลักษณะของออกไซด์ที่ได้เป็นรูปท่อนเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น เห็นลักษณะท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และในการวิเคราะห์ ร่วมกับการใช้เทคนิค Tube Density จะพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอโนดไลซ์เซชัน โดยการควบคุมสภาวะในการสังเคราะห์ให้เหมือนกันทุกครั้งคือ ค่าศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลา และ ความเข้มข้นของสารละลาย จะมีลักษณะของออกไซด์ที่เกิดขึ้นคล้ายกันทั้งหมด

2) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าเกิดเป็น โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแบบอนาเทส ซึ่งให้การตอบสนองต่อแสงได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น

3) ในการหาปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่าปริมาณของธาตุไทเทเนียม และ ออกซิเจน เป็นร้อยละ 59.950 และ 40.050 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานโนจากแผ่นไทเทเนียมได้

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

5.1.2 สรุปผลการศึกษากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

1) การประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนเป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนให้มีการตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลเพิ่มมากขึ้น โดยจะนำไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน จุ่มลงในสารละลายผสมของเอทานอลที่มี SbCl_3 14 มิลลิโมลาร์และ SnI_2 0.2 มิลลิโมลาร์ พร้อมทั้งฉายแสงลงในทิศทางตั้งฉากกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่า การประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ไม่ได้ทำให้ลักษณะพื้นฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนนั้นเปลี่ยนแปลงไป และในการวิเคราะห์ร่วมกับการใช้เทคนิค Tube Density จะพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์มีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด นอกจากนี้ยังได้ใช้เทคนิค EDX เข้ามาเพื่อศึกษาคำแหน่งของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ ซึ่งพบว่าธาตุแอนติโมนีและซัลเฟอร์ได้กระจายอยู่ทั่วผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

2) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าเกิดเป็นโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ซึ่งให้การตอบสนองต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ดีกว่าโครงสร้างของแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ที่ไม่เกิดผลึก

3) ในการหาปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) โดยการฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะพบปริมาณของธาตุแอนติโมนีและซัลเฟอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติ-

โมนีไตรซัลไฟด์ โดยจะมีปริมาณของธาตุแอนติโมนีและซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา

4) ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectra (DRS) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์โดยการฉายแสงลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่จุ่มอยู่ในสารละลายผสมเป็นระยะเวลา 1, 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าทุกสภาวะจะให้การดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิซิเบิล (ความยาวคลื่นมากกว่า 380 นาโนเมตร) เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน โดยการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิซิเบิลตั้งแต่ 15 นาทีขึ้นไป จะมีค่าดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกัน

5.1.3 สรุปผลการศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนและตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์

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

2) ในสภาวะการใช้แสงวิซิเบิลร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนในการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ พบว่าสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 1.8% และสภาวะใช้แสงวิซิเบิลร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ สามารถสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ถึง 5% ที่เวลา 60 นาที

3) ในสภาวะการใช้แสงยูวีเอร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (*E.coli*) พบว่าสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 3.3% และสภาวะใช้แสงยูวีเอร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตรซัลไฟด์ สามารถสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ถึง 10% ที่เวลา 60 นาที และเมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที สามารถกำจัดเชื้อโรคในน้ำได้ถึง 80%

4) ในการศึกษาพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (*E.coli*) พบว่าการเพิ่มปริมาณของพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่ประดิษฐ์ด้วยแอนติโมนีไตร

ซัลไฟด์ที่มากขึ้น ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยการใช้แสงยูวี-บีลร่วมกับตั้งเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 4.8% ที่เวลา 60 นาที

5) ในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ พบว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ของการใช้แสงยูวีเอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ 21.2% ที่เวลา 60 นาที

6) ในการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลานาน 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% ส่วนการใช้แสงยูวีเอร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่จะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำลงได้ 22.2 % และการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์ร่วมกับแสงยูวีเอจะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำลงได้ 30.2% ที่เวลา 60 นาที

8) จากการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) พบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_p) เท่ากับ 2.5×10^7 เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที และค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 1.4×10^{-21} เซลล์/100 มิลลิลิตร-นาที ซึ่งการที่ค่า $K_L > k_p$ ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนที่ปะติดด้วยแอนติโมนิไตรซัลไฟด์หมายถึงในระบบนี้จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มากกว่าปฏิกิริยาการดูดซับนั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำไปใช้ประโยชน์

ในการทดลองนี้เป็นเพียงการทดลองขั้นเริ่มต้นซึ่งหากจะต้องนำไปใช้งานจริงจะต้องมีการนำผลการศึกษาไปต่อยอดสำหรับทดลองในขั้นตอนต่อไป อย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษาวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ในการศึกษาขั้นต่อไปได้เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลได้ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานาโน สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลานาน ใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งาน และไม่มีการหลุดของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากผ่านการบวนการโฟโตคะตะไลซิส 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 หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากขึ้นต้องเพิ่มพื้นที่ผิวให้ที่มากกว่า 75 ตารางเซนติเมตร (ต้องมีการออกแบบ reactor ใหม่) ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวนั้นจะส่งผลกับการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่จะมีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้น เมื่อคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้น การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลก็จะสูงขึ้น การฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็จะมีความมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

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

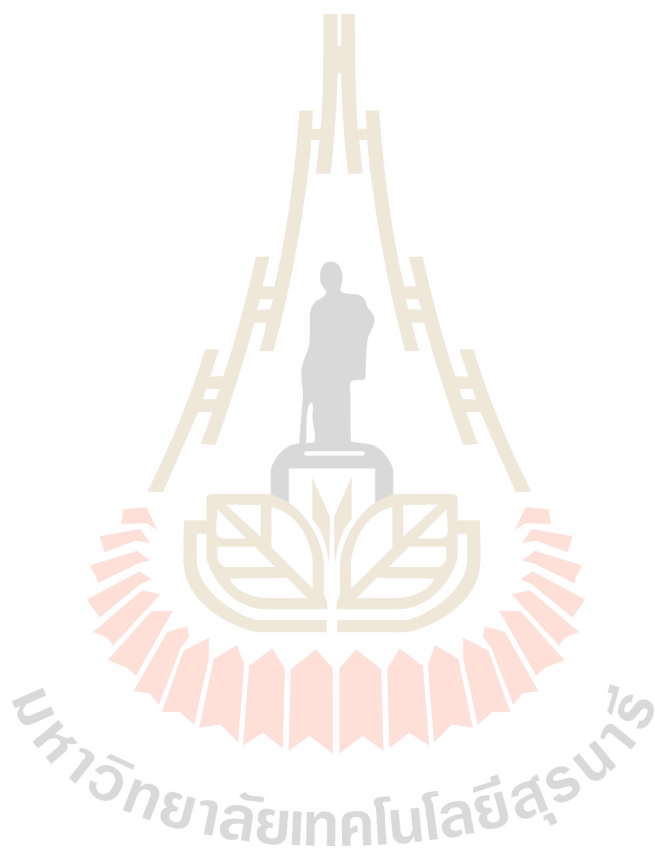
5.2.2 ประเด็นที่ควรทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

1) ในการทดลองนี้ใช้จำนวนเชื้อเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษาที่มีปริมาณที่สูงกว่าเชื้อที่มีอยู่ในน้ำผิวดินที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปา ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปอาจต้องมีการลดปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นลงให้เหมาะสมกับปริมาณของแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำผิวดิน

2) ควรมีการเพิ่มความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของแสงวิซิเบิลและแสงยูวีที่ใช้ในการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

3) ควรทำการศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยกระบวนการโฟคะตะไลซิส เช่น ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส คลอไรด์ ความกระด้าง เป็นต้น

4) อาจมีการศึกษากับน้ำประปา โดยใช้ น้ำที่ออกจากกระบวนการกรองทรายก่อนเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค



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 โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ ดำรงและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ (พิมพ์ครั้งที่ 6) กรุงเทพฯ:สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ
- กองสุขภาพอาหารและสิ่งแวดล้อม. 2549. คู่มือปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์และสุขภาพ. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ
- เกรียงศักดิ์ อุดมโรจน์ศิลป์. (2544). วิศวกรรมการกักน้ำเสีย เล่มที่ 1 กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์
- เกรียงศักดิ์ อุดมโรจน์ศิลป์. (2547). วิศวกรรมการกักน้ำเสีย 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>
- ชื่นจิตต์ บุญเจิด. (2554). เทคนิคพื้นฐานด้านจุลชีววิทยา ชีวเคมีและพันธุวิศวกรรม. สำนักพิมพ์สมาคมเทคโนโลยีชีวภาพแห่งประเทศไทยถาวร วงศ์สันติธรรมนุกูล. คู่มือวิชาการสุขภาพอาหารในชุมชน : โรคและโทษที่เกิดจากการไม่ปฏิบัติตามหลักสุขภาพอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก

เชษฐพันธ์ กภาพแก้ว, สุวรรณ เตียรสุวรรณ และ นิรุติ คุณผล. (2538). การฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล โดยใช้เครื่องกำเนิดแสงอุลตราไวโอเลต กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข

ณัฐพล สุ่มนวงศ์. (2554). การออกซิเดชันแบบเลือกเกิดของคาร์บอนมอนนอกไซด์ในกระโหลกไซโครเตอรัมเข้มข้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/CeO_2 . วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 110 น.

ณัฐพันธุ์ สุกภา. ไซปรีศานาโนเทคโนโลยี. สมบัติทางแม่เหล็กอันแปลกประหลาด. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. จาก <http://vcharkarn.com/varticle/324>

ถาวร วงศ์สันติธรรมนุกูล. (2529). คู่มือวิชาการสุขาภิบาลอาหารในชนบท : โรคและโทษที่เกิดจากการไม่ปฏิบัติตามหลักสุขาภิบาลอาหาร ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก

ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล. (2554). วิศวกรรมประปา กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. (2541). จุลชีววิทยาทั่วไป. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ, ปรีชา สุวรรณพินิจ. (2548). จุลชีววิทยาทั่วไป กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร. (2548). การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 72 น.

ประกอบ วิโรจน์กัญ. (2539). อุทกวิทยาของน้ำผิวดิน ขอนแก่น:คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ประพัฒน์ เป็นตามวา. (2555). การประปาชุมชนเมืองและชนบท นครราชสีมา: สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกูล. (2557). นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม (environmental nanotechnology). (พิมพ์ครั้งที่ 1). พิษณุโลก. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

พิจิต สกุดพราหมณ์.. (2525) สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ บารมีการพิมพ์

มันสิน ตัลทุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมประปา เล่มที่ 1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- วัฒนาลัย ปานบ้านเกร็ด. (2554). **หนังสือชุดเทคโนโลยีชีวภาพ เรื่อง เทคนิคพื้นฐานด้านจุลชีววิทยา** ชีวเคมีและพันธุวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สมาคมชีวภาพแห่งประเทศไทย
- วิรัช มณีสาร. (2538). **ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะอากาศตามฤดูกาลของภาคต่าง ๆ ในประเทศไทย**. เอกสารวิชาการเลขที่ 551.582-02-2538, ISBN: 974-7567-25-3
- วีระชัย โชควิณูญ. (2530). **เทคนิคการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์
- ศรัณญา ทองอุ่น. (2555). การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 79 น.
- ศุภยงค์ วรวิฑูคุณชัย. (2547). **การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สำนักอนามัยและสิ่งแวดล้อม. (2551). **คู่มือวิชาการอนามัยสิ่งแวดล้อมพื้นฐานสำหรับเจ้าพนักงานสาธารณสุข** กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก
- สิทธิชัย ดันชนะศฤกษ์. (2549). **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำ** กรุงเทพฯ : ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สุจิตรา นาวารัตน์. (2553). การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส การใช้รังสีไวโอเล็ตซีและการเติมคลอรีน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**. 88 น.
- สุรียลักษณ์ รอดทอง. (2540). **ปฏิบัติการจุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม**. สาขาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุวณี สุกเวชย์, มาลัย วรจิตร. (2536). **แบคทีเรียพื้นฐาน** พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ศิริยอ
- 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 (Sb₂S₃) 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 TiO₂ 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., Iriate-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 TiO₂ 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). TiO₂ 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 TiO₂ 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 TiO₂ metal membrane. **Desalination** 279: 359 – 366.
- Chun Hu., Jian Guo., Jiuhui Qu., and Xuexiang Hu. (2007). Photocatalytic Degradation of Pathogenic Bacteria with AgI/TiO₂.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 Fragedaki., 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.
- DeTaconi, 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 Chinese 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). **Applied Hydrology**. 4th Edition. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall.
- Freuze, I., Brosillin, S. Laplanche, A., Tonzza, D., Cavard, J. (2005). Effect of chlorination on the formation of odorous disinfection by-products. **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. Microbiol** 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). Sb_2S_3 surface modification induced remarkable enhancement of TiO_2 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 TiO_2 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. Trotsb, 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 TiO_2 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 TiO_2 (brookite, rutile and brookite - based) powders prepared by thermo hydrolysis of $TiCl_4$ 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 TiO_2 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 $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ 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 TiO_2 thin film on plant pathogens. **Surface & Coatings Technology** 201: 6886-6888.
- Yu, Y., Wang, J. and Parr, J. F. (2012). Preparation and properties of TiO_2 / 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 TiO_2 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 TiO_2 nanotubes upon decoration with Sb_2S_3 microcrystalline. **Materials Characterization** 109: 95–99



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโตะตะไลซิส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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* ของการหาจำนวนแบคทีเรียเริ่มต้นด้วยวิธีการความขุ่นของเซลล์ (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 ตารางบันทึกผลการศึกษาการเจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1

สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่, 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	2.83E+00	-5	40	42.5	4.25E+08	3.54E+00
	-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+00	-5	52	49.5	4.95E+08	3.54E+00
	-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	1.41E+00	-5	51	53	5.30E+08	2.83E+00
	-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	4.95E+00	-5	68	66	6.60E+08	2.83E+00
	-5	65				-5	64			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>		-	-	-6	20>		-	-

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

สภาวะ: 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	1.41E+00	-5	35	33	3.30E+08	2.83E+00
	-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	4.95E+00	-5	57	54	5.40E+08	4.24E+00
	-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	2.12E+00	-5	62	63.5	6.35E+08	2.12E+00
	-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	2.83E+00	-5	65	67.5	6.75E+08	3.54E+00
	-5	68				-5	70			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-

ก.5 ตารางบันทึกผลการศึกษากการเจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรีย *E.coli* ด้วยการนับจำนวนแบคทีเรียโคลิ-ฟอร์มทั้งหมดและฟีคัล โคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3

สภาวะ: ไม่มีแสง ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที, 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	2.12E+00	-5	38	37	3.70E+08	1.41E+00
	-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	2.12E+00	-5	51	50	5.00E+08	1.41E+00
	-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	2.12E+00	-5	62	64	6.40E+08	2.83E+00
	-5	57				-5	66			
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
	-6	20>	-	-	-	-6	20>	-	-	-
60 min	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-4	>80	-	-	-	-4	>80	-	-	-
	-5	70	68	6.80E+08	2.83E+00	-5	69	69.5	6.95E+08	7.07E-01
	-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:
แสงVisible, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 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/นาทึ, 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/นาทึ, 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 ~ 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
สถานะ: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/นาท, 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
สถานะ: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 ~ 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		-	-	-	-
	-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/นาทึ, ปริมาณเชื้อเริ่มต้น ~
 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+0 5
	-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	โคโค นี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	40	37.33333 3	2.516611 5	4.00E+06	3.73E+06	2.52E+0 5
	-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+0 5
	-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+0 5
	-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						
	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	38	39.666667	1.5275252	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>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	38	39.666667	1.5275252	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>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-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						
	dilution	โคโลนี	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+05
	-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+05
	-3	32			3.20E+06		
	-3	40			4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	

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

time	fecal coliform						
	dilutio n	โคโล นี	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+0 5
	-3	60			6.00E+06		
	-3	59			5.90E+06		
10 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	57	59.66666 7	2.516611 5	5.70E+06	5.97E+06	2.52E+0 5
	-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+0 5
-3		57			5.70E+06		
-3		60			6.00E+06		

ก.16 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ
สถานะ:แสง แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น 0^6
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	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		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.16 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ
 สภาวะ: แสง UV-A, ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที, เชื้อเริ่มต้น ~ 10⁶
 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+0 5
	-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	61.3333 33	6.5064 071	6.80E+06	6.13E+06	6.51E+0 5
	-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/นาทึ, 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	51.6666 67	3.511884 6	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	51.6666 67	1.527525 2	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	โคโค นี	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	53.666667	2.5166115	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						
	dilution	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	58	54.66666	3.511884	5.80E+06	5.47E+06	3.51E+0
	-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	54.66666	5.507570	6.00E+06	5.47E+06	5.51E+0
	-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	โคโค นี	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	37.66666 7	1.527525 2	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	37.66666 7	2.516611 5	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	38.66666	6.506407	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	โคโค นี	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	38.666667	3.511884	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, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$, 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.
20 min	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
30 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	39.666667	2.5166115	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>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

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	40.66666	1.527525	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+0
	-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	40.66666	2.516611	3.80E+06	4.07E+06	2.52E+0
	-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						
	dilutio n	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	39	40	1	3.90E+06	4.00E+06	1.00E+0 5
	-3	41		1	4.10E+06		
	-3	40		1	4.00E+06		
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	40.66666 7	2	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+0 5
	-3	39		2	3.90E+06		
	-3	41		2	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, 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	36	40.666667	4.5092498	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	6.5574385	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 ~ 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	40.3333 33	0.577350 3	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	40.6666 67	2.081666	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	41.666 667	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42		3.511884 6	4.20E+06	4.17E+06	3.51E+0 5
	-3	45		4.50E+06			
	-3	38		3.80E+06			
40 min	-2	>80	42.333 333	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	45		2.516611 5	4.50E+06	4.23E+06	2.52E+0 5
	-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	โคโค นี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	43	42.66666 7	2.516611 5	4.30E+06	4.27E+06	2.52E+0 5
	-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	3.605551 3	4.70E+06	4.30E+06	3.61E+0 5
	-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	โคโตนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
0 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	50	57.66666 7	7.505553 5	5.00E+06	5.77E+06	7.51E+0 5
	-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	57.66666 7	2.081666	5.60E+06	5.77E+06	2.08E+0 5
	-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+0 5
	-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+0 5
	-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	59.6666 67	2.08166 6	5.90E+06	5.97E+06	2.08E+0 5
	-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/นาทึ, 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/นาทึ, ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น (75 ตารางเซนติเมตร)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโตนี	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	38.333333	3.511884	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/นาที่, 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	39.33333 3	2.516611 5	4.20E+06	3.93E+06	2.52E+0 5
	-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+0 5
	-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/นาทึ, 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	40.33333	2.516611	3.80E+06	4.03E+06	2.52E+05
	-3	43	3	5	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	โคโคโคนี	เจ็ลลี่	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เจ็ลลี่, 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	38.666667	3.5118846	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	39.6666 67	2.516611 5	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: สภาวะแสง 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	40.3333 33	1.527525 2	4.20E+06	4.03E+06	1.53E+0 5
	-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	40.3333 33	2.516611 5	3.80E+06	4.03E+06	2.52E+0 5
	-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	6.557438 5	4.10E+06	4.20E+06	6.56E+0 5
	-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+0 5
	-3	41			4.10E+06		
	-3	43			4.30E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	40	41.3333 33	3.214550 3	4.00E+06	4.13E+06	3.21E+0 5
	-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	41.6666 67	2.081666	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	42.3333 33	1.527525 2	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: สภาวะแสง 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	4.3588989	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	42.6666667	3.2145503	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	40.6666667	1.5275252	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: สภาวะ:แสง visible, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilution	โคโค นี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	36	40.66666 7	4.509249 8	3.60E+06	4.07E+06	4.51E+0 5
	-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	40.66666 7	5.507570 5	3.50E+06	4.07E+06	5.51E+0 5
	-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, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 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+0 5
	-3	41		1	4.10E+06		
	-3	40		1	4.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	42	40.6666 67	1.527525 2	4.20E+06	4.07E+06	1.53E+0 5
	-3	39		1.527525 2	3.90E+06		
	-3	41		1.527525 2	4.10E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
-4	20>	-		-	-	-	
50 min	-2	>80	-	-	-	-	

ก.30 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ: สภาวะแสง UV-A, 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	36	40.6666 67	4.509249 8	3.60E+06	4.07E+06	4.51E+0 5
	-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	40.6666 67	5.507570 5	3.50E+06	4.07E+06	5.51E+0 5
	-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	36.6666 67	2.309401 1	3.40E+06	3.67E+06	2.31E+0 5
	-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	34.6666 67	3.055050 5	3.80E+06	3.47E+06	3.06E+0 5
	-3	34			3.40E+06		
	-3	32			3.20E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	35	34.6666 67	4.509249 8	3.50E+06	3.47E+06	4.51E+0 5
	-3	30			3.00E+06		
	-3	39			3.90E+06		

ก.31 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น, อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

time	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
20 min	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
30 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	30			3.00E+06		
	-3	34	34	4	3.40E+06	3.40E+06	4.00E+05
	-3	38			3.80E+06		
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
40 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	0			0.00E+00		
	-3	37	24	20.8086 52	3.70E+06	2.40E+06	2.08E+06
	-3	35			3.50E+06		6
	-4	30		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
50 min	-2	>80		-	-	-	-

ก.31 ตารางบันทึกผลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ: สภาวะ:แสง UV-A, $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 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	33.6666 67	4.509249 8	3.40E+06	3.37E+06	4.51E+0 5
	-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	33.6666 67	1.527525 2	3.20E+06	3.37E+06	1.53E+0 5
	-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	2.645751 3	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	26.3333 33	2.516611 5	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	25.6666 67	2.516611 5	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	25.3333 33	3.785938 9	2.70E+06	2.53E+06	3.79E+0 5
	-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	24.6666 67	3.214550 3	2.10E+06	2.47E+06	3.21E+0 5
	-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	24.3333 33	2.516611 5	2.40E+06	2.43E+06	2.52E+0 5
	-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	24.3333 33	1.154700 5	2.50E+06	2.43E+06	1.15E+0 5
	-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 กรณิที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในระยะ 300 นาที สภาวะ:แสง 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	46	40.3333 33	4.932882 9	4.60E+06	4.03E+06	4.93E+0 5
	-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	37.6666 67	1.527525 2	3.90E+06	3.77E+06	1.53E+0 5
	-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	37.3333 33	1.527525 2	3.70E+06	3.73E+06	1.53E+0 5
	-3	39			3.90E+06		
	-3	36			3.60E+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)

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	36.6666 67	4.163332	3.20E+06	3.67E+06	4.16E+0 5
	-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	36.3333 33	2.309401 1	3.90E+06	3.63E+06	2.31E+0 5
	-3	35			3.50E+06		
	-3	35			3.50E+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	fecal coliform						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-3	35	35.6666 67	1.154700 5	3.50E+06	3.57E+06	1.15E+0 5
	-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	34.3333 33	3.055050 5	3.50E+06	3.43E+06	3.06E+0 5
	-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	33.6666 67	2.309401 1	3.10E+06	3.37E+06	2.31E+0 5
	-3	35			3.50E+06		
	-3	35			3.50E+06		
	-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	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	32.333 333	2.516611 5	3.20E+06	3.23E+06	2.52E+0 5
	-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	2.645751 3	3.10E+06	3.20E+06	2.65E+0 5
	-3	35			3.50E+06		
	-3	30			3.00E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
240 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	33	31	2.645751 3	3.30E+06	3.10E+06	2.65E+0 5
	-3	32			3.20E+06		
	-3	28			2.80E+06		

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)

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	29.6666	3.214550 3	3.20E+06	2.97E+06	3.21E+0 5
	-3	31	67		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 กรณิที่ใชตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_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			7.90E+06		
	-3	75	75.3333	3.511884	7.50E+06	7.53E+06	3.51E+0
	-3	72	33	6	7.20E+06		5
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
	-4	20>		-	-	-	-
10 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	75			7.50E+06		
	-3	70	71	3.605551	7.00E+06	7.10E+06	3.61E+0
	-3	68		3	6.80E+06		5
20 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	71			7.10E+06		
	-3	66	68.6666	2.516611	6.60E+06	6.87E+06	2.52E+0
	-3	69	67	5	6.90E+06		5

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	2.645751	6.90E+06	6.80E+06	2.65E+05
	-3	70		3	7.00E+06		
	-3	65			6.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
40 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	73	66.6666 67	5.686240	7.30E+06	6.67E+06	5.69E+05
	-3	62		7	6.20E+06		
	-3	65			6.50E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
	-4	20>	-	-	-	-	-
50 min	-2	>80	-	-	-	-	-

ก.35 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณิที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง 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.
50 min	-3	68	65.3333 33	2.516611 5	6.80E+06	6.53E+06	2.52E+0 5
	-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	64.6666 67	6.429100 5	6.00E+06	6.47E+06	6.43E+0 5
	-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, TiO_2/Sb_2S_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	74.6666 67	3.055050 5	7.40E+06	7.47E+06	3.06E+0 5
	-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	70.6666 67	2.081666	7.00E+06	7.07E+06	2.08E+0 5
	-3	73			7.30E+06		
	-3	69			6.90E+06		
20 min	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80		-	-	-	-
	-3	71	68.3333 33	2.516611 5	7.10E+06	6.83E+06	2.52E+0 5
	-3	68			6.80E+06		
	-3	66			6.60E+06		

ก.36 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_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	67.3333 33	2.516611 5	6.70E+06	6.73E+06	2.52E+0 5
	-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	65.6666 67	3.511884 6	6.20E+06	6.57E+06	3.51E+0 5
	-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 กรณิที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_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	64.3333 33	8.144527 8	5.50E+06	6.43E+06	8.14E+0 5
	-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	63.6666 67	1.527525 2	6.40E+06	6.37E+06	1.53E+0 5
	-3	65			6.50E+06		
	-3	62			6.20E+06		
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	
	-4	20>	-	-	-	-	

ก.37 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณิที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น, อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ครั้ง
ที่ 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	6.557438 5	5.00E+06	4.90E+06	6.56E+0 5
	-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	46.3333 33	3.511884 6	4.30E+06	4.63E+06	3.51E+0 5
	-3	50			5.00E+06		
	-3	46			4.60E+06		
20 min	-2	>80		-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-2	>80	-	-	-	-	-
	-3	41	44.6666 67	3.511884 6	4.10E+06	4.47E+06	3.51E+0 5
	-3	48			4.80E+06		
	-3	45			4.50E+06		

ก.37 ตารางบันทึกผลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค (*E.coli*) ในน้ำ กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้ง สภาวะ:แสง UV-A, TiO_2/Sb_2S_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	43.3333 33	2	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, TiO_2/Sb_2S_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	42.6666 67	5.507570 5	4.80E+06	4.27E+06	5.51E+0 5
	-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	35.3333 33	14.22439 2	1.90E+06	3.53E+06	1.42E+0 6
	-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	2.645751 3	5.50E+06	5.30E+06	2.65E+0 5
	-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	53.333 333	3.055050 5	5.40E+06	5.33E+06	3.06E+0 5
	-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	53.666 667	1.527525 2	5.40E+06	5.37E+06	1.53E+0 5
	-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 2.081666	2.081666	5.50E+06	5.43E+06	2.08E+0 5
	-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	71.333 333	1.527525 2	7.30E+06	7.13E+06	1.53E+0 5
	-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	69.666 667	2.516611 5	7.00E+06	6.97E+06	2.52E+0 5
	-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	69.333 333	4.509249 8	6.90E+06	6.93E+06	4.51E+0 5
	-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	8.544003	7.90E+06	7.00E+06	8.54E+0
	-2	69		7	6.90E+06		5
	-2	62		-	6.20E+06		-
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
	-3	20>		-	-	-	-
40 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-1	>80		-	-	-	-
	-2	60	65.666 667	6.027713	6.00E+06	6.57E+06	6.03E+0
	-2	72		8	7.20E+06		5
	-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	64.333 333	4.041451 9	6.80E+06	6.43E+06	4.04E+0 5
	-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	62.666 667	3.055050 5	6.00E+06	6.27E+06	3.06E+0 5
	-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	55.666 667	3.055050 5	5.90E+06	5.57E+06	3.06E+0 5
	-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	3.605551 3	5.40E+06	5.30E+06	3.61E+0 5
	-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	2.645751 3	5.40E+06	5.10E+06	2.65E+0 5
	-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	49.666 667	7.094598 9	5.60E+06	4.97E+06	7.09E+0 5
	-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+0 5
	-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	47.666 667	2.516611 5	5.00E+06	4.77E+06	2.52E+0 5
	-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	44.666 667	3.511884 6	4.80E+06	4.47E+06	3.51E+0 5
	-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	2.6457513	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	65.666667	3.5118846	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	64.333333	4.0414519	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	62.333333	3.7859389	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)

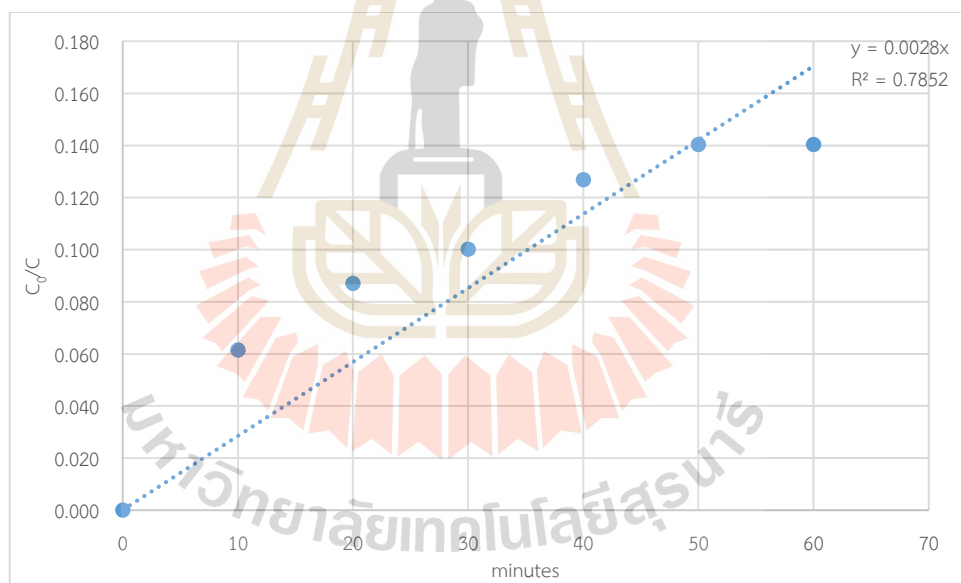
time	Fecal Streptococcus						
	dilute	โคโลนี	เฉลี่ย	S.D.	เซลล์/100 มิลลิลิตร	เฉลี่ย,เซลล์/100 มิลลิลิตร	S.D.
50 min	-2	60	60	2	6.00E+06	6.00E+06	2.00E+0 5
	-2	58			5.80E+06		
	-2	62			6.20E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
	-3	20>	-	-	-	-	
60 min	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80	-	-	-	-	-
	-1	>80	-	-	-	-	-
	-2	52	55.666 667	3.214550 3	5.20E+06	5.57E+06	3.21E+0 5
	-2	58			5.80E+06		
	-2	57			5.70E+06		
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>	-	-	-	-	-
	-3	20>	-	-	-	-	-

ก.43 ตารางบันทึกผลของการตอบสนองของแสงยูวีต่อการฆ่าเชื้อโรค (*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

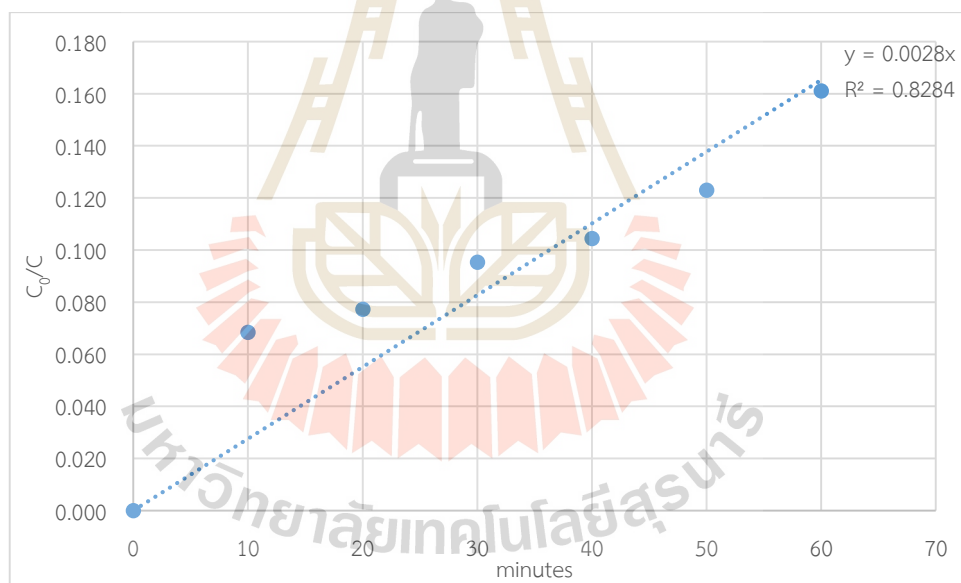
ก.44 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลบลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $2.80E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

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



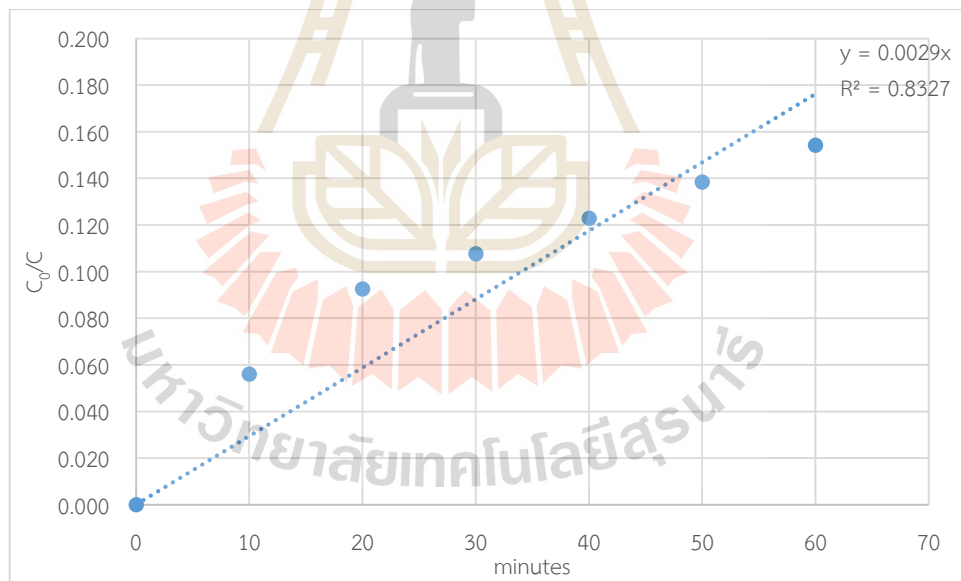
ก.45 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลพดศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $4.03E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

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



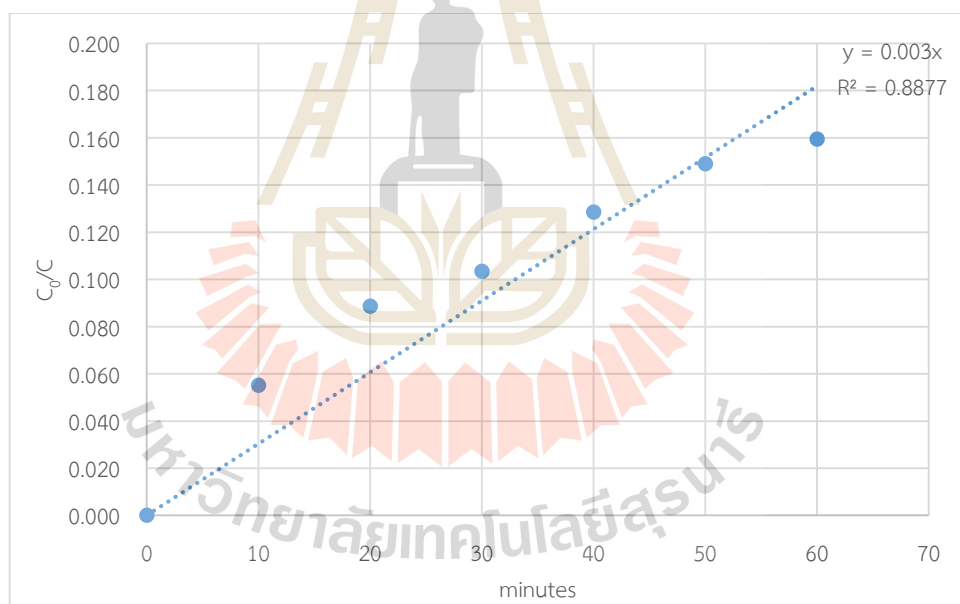
ก.46 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลผลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $4.90E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

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



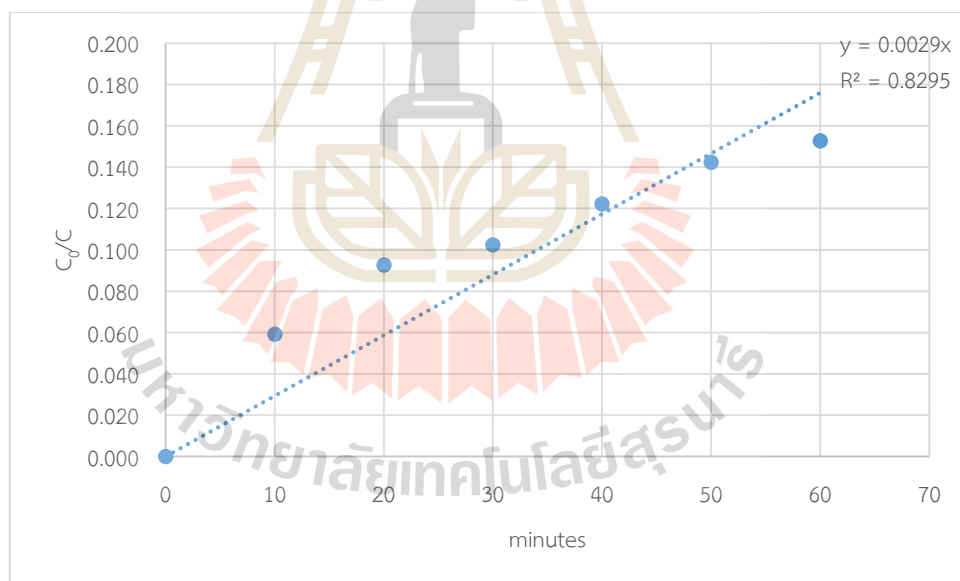
ก.47 ตารางบันทึกผลและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C_0 กับระยะเวลาของการศึกษาจน
 ลบลศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำ ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น $7.07E+06$ เซลล์/100 มิลลิลิตร

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
 ลพดศาสตร์ต่อการฆ่าเชื้อโรค (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 คือ ช่วงระยะเวลาในการแบ่งเซลล์แต่ละครั้งเพื่อให้ได้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าต่อหน่วยเวลา 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_c จะได้

$$C1 = \left[\frac{\text{time}}{563.37 \times 3.3} \right] + \log C_0 \quad (\text{ข-2})$$

และ take 10^x เพื่อถอด log ออก จะได้

$$C_c = 10^{(C1)} \quad (\text{ข-3})$$

ซึ่งจะในการทดลองจะใช้สองสมการนี้ เพื่อคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นยก
อย่างดังนี้

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสภาวะ ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นในการ
ทดลองเท่ากับ 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 สมมติให้เป็นนาที่ที่ 0

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

จากสมการ ข-3

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

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

และเช่นกัน ในเวลาที่ 10,20,30,40,50 และ 60 นาที ก็จะใช้การคำนวณที่ส่ายกันกับนาที่ 0 จะได้
ตาราง ค.1

ข.1 ข้อมูลการคำนวณการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในสภาวะ ไม่มีแสงไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา

time	สูตรคำนวณ (C1) สมการที่ (ข-2)	(C _c) 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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

ไม่มีแสง, ไม่มีแผ่น				แสงยูวีอ ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา					แสงยูวีอ แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน					แสงยูวีอ แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติโมนี 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 วิชิตเบิล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที
ตัวเร่งปฏิกิริยา 6 แผ่น

ไม่มีแสง, ไม่มีแผ่น				แสงวิชิตเบิล ไม่มีแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา					แสงวิชิตเบิล แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนานา					แสงวิชิตเบิล 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	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		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		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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)



ค.3 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของพื้นที่ของปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงวิซิเบิล อัตรากาไรไหล 130 มิลลิลิตร/นาที 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	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}x100
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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ก.4 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของพื้นที่ของปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงวิชิเบิล อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 4 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				TiO_2/Sb_2S_3 4 แผ่น				
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}x100
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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.5 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของพื้นที่ของปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรค สภาวะ แสงวิซิเบิล อัตรากาไรไหล 130 มิลลิลิตร/นาที 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	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}x100
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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

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

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				Visible 130 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}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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

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

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				Visible 200 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}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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

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

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				Visible 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}x100
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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.9 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะยูวีเอ อัตราการไหล 130 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น				UVA 130 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}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 จำนวน ใช้สมการที่ (ข-2) และ คอลัมน์ cell/100 ml ใช้สมการ (ข-3)

ค.10 ข้อมูลของประสิทธิภาพการในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สภาวะยูวีเอ 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}x100
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 สภาวะยูวีเอ 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}x100
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	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}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
 สภาวะ ยูวีเอ อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/Sb_2S_3 6 แผ่น

ไม่มีแสง ไม่มีแผ่น			แสงยูวีเอ, แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา				แสงยูวีเอ, โฟตอนิซึมไดออกไซด์รูปท่อนาน				แสงยูวีเอ, โฟตอนิซึมไดออกไซด์ที่ปะติดด้วยแอนติไบโอไดเรซัลไฟด์						
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}	{4}	{5} = {3} - {4}	{6} = {5} x 100		{7}	{7}	{8} = {3} - {7}	{9} = {8} x 100		{10}	{10}	{11} = {3} - {10}	{12} = {11} x 100
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	0.146652556	14.66525598	60	4.47E+05	0.8023952	0.222762023	22.27620231	60	5.57E+05	0.7229437	0.30221351	30.22135098

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





ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

การคำนวณทางสถิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของวิธีการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟิคัล โคลิฟอร์ม ครั้งที่ 1

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

	นับด้วยวิธี โคลิฟอร์มทั้งหมด	นับด้วยวิธีฟิคัล โคลิฟอร์ม
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	
P(T<=t) two-tail	0.067995	
t Critical two-tail	2.364624	

ง.2 ผลการทดสอบการใช้ pair t- test ในการทดสอบความแตกต่างของวิธีการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟิคัล โคลิฟอร์ม ครั้งที่ 2

	นับด้วยวิธี โคลิฟอร์มทั้งหมด	นับด้วยวิธีฟิคัล โคลิฟอร์ม
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 ในการทดสอบความแตกต่างของวิธีการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟิคัล โคลิฟอร์ม ครั้งที่ 3

t-Test: Paired Two Sample for Means

	นับด้วยวิธี โคลิฟอร์มทั้งหมด	นับด้วยวิธีฟิคัล โคลิฟอร์ม
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	
P(T<=t) two-tail	0.322666	
t Critical two-tail	2.364624	

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

t-Test: Paired Two Sample for Means

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

	Visible TiO ₂ /Sb ₂ S ₃ 6 แผ่น	UVA TiO ₂ /Sb ₂ S ₃ 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

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
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

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

	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

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

	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

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

	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	

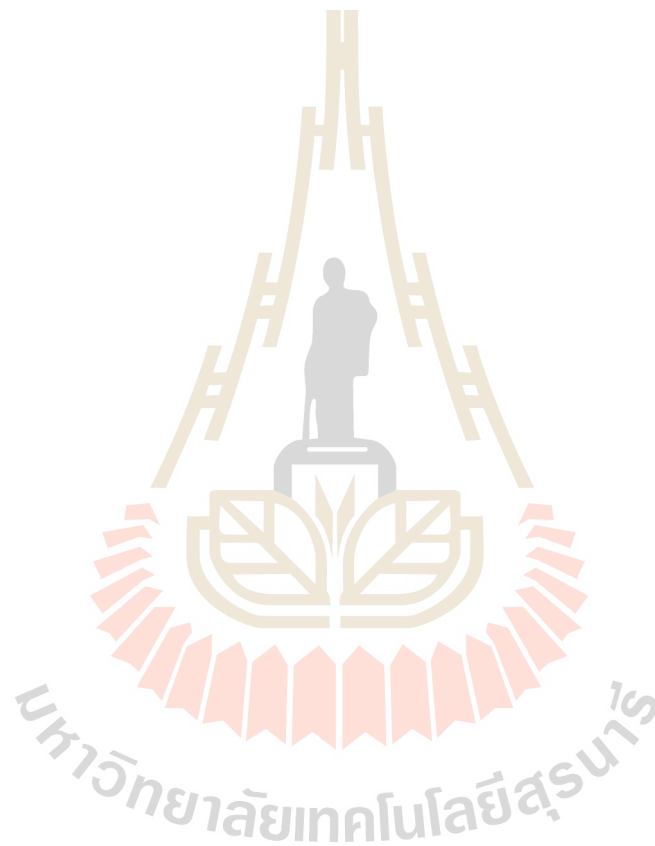


ภาคผนวก จ.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Apichon Watcharenwong, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul.
(2017). **Morphology and Wettability of Nanoporous Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization.** Key Engineering Materials, ISSN:1662-9795, Volume 737, pp 174-178



Morphology and Wettability of Nanoporous Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization

Apichon Watcharenwong^{1,*}, Narudon Saijaloup^{1,b}, Yotsapon Bailuang^{1,c}, and Puangrat Kajitvichyanukul^{2,d}

¹School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²Centre of Excellence on Environmental Research and Innovation, Faculty of Engineering, Naresuan University, 65000, Thailand

*w.apichon@sut.ac.th, ^bmr.narudon@gmail.com, ^cbailuangyotsapon@gmail.com, ^dpuangrati@nu.ac.th

Keywords: Anodization, Aluminium Oxide, Morphology, Wettability, Nanoporous Materials

Abstract. Anodic aluminium oxide (AAO) is a well-known material for nanofabrication. To obtain highly ordered nanoporous array, there is anodization process. AAO were fabricated by anodization method utilizing high purity aluminium foil as the substrate. The substrate was degreased with ultrasonic cleaner for 15 minutes. Then the substrate was anodized in an electrolyte of 0.3 M oxalic acid with various potentials: 10, 20, 30, and 40 V and various durations: 10, 30, 60, 120, and 180 minutes at room temperature. Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) was used to investigate surface morphology of nanoporous aluminium oxide film. The wettability of nanoporous aluminium oxide surface was estimated by measuring water contact angle (WCA) of water droplets on the nanoporous aluminium oxide surface. The FE-SEM images showed that the pore size was in the range of 12 - 81 nm. This result can indicated that nanopore size of AAO film increased with the increasing of anodization potentials and anodization time. The water contact angle of AAO samples were approximately 90.55 - 44.33 degrees. The result of measurement proved that super hydrophilic surface obtained with the increasing of nanopore size and high porosity of AAO.

Introduction

Nanomaterials were fabricated by a variety of approaches such as, electron beam lithography [1], sol-gel methods [2], wet chemical etching [3] and sputtering [4]. However, there are two major disadvantages: limited working area up to few square and high cost of manufacturing. The demand for highly ordered nanoporous has been fulfilled by the anodization process. Anodic aluminium oxide (AAO) films as templates are an important part of preparing ordered nanoporous. Ordered AAO films have specific structure parameters with close-packed hexagonal cells. The formation mechanisms of AAO in acid at aluminium/oxide and oxide/electrolyte interfaces were proposed [5]. The anodizing voltage and acid activity were related to barrier layer thickness and pore diameter, and the mechanism of field-assisted dissolution was also established. The majority of AAO is formed at aluminium/oxide interface due to higher ion transport number of O^{2-} than Al^{3+} , which formed at the oxide/electrolyte interface also favors the Al^{3+} transfer into the electrolyte [6]. Briefly, the most popular electrolytes for anodization are oxalic acid, sulfuric acid and phosphoric acid. Anodizing potentials for these electrolytes are in the range of 30 - 60 V [7-10]. Increasing potential for anodization in this range leads to gradually increasing the pore diameter [7,8]. In the same way, increasing the anodization duration also increases the pore diameter [9,10].

In general, the wettability of metal surface can be estimated by measuring water contact angle (WCA). The WCA can be classified as hydrophilic or hydrophobic. A hydrophilic surface tends to be wetted by water. Whereas, a hydrophobic surface has a tendency to repel water. The hydrophilic surfaces are defined by a WCA of below 90°, and hydrophobic surfaces are defined by a WCA above 90°. The WCA on metal surfaces is governed by a balance between the strength of water-water hydrogen bonding on one hand and a strength of the water-metal interaction [11]. Better wettability

of alumina by water leads not only to more extended water films but also facilitates the water interactions with metal surface [12]. The surface properties of AAO play a key role in many applications such as lab-on-chip device and as functional surface, for examples, catalyst, water sensing i.e. humidity sensor, pH sensor [13]. Here, in this work we discuss the relation of hydrophilic property of the AAO correspondence with the structure of nanoporous materials. The objective of this study is to investigate the hydrophilicity of the prepared AAOs by the anodization process. The morphologies of the nanoporous structure were proved by using FE-SEM and the hydrophobicity/hydrophilicity of the surface by using water contact angle tester. Finding from this work can enlighten the fabrication technique to obtain the AAO with high hydrophilicity which is a good characteristic for various applications in water sensing.

Experimental

Materials and Chemicals. Aluminium (Al) foil with the thickness of 0.25 mm and 99.99% purity (metals basis), Si and Fe (combined) typically 1.00 % were supplied by Alfa Aesar A Johnson Matthey Company. Oxalic acid ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), Nitric acid (HNO_3), 2-Propanol, Acetone, were purchased from ITALMAR (THAILAND) CO., LTD, and used without further processing. Nitrogen gas (N_2) was purchased from TAWAN Industrial Gas (THAILAND). Deionized water SUT-labs (THAILAND) was used for preparing all the solutions used in this study.

Fabrication of Aluminium Oxide by Anodization. The Aluminium foil was cut into coupons (2 cm x 3 cm). The Al sample was degreased with Ultrasonic cleaner, first in acetone, next in 2-propanol, then in deionized water. Duration time in each step was 5 min at room temperature. After this, the sample was blown dry with nitrogen gas. The anodization was carried out in an electrolyte of 0.3 M oxalic acid with various voltages (10-40 V with a step of 10 V) and various times (10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h) at room temperature. A platinum wire was used as a counter electrode with the surface area of 3 cm². The distance between the platinum wire and anodized samples was 30 mm.

Structural Characterizations. The morphology of the fabricated AAO film was characterized by a field emission scanning electron microscope (FE-SEM, JSM-7001F, Schottky type field emission) at 20kV X 50000 and 20kV X 25000. The hydrophobic/hydrophilic behavior of AAO film was characterized measuring by water contact angle. The water contact angle was measured with 10 μl deionized water droplet at room temperature using a horizontal microscope with a protractor eyepiece (DSA 10 MK 2, Kruss). At least 10 parallel measurements were made for each sample. The value of average contact angles was reported.

Result and Discussion

Effect of Aluminium Substrate on Morphology of AAO. Aluminium was anodized in 0.3 M oxalic acid at room temperature and potentials of 40 V for 1 h. Using a different substrate, Al sheet without polishing and Al sheet with polishing (sandpaper number 600) for 5 min. Fig. 1 (a) and (b) show FE-SEM images of AAO film, original and polished Al sheets. For the sample without polishing, more layers of spongy nanoporous oxide were formed on the original oxide layer whereas the thin nanoporous oxide was obtained from the polished sample. It was observed that the nanoporous aluminium oxide structures were formed similarly for both samples. The formation of the nanoporous aluminium oxide on the surface depended on the anodization process, applied potential, duration, and temperature [13, 14].

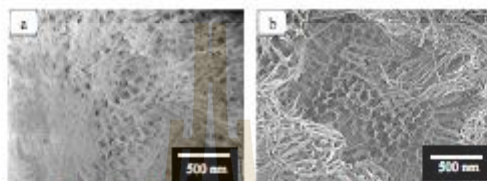


Fig. 1 FE-SEM images of AAO thin film after anodization in 0.3 oxalic acid at 40 V 1 h. (a) Al sheet without polishing, (b) polished Al sheet.

Effect of Anodization Potential on Morphology of AAO. Aluminium was anodized in 0.3 M oxalic acid at room temperature, anodization time of 1 h and various potentials (10, 20, 30, 40 V). Typical top view FE-SEM images of the AAO thin film formed at various operating conditions were presented in Fig. 2 (a-d). From Fig. 2 (a) the nanoporous structure was formed after 10 V of anodization and the pore size was in the range of 12 - 23 nm. After 20 V (Fig. 2b) a similar behavior was observed, however, the pores size increased slightly, approximately 20 - 28 nm. After increasing the anodization to 30 V (Fig. 2c), a bigger nanopore was created, and the pore size was approximately 33 - 81 nm. While increasing the anodization to 40 V, the pore size was increased until the cell walls began to break in certain places. Additionally, the pore diameter was increased with the increasing of anodization potential [8, 9]. It was noted that the size of nanopore was bigger with the increasing of applied potential at room temperature. This was because the interaction of aluminium oxide formation at the interface between electrolyte and aluminium. The expanding size of nanopore also occurred from the aluminium oxide dissolution at the interface due to the increased electric field [5, 6, 14].



Fig. 2 FE-SEM images of AAO thin film after anodization in 0.3 oxalic acid for 1 h. Applied potential were (a) 10 V, (b) 20 V, (c) 30 V, (d) 40 V.

Effect of Anodization Time on Morphology of AAO. The effect of anodization time on the morphology of aluminium oxide was observed in 0.3 M oxalic acid at 30 V by applying 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h and at 40 V for 10 min, 30 min, 1 h. Fig. 3 (a-h) show FE-SEM images of AAO films of each sample. As shown in Fig. 3(a), applying 30 V 10 min led to the formation of the very small hole on the oxide layer. Fig. 3(b), at 30 V 30 min, the pore size increased slightly. However, the pore size of AAO anodized at 30 V 1 h (Fig. 3c) was bigger than the pore size anodized at 30 V 30 min (Fig. 3b). When anodized at 30 V 2 h (Fig. 3d), the nanopore began linking between the pipe walls. The interconnecting of pipe walls was clearly pronounced, when the anodization potential reached 30 V 3 h (Fig. 3e). This result was also in line with Bhattar *et al.*'s study and others [15-17] which indicated that pore diameter increased when the time of anodization increased. Fig. 3 (f-h) for 40 V, the structural features for various durations were similar. After increasing applied potential to 40 V and the anodization time to 1 h, the nanoporous AAOs were linking between the pipe walls. These oxide nanostructures were quite similar to the sample prepared from 30 V for 3 h.

Effect of Morphology of AAO on the Surface Hydrophilicity. The hydrophilic behavior of AAO film was measured by water contact angle tester. Inset images in Fig. 3 showed the variation of water contact angle with increasing anodization time and potential. For samples obtained at 30 V 10 min (Fig. 3a), 30 V 30 min (Fig. 3b), 30 V 1 h (Fig. 3c), 30 V 2 h (Fig. 3d), and 40 V 10 min (Fig. 3f), the degrees of water contact angle were 90.55, 50.98, 46.28, 43.35, 44.33 degrees, respectively. It can be seen that Fig. 3a film was a hydrophobic oxide since its contact angle was greater than 90. The AAO surface became more hydrophilic when increasing anodization time due to the decreasing of water contact angle. When compared samples obtained at 30 V 10 min (Fig. 3a) and 40 V 10 min (Fig. 3f), it was likely that the increasing potential also led to decreasing of contact angle. Similarly, the hydrophilicity increased with increasing anodization time and potential [13].

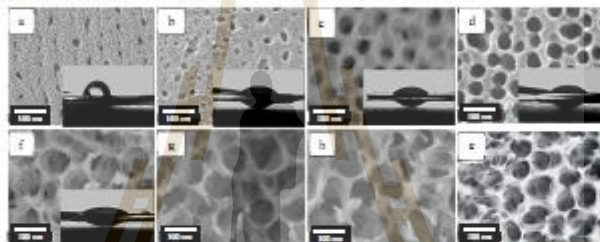


Fig. 3 FE-SEM images of AAO thin film after anodization in 0.3 oxalic acid. Applied potential of 30 V for (a) 10 min, (b) 30 min, (c) 1 h, (d) 2 h, and (e) 3 h and applied potential of 40 V for (f) 10 min, (g) 30 min, and (h) 1 h. The inset pictures were water contact angle images of each sample.

Summary

This study presented the experimental characteristics of AAO film. The preparation of the aluminum oxide was made by anodization process of Al sheet, various potential and anodization times. The FE-SEM images were found. There was no significant difference in the AAO film growth on original Al substrate and polished Al substrate. The porosity of oxide layer has increased with increasing potential and time. However, in high potential and long duration, the results revealed interconnecting between pipe walls. Finally, the water contact angle images showed that the hydrophilic had increased with increasing porosity. As a result, the high hydrophilicity could be good characteristics for others applications like water sensing or pH sensing.

Acknowledgments

We are grateful for grants from Suranaree University of Technology under the research and development fund, One Research One Grant program (OROG).

References

- [1] R. Morales, J. M. Alameda, J. V. Anguita, J. I. Mart, J. I. Martin, M. Velez, F. Briones, J. L. Vicent, Fabrication and magnetic properties of arrays of amorphous and polycrystalline ferromagnetic nanowires obtained by electron beam lithography, *J. Magn. Magn. Mater.* 249 (2002) 156–162.
- [2] W. Wang, H. Ke, J. C. Rao, M. Peng, Y. Zhou, Sol-gel synthesis of SrBi₂Ta₂O₉ nanowires, *J. Alloys Compd.* 504 (2010) 367–370.
- [3] M. Zhu, X. Chen, Z. Wang, Y. Chen, D. Ma, H. Peng, J. Zhang, Structural and optical characteristics of silicon nanowires fabricated by wet chemical etching, *Chem. Phys. Lett.* 511 (2011) 106–109.
- [4] G. Zhou, Z. Zhang, D. Yu, Growth morphology and micro-structural aspects of Si nanowires synthesized by laser ablation, *J. Cryst. Growth* 197 (1999) 129–135.
- [5] G. D. Sulka, L. Zaraska, W. J. Stepniowski, *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* 2nd Edition, in: H. S. Nalwa (ed.), American Scientific Publishers (2004).
- [6] J. P. O'Sullivan, G. C. Wood, The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium, *Proc. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* 317 (1970) 511–543.
- [7] G. D. Sulka, W. J. Stepniowski, Structural features of self-organized nanopore arrays formed by anodization of aluminium in oxalic acid at relatively high temperatures, *Electrochim. Acta* 54 (2009) 3683–3691.
- [8] W. J. Stepniowski, Z. Bojar, Synthesis of anodic aluminium oxide (AAO) at relatively high temperatures. Study of the influence of anodization conditions on the alumina structural features, *Surf. Coat. Tech.* 206 (2011) 265–272.
- [9] W. J. Stepniowski, D. Zasada, Z. Bojar, first step of anodization influences the final nanopore arrangement in anodized alumina, *Surf. Coat. Tech.* 206 (2011) 1416–1422.
- [10] H. Segawa, H. Okano, K. Wada, S. Inoue, Fabrication of alumina films with laminated structures by ac anodization, *Sci. Tech. Adv. Mater.* 15 (2014) 014209 1–10.
- [11] C. Dorrer, J. Ruhe, Some thoughts on superhydrophobic wetting, *Soft Matter* 5 (2009) 51–56.
- [12] B. Lalik, R. Kosydar, R. Tokarz-Sobieraj, M. Witko, T. Szumelda, M. Kołodziej, W. Rojek, T. Machej, E. Bielańska, A. Drelinkiewicz, Humidity induced deactivation of Al₂O₃ and SiO₂ supported Pd, Pt, Pd-Pt catalysis in H₂ + O₂ recombination reaction: The catalytic, microcalorimetric and DFT studies, *Appl. Catal. A: General* 501 (2015) 27–40.
- [13] C. R. Zamarreno, J. Bravo, J. Goicoechea, I. R. Matias, F. J. Arregui, Response time enhancement of pH sensing films by means of hydrophilic nanostructured coatings, *Sens. Actuat. B* 128 (2007) 138–144.
- [14] C. H. Voon, M. N. Derman, U. Hashim, K. R. Ahmad, K. L. Foo, Effect of Temperature of Oxalic Acid on the Fabrication of Porous Anodic Alumina from Al-Mn Alloys, *J. Nanomater.* 2013 (2013) 1–8.
- [15] F. Baffar, Q. Van Overmeere, T. Pardoan, I. Probst, In situ monitoring of electrostriction in anodic and thermal silicon dioxide thin films, *Journal of Solid State Electrochemistry* 17 (2013) 1945–1954.
- [16] A. Nazemi, A. Najafian, S. A. S. Sadjadi, Aluminium oxide nanowires synthesis from high purity aluminium films via two-step anodization, *Superlatt. Microstruct.* 81 (2015) 1–6.
- [17] J. Liu, S. Liu, H. Zhou, C. Xie, Z. Huang, C. Fu, Y. Kuang, Preparation of self-ordered nanoporous anodic aluminium oxide membranes by combination of hard anodization and mild anodization, *Thin Solid Films* 552 (2013) 75–81.