รายงานการวิจัย
เรื่อง

การพัฒนาถังปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียชุมชนด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (เปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงอาทิตย์ และแสงยูวี)

Development of prototype reactor for disinfection of urban wastewater by solar and UV lamp simulated TiO_2 photocatalysis

ดร.สิมนัส ตรีเดช
นางสาวจุฑารัตน์ ศรีชูเปี่ยม
นางสาวเพียงกมล ยุวนานนท์
นายอนิรุทธ์ ศรีเลขา
นายธวัชชัย ศรีสอาด
นายสุภัส มังสาทอง

มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสวนดุสิต

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาถังปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียชุมชนด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (เปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงอาทิตย์ และแสงยูวี)

Development of prototype reactor for disinfection of urban wastewater by solar and UV lamp simulated TiO_2 photocatalysis

ดร.สิมนัส ตรีเดช

นางสาวจุฑารัตน์ ศรีชูเปี่ยม

นางสาวเพียงกมล ยุวนานนท์

นายอนิรุทธ์ ศรีเลขา

นายธวัชชัย ศรีสอาด

นายสุภัส มังสาทอง

(ศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต)

มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสวนดุสิต

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2560)

หัวข้อวิจัย	การพัฒนาถังปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียชุมชนด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (เปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงอาทิตย์และแสงยูวี)
ผู้ดำเนินการวิจัย	ดร.สิมนัส ตรีเดช หัวหน้าโครงการวิจัย นางสาวจุฑารัตน์ ศรีชูเปี่ยม นางสาวเพียงกมล ยุวนานนท์ และคณะ
ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ และนางสาวพรธิดา เทพประสิทธิ์
หน่วยงาน	ศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
ปี พ.ศ.	2561

การศึกษาในครั้งนี้ได้ดำเนินการขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคที่เหลือรอดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยในเบื้องต้นได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้แหล่งพลังงานจากหลอดแสงยูวีและแสงอาทิตย์ โดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10, 30, 60, 120, 150, 180 และ 210 นาที ซึ่งพบว่าการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานแสงทดแทนการใช้หลอดยูวีให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีเทียบเท่าการใช้แสงยูวี ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สั้น (10, 30, 60 และ 90 นาที) การใช้แหล่งแสงยูวีจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียได้ดีกว่าอีกชุดการทดสอบเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 87.5-95.2 ในขณะที่อีกชุดการทดสอบมีค่าร้อยละ 86.8-94.9 นอกจากนี้ในการศึกษาคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียก่อโรคที่พบในน้ำเสียชุมชนเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลฐานในการศึกษาขั้นตอนต่อไปจะพบว่า แบคทีเรียตัวแทนหรืออีโคไลที่ทำการคัดแยกได้ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติการดื้อยามากกว่าหนึ่งกลุ่มขึ้นไป โดยส่วนใหญ่ดื้อต่อยากลุ่ม Beta-lactams เป็นหลัก สำหรับการศึกษาถึงแบคทีเรียที่เหลือรอดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่ามีความคงทนต่อยาปฏิชีวนะ tetracycline, ciprofloxacin และ ampicillin ในส่วนของการพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้คัดเลือกวิธีการพัฒนาการเคลือบผิวของถังปฏิกรณ์ด้วยการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรท ซึ่งผลทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีที่ใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญ อีกทั้งระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 150 นาที เป็นต้นไป มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 96 ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียตัวอย่าง (ร้อยละ 96.1-98.5) อีกทั้งทุกช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (10-210 นาที) การใช้แหล่งแสงยูวีและแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังพบว่าการใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ

ซิลเวอร์ไนเตรทในการฆ่าเชื้อในน้ำเสียให้ค่า MIC และ LC50 ในระดับที่สูงกว่าการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเฉพาะในยา tetracycline และ ampicillin เช่น แบคทีเรียที่เหลือรอดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า MIC อยู่ในช่วง 64 µg/ml ถึง >256 µg/ml ส่วนค่า LC50 อยู่ที่ 1-8 µg/ml ซึ่งมีระดับค่าสูงกว่าระบบที่มีการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพบค่า MIC อยู่ในช่วง 32 µg/ml ถึง >256 µg/ml ส่วนค่า LC50 อยู่ที่ 0.125 µg/ml ในการศึกษาถึงปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มในน้ำเสียที่เหลือรอดจากกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ จะพบว่ามีแนวโน้มผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับในกรณีการศึกษาปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟอร์มมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อใกล้เคียงกัน อีกทั้งได้มีการคัดเลือกชุดการทดสอบที่เหมาะสมเพื่อศึกษาถึงข้อมูลการดื้อต่อยาปฏิชีวนะที่พบ โดยได้ทดสอบที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ ที่ 60 นาที และมีการใช้อีโคไลเป็นตัวแทน ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาที่ทำการทดสอบส่วนใหญ่มีขนาดที่เล็กลงยกเว้นในยา gentamicin, cefotaxime และ ceftazidime ซึ่งการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนมีขนาดที่เล็กลงชี้ให้เห็นว่าแบคทีเรียอาจเริ่มมีการพัฒนาไปสู่การเป็นแบคทีเรียที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาจะมีขนาดเล็กลงแต่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่จัดว่าอีโคไลดังกล่าวมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะ ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบไม่เหนี่ยวนำให้แบคทีเรียมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะส่วนใหญ่

Resrarch Title	Development of prototype reactor for disinfection of urban wastewater by solar and UV lamp simulated TiO_2 photocatalysis
Researcher	Dr. Simanata Threedeach, Miss. Jutharat Srichoopium, Miss. Piangkamon Yuvananont
Research Consultants	Asst. Prof. Dr. Thammasak Rojviroon and Miss Bhorntida Teppprasit
Organization	The Environmental Center, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit University
Year	2018

This study was investigated the efficiency of disinfection of treated of urban wastewater by solar and UV lamp simulated TiO_2 photocatalysis. First, comparison the disinfection efficiency by TiO_2 photocatalytic between using solar and UV source, which various reaction time; 10, 30, 60, 120, 150, 180 and 210 min. The results indicated that TiO_2 photocatalytic combined with solar light had high efficiency to disinfectant as same as UV light. However, short irradiation time with UV light such as 10, 30, 60 and 90 min had high effcicency to remove bacteria in treated water (87.5-95.2%) as compared to the other (86.8-94.9%). Moreover, *E. coli* act as indicator of phothogenic bacteria study. Investigation of antibiotic resistant bacteria from treated water, *E. coli* from water sample were selected and conducted to antibiotic susceptibility testing. The information suggested that most of *E. coli* were classified as multi-drug resistant bacteria and > 50% of *E. coli* as a beta-lactams resistant bacteria. Study on survival bacteria after treated by TiO_2 photocatalytic, it indicated that the bacteria had tolerant to tetracycline, ciprofloxacin ampicillin. Development of $AgNO_3$ and TiO_2 photocatalytic reactor for improved disinfection effieicency and the results had similar trend from TiO_2 photocatalytic reactor which was the reaction time had impact to bacterial removal. For instance, 150 min of reaction time had efficiency >96% to disinfection of bacteria in wastewater (96.1-98.5%). Moreover, it was found that Ag-TiO_2 photocatalytic by both UV and solar light at 10-210 min of reaction time

had the same results to removed bacteria. Study on MIC and LC50 of antibiotics it presented that the survival bacteria from Ag-TiO_2 photocatalytic had high level of MIC and LC50 of tetracycline and ampicillin as comparison to TiO_2 photocatalytic. For instance, survival of bacteria from Ag-TiO_2 photocatalytic had MIC of tetracycline for 64 µg/ml to >256 µg/ml and LC50 of tetracycline for 1-8 µg/ml which higher level than TiO_2 photocatalytic (MIC of tetracycline were 32 µg/ml to >256 µg/ml and LC50 of tetracycline was 0.125 µg/ml) Finally, study on coliform bacteria survival from both photocatalytic, it found that there are similar trend as compared to study on the efficiency of total bacterial tests. Moreover, study on antibiotic susceptibility testing on E. coli survival after treated by both photocatalytic at 60 min of reaction time. The diameter of clear zone of E. coli had decreased, excepte testing with gentamicin, cefotaxime and ceftazidime. However, the occurrence results unclassified into antibiotic resistance bacteria. It suggested that both photocatalytic not induced the survival bacteria to develop into antibiotic resistance bacteria.

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยคณะผู้วิจัยได้รับความร่วมมือและความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ปรึกษาโครงการวิจัย และ คุณพรธิดา เทพประสิทธิ์ ผู้อำนวยการศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และชี้แนวทางการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ในทุกๆ ด้านด้วยความเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่คณะผู้วิจัยอย่างดียิ่ง คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการศึกษาวิจัยในงานวิจัยครั้งนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่ให้ทุนอุดหนุนการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ขอบคุณศูนย์สิ่งแวดล้อมที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการศึกษาวิจัย

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัย เรื่อง”การพัฒนาถังปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียชุมชนด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (เปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงอาทิตย์ และแสงยูวี)” คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง หากงานวิจัยนี้มีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ก็ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้วิจัย

2561

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตการวิจัย	3
สมมติฐานการวิจัย	4
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
กระบวนการโฟโตคะตะไลติก	6
ตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	9
ทฤษฎีโซล-เจล (sol-gel)	11
การกำจัดแบคทีเรียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	13
ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	15
แบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ	16
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียในการศึกษานี้	17
น้ำเสีย และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสีย	20
การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
กรอบแนวคิดในการวิจัย	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกที่เคลือบผิวด้วยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์	24
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกในการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี	26
การศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	32
การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกที่เคลือบผิวด้วยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรีย	32
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี	36
การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโฟโตคะตะไลติกหลังเสร็จสิ้นกระบวนการในแง่ของการอยู่รอดของแบคทีเรียและคุณสมบัติการก่อโรค	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	56
สรุปผลการวิจัย	56
อภิปรายผล	58
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้	58
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป	59
บรรณานุกรม	60
ประวัติผู้วิจัย	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์	10
2.2 แสดงข้อมูลปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่พบในผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ	14
2.3 ลักษณะสำคัญของเชื้อแบคทีเรียบางจีนัสในวงศ์ *Enterobacteriaceae*	18
3.1 แสดงรายละเอียดของยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการทดสอบความไวต่อยาของอีโคไล	30
4.1 ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสีย	33
4.2 แสดงข้อมูลคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมีและชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	38
4.3 แสดงข้อมูลการดื้อยาปฏิชีวนะของอีโคไลที่พบจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	39
4.4 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาปฏิชีวนะของอีโคไลเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ 60 นาที	54

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนภาพการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	7
2.2 แสดงถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	10
2.3 แสดงขั้นตอนของเทคนิคโซล-เจลและผลิตภัณฑ์ต่างๆ	12
2.4 กระบวนการกำจัดแบคทีเรียด้วยโฟโตคะตะไลติก	13
2.5 แผนภาพแสดงองค์ประกอบเปรียบเทียบระหว่างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ	14
2.6 แสดงภาพจากกล้อง AFM ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของอีโคไลหลังการถูกกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	15
2.7 แสดงถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกร่วมกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน	16
2.8 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	23
3.1 แสดงภาพรวมของการดำเนินการวิจัย	25
3.2 ถังปฏิกรณ์สำหรับการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	26
4.1 แสดงข้อมูลการศึกษาคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของอีโคไลที่คัดแยกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ทำการศึกษา	40
4.2 แสดงปริมาณแบคทีเรียที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์	42
4.3 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์	43
4.4 แบคทีเรียทนต่อยา tetracycline ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ระยะเวลา 30-180 นาที	44
4.5 แบคทีเรียทนต่อยา ampicillin ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ระยะเวลา 30-180 นาที	45
4.6 แบคทีเรียทนต่อยา ciprofloxacin ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ระยะเวลา 30-180 นาที	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.7 แสดงปริมาณแบคทีเรียที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ 47

4.8 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ 48

4.9 แบคทีเรียทนต่อยา tetracycline ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไนเตรทที่ระยะเวลา 30-180 นาที 49

4.10 แบคทีเรียทนต่อยา ampicillin ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไนเตรทที่ระยะเวลา 30-180 นาที 49

4.11 แบคทีเรียทนต่อยา ciprofloxacin ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไนเตรทที่ระยะเวลา 30-180 นาที 50

4.12 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ 51

4.13 แสดงปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ 52

4.14 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดโคลิฟอร์มที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ 53

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) นั้น จัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation processes, AOPs) และเป็นกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยบทบาทในการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารอินทรีย์, สารอนินทรีย์, สี, กลิ่น, และจุลินทรีย์ เป็นต้น โดยกระบวนการดังกล่าวจะประกอบไปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการฉายแสงอัลตราไวโอเลตระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารปนเปื้อน (Nakata and Fujishima, 2012; Song et al., 2014) ซึ่งในแง่ของการกำจัดแบคทีเรียก่อโรค กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ถือเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความน่าสนใจ โดยมีข้อดีคือไม่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ (By-products) ที่มีความเป็นพิษเหมือนกับการใช้คลอรีนกำจัด รวมทั้งต้นทุนยังต่ำเช่นเดียวกัน โดยปัจจุบันเริ่มมีผู้สนใจทำการวิจัยทางด้านนี้กันเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นตัวเร่งที่นิยมใช้ในการศึกษาการกำจัดแบคทีเรียกันมาก (Rizzo[1] et al., 2014) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการลดปริมาณแบคทีเรียเมื่อเทียบกับตัวเร่งชนิดอื่น (Molling et al., 2014) โดยกลไกการกำจัดแบคทีเรียนั้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ จะมีการทำปฏิกิริยา (Reactive oxygen species) ที่ก่อให้เกิดอนุภาค –OH, O_2^-, HO_2^- และ H_2O_2 ซึ่งสามารถทำลายผนังชั้นในของเซลล์แบคทีเรีย (Outer membrane) และยังยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆภายในเซลล์ ทำให้แบคทีเรียตายได้ (Zaborowska et al., 2014) แต่อย่างไรก็ตามตัวสารไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกจัดเป็นสารในกลุ่ม Biocides ที่มีฤทธิ์ในการกำจัดแบคทีเรีย แต่ในขณะเดียวกันสารกลุ่มนี้สามารถก่อให้เกิด selective pressure ส่งผลให้การพัฒนาแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะขึ้นได้ (Sousa et al., 2013) ปัจจุบันจึงมีผู้ริเริ่มศึกษาในประเด็นนี้กัน โดยส่วนใหญ่ยังคงพบว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ส่งอิทธิพลต่อการพัฒนาแบคทีเรียดื้อยา (Nakano et al., 2013; Rizzo[1] et al., 2014; Sousa et al., 2013) รวมทั้งสามารถทำลายพลาสมิดซึ่งมียีนที่เกี่ยวข้องกับการดื้อยาบรรจุอยู่ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานในลักษณะดังกล่าว แต่งานวิจัยในลักษณะนี้ยังมีการศึกษาในน้ำเสียชุมชนไม่มากนัก (Rizzo et al., 2014) ซึ่งน้ำเสียชุมชนโดยเฉพาะน้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นแหล่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคก่อนการปล่อยน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลที่มีการวิจัยทางด้านนี้ โดยสรุปจะทราบถึงรูปแบบการทำปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพใน

การลดปริมาณแบคทีเรีย เช่น ลักษณะถังปฏิกรณ์, รูปแบบและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยา, แหล่งแสง, ระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับแหล่งแสง และ ระยะเวลาที่สัมผัสแสง เป็นต้น ซึ่งภายใต้สภาวะการทำปฏิกิริยาที่มีการใช้น้ำเสียชุมชนในการทดสอบ จะมีองค์ประกอบของสารต่างๆในน้ำเสียซึ่งคาดว่าน่าจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจึงอาจจะส่งผลกระทบหากนำไปใช้จริง

การศึกษาครั้งนี้จะเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานเรื่อง “การศึกษาศักยภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ รวมทั้งรูปแบบการดื้อยาที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์” โดยงานในส่วนดังกล่าวจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้โฟโตคะตะไลติกส์ทดแทนการใช้คลอรีนในการกำจัดแบคทีเรีย โดยศึกษาการพัฒนารูปแบบการดื้อยาของทั้งสองกระบวนการเปรียบเทียบควบคู่ไปด้วย แต่การศึกษาในครั้งนี้ซึ่งเป็นส่วนต่อเนื่องจะทำการศึกษาเชิงลึกเพิ่มเติมภายใต้วัตถุประสงค์ที่ต้องการหารูปแบบที่เหมาะสมในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียชุมชน ซึ่งจะดำเนินการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของคณะผู้วิจัย และจากฐานงานวิจัยด้านการกำจัดแบคทีเรียด้วยกระบวนการโฟโต้คะตะไลติกมาสรุปข้อมูลเพื่อต่อยอดการศึกษา โดยมีการดำเนินการภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่า 1) แสงอาทิตย์น่าจะใช้เป็นแหล่งพลังงาน ในกรณีที่ต้องการกำจัดแบคทีเรียได้, 2) การพัฒนาการเคลือบผิววัสดุในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงกับการกำจัดแบคทีเรียน่าจะช่วยให้กระบวนการมีประสิทธิภาพมากขึ้น และ 3) เมื่อพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพแล้ว คาดว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดไม่น่าจะมีแบคทีเรียสามารถอยู่รอดได้ (หรือมีในปริมาณต่ำ) ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้อีโคไล (*Escherichia coli*) เป็นตัวแทนในการศึกษา โดยสิ่งที่สนใจจะทำในการศึกษาครั้งนี้ ภายใต้การใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่ใช้การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิคโซลเจล (Sol-gel) ประกอบไปด้วย 1) การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรียโดยเฉพาะ, 2) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี, และ 3) การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแง่ของการอยู่รอดของแบคทีเรียและคุณสมบัติการก่อโรค ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการศึกษาทางคณะผู้วิจัยมีความคาดหวังว่า จะได้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกส์ต้นแบบ (Lab-scale) ที่ความเหมาะสมสำหรับกำจัดแบคทีเรียโดยใช้ในน้ำเสียชุมชนเป็นต้นแบบ และองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการต่อยอดเพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และมีประโยชน์ในการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข และน่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทำการศึกษาทางด้านนี้ และมีประโยชน์ต่อหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรียมากยิ่งขึ้น

2. เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้แสงอาทิตย์ทดแทนแสงยูวีในการกำจัดแบคทีเรียของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ เป็นการดำเนินงานเพื่อศึกษารูปแบบที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียชุมชนในขั้นตอนสุดท้ายก่อนการระบายออกจากระบบ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้น้ำที่จะนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆต่อ รวมทั้งน้ำก่อนการระบายสู่แหล่งสิ่งแวดล้อมไม่มีการปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรค ซึ่งจะส่งปัญหาทางด้านสาธารณสุขตามมา โดยขอบเขตการดำเนินงานในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ในการศึกษา (ถังปฏิกรณ์ต้นแบบ) เป็นถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ (Batch Reactor) ที่เป็นระบบปิดมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการโซล-เจล (Sol-gel)

2. มีการศึกษาแหล่งพลังงานแสงที่ใช้ร่วมกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรค โดยเปรียบเทียบระหว่างหลอด UV-LED และพลังงานจากแสงอาทิตย์

3. มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของถังปฏิกิริยาบางประการเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น การเคลือบผิววัสดุด้วยสารต่างๆ และแหล่งพลังงานแสงที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา

4. ตัวแทนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบไปด้วย 1) จุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Microorganisms) และ 2) แบคทีเรียก่อโรค โดยใช้ตัวแทนกลุ่มโคลิฟอร์ม และอีโคไล ซึ่งจัดเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ โดยในที่นี้จะใช้แบคทีเรียที่พบจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยเฉพาะในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

5. การติดตามประชากรของแบคทีเรียประเภทต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไป ในที่นี้ใช้การนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏ (CFU/ml) ด้วยการใช้เทคนิคการเจือจางตัวอย่างน้ำ การทำ plate count agar การกรองน้ำตัวอย่าง (Filtration technique) เลี้ยงแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มบนอาหารที่เฉพาะเจาะจง และการศึกษาคุณสมบัติการดื้อต่อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรีย

6. ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองขนาดใหญ่ และเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยประกอบด้วยการศึกษาน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียภายในระบบบำบัด และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

7. การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำเสียจากจุดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทั่วไปทางด้านกายภาพ เคมีและชีวภาพ

สมมติฐานการวิจัย และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้มีการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้งานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าหมายไว้ภายใต้สมมุติฐานการวิจัยจำนวน 3 ข้อ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์น่าจะใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานจากหลอด UV ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ต้องการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคได้

2. การพัฒนาการเคลือบผิววัสดุในถังปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในทิศทางที่เหมาะสมกันกับการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคน่าจะช่วยให้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพอย่างเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น

3. เมื่อพัฒนาถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกให้มีประสิทธิภาพแล้วนั้น คาดว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณแบคทีเรียก่อโรคสามารถอยู่รอดได้ในปริมาณที่ต่ำมาก

คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation processes, AOPs) ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้ปฏิกิริยานั้นๆ เกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งมี 2 กระบวนการย่อย ได้แก่ กระบวนการเกาะหรือดูดติดผิว (adsorption process) และกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic process) ซึ่งกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียนไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และในปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการคุณภาพน้ำ และอากาศเพิ่มมากขึ้น (Monteiro et al., 2015)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในด้านการควบคุมมลพิษ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการทำปฏิกิริยา มีเสถียรภาพ มีประสิทธิภาพสูง ราคาต่ำ และไม่มีอันตราย (AL-Jawad et al.,

2017) มีงานศึกษาวิจัยที่ประยุกต์ใช้ในด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม เช่น การฆ่าเชื้อในน้ำ อากาศ พื้นดินและพื้นน้ำ (Schlur et al., 2014)

แบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ (Cloete, 2003) คือการที่แบคทีเรียชนิดนั้นๆแสดงคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะทั้งแบบชั่วคราวและถาวร โดยคุณสมบัติดังกล่าวสามารถถ่ายถอดไปยังแบคทีเรียรุ่นถัดไป อีกทั้งแบคทีเรียดังกล่าวจะไม่มีความไวต่อยาปฏิชีวนะชนิดต่างๆที่ใช้ในการรักษาโรคขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการดื้อยาที่มี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ถังปฏิกิริยาโฟโคคะตะไลติกต้นแบบ (lab-scale) ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคในน้ำ

2. ทราบถึงประสิทธิภาพของถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกกรณีที่มีการใช้แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนการใช้หลอดยูวี

3. รูปแบบการเดินระบบที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรค โดยในที่นี้พิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดในแง่คุณสมบัติการก่อโรค และยีนที่มีอิทธิพลต่อปัญหาทางด้านสาธารณสุขเป็นหลัก

4. จากข้อ 1-3 ได้นวัตกรรมในการป้องกันหรือลดผลกระทบจากการติดเชื้อแบคทีเรียก่อโรค ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและเศรษฐกิจ

5. เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยหรือต่อยอดงานวิจัยในเรื่องการพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกสำหรับกำจัดแบคทีเรียก่อโรคในแหล่งน้ำ

6. มีการเผยแพร่ข้อมูลในรูปบทความในวารสารทางวิชาการ

7. ข้อมูลและองค์ความรู้ที่ได้น่าจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่มีบทบาทต่อการแก้ไขหรือลดปัญหาดังกล่าว รวมถึงบุคคลทั่วไปที่ให้ความสนใจ

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

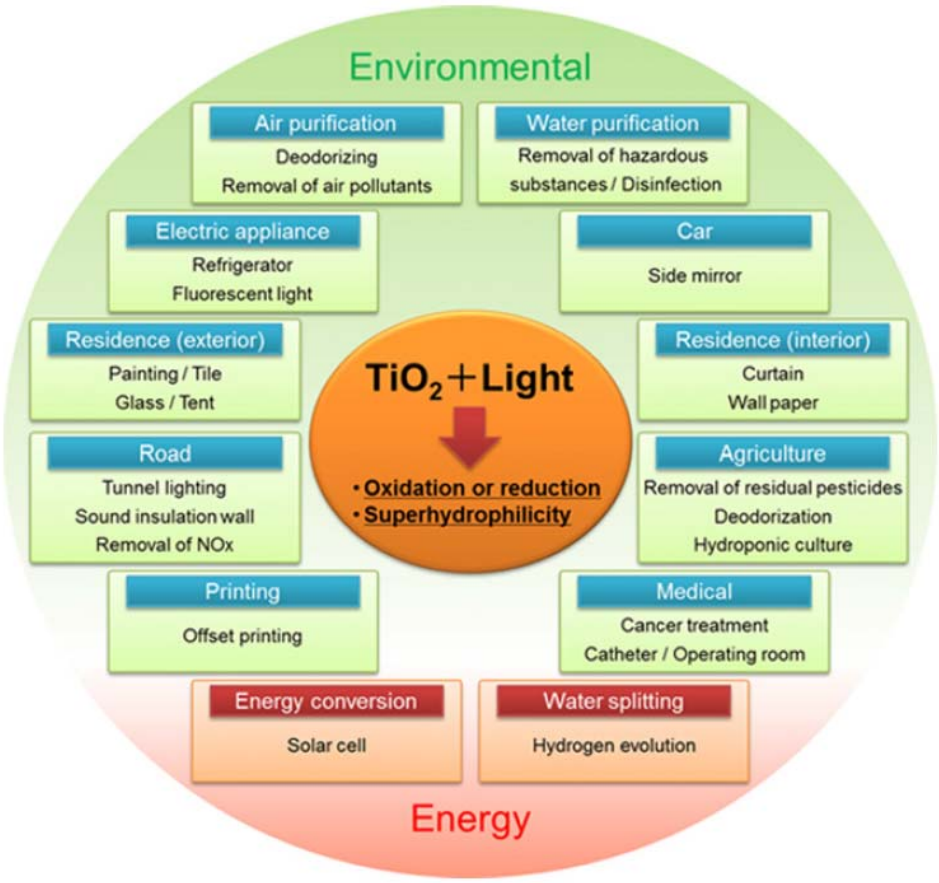
การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อประมวลองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรค เมื่อได้องค์ความรู้ดังกล่าวประกอบกับข้อมูลการศึกษาก่อนหน้านี้ของคณะผู้วิจัยที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะเปรียบเทียบระหว่างการใช้คลอรีน และการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการบำบัดสารมลพิษ รวมทั้งกลไกของกระบวนการในการกำจัดแบคทีเรีย, ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่ใช้สำหรับการกำจัดแบคทีเรีย, แบคทีเรียก่อโรค และการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยรายละเอียดการศึกษาในแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียนไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (ภาพที่ 2.1) และในปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการคุณภาพน้ำ และอากาศเพิ่มมากขึ้น (Monteiro et al., 2015) โดยภายใต้แสง UV ที่ความยาวคลื่น > 380 นาโนเมตร จะสามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาได้ดี นอกจากนี้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ยังหมายถึงกระบวนการที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้ปฏิกิริยานั้นๆ เกิดได้เร็วขึ้น โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เป็นกระบวนการที่มีการใช้แสงร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมี 2 ส่วน ได้แก่ กระบวนการเกาะหรือดูดติดผิว (adsorption process) และกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic process)

1. กระบวนการเกาะหรือดูดติดผิว (adsorption process)

กระบวนการเกาะหรือดูดติดผิวจะเกิดได้นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซมาเกาะจับและติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่สภาวะ 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับ ของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) โดยสำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการติดผิวในสภาวะก๊าซกับของแข็งสำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวกับขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคขนาด 6.6 และ 14.8 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (Nakata and Fujishima, 2012)

ส่งผลให้ปริมาตรของรูพรุน และความหนาแน่นของพื้นผิว OH- ลดลง และรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อทดสอบกับ AS (III) และ As (V) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงสัมพันธ์กับ SBET ของอนุภาคนอกจากนี้เมื่ออนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 30.1 นาโนเมตร จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง (Xu and Meng., 2009) นอกจากนี้ในการทดสอบกระบวนการดูดติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีโซล-เจล ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.6 และ 7.6 นาโนเมตรสามารถทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสได้ถึง 80 ตารางเมตรต่อน้ำหนักในหน่วยกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา (Zaki et al., 2010) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มอัตราการดูดติดผิวของสารที่ต้องการกำจัดโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน แต่ในรูพรุนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่แสงไม่สามารถส่องถึงก็จะไม่

ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวดังกล่าวจะเป็นเพียงปัจจัยช่วยสนับสนุน (Yamazaki et al., 2007)

2. กระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic process)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) เป็นกระบวนการที่มีบทบาทในการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สี กลิ่น และจุลินทรีย์ เป็นต้น โดยกระบวนการดังกล่าวจะประกอบไปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการฉายแสงอัลตราไวโอเลตระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารปนเปื้อน กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (Photon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (Band Gap, Eg) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่าโฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+_{vb} ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e^-_{cb} ซึ่ง h^+_{vb} และ e^-_{cb} สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมได้อีก เรียกว่ารีคอมบีเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก และที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในก๊าซ เรียกว่ารีดักชัน (Reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (Donor) ในก๊าซไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidant)

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนี้ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีแถบพลังงานที่นาสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งมีความกว้าง Eg กั้นอยู่

กลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการ 1-7 (Al-Ekabi et al., 1991; Belapurkar et al., 2010)

$$TiO_2 + h\nu \longrightarrow e^-_{cb} + h^+_{vb} \quad (1)$$

$$h^+_{vb} + OH \longrightarrow {}^\bullet OH \quad (2)$$

$$h^+_{vb} + H_2O \longrightarrow {}^\bullet OH + H^+ \quad (3)$$

$$e^-_{cb} + O_2 \longrightarrow O_2^- \quad (4)$$

$$R + {}^\bullet OH \longrightarrow R\text{-}OH \quad (5)$$

$$R + h^+_{vb} \longrightarrow R^+ \text{ (Oxidized)} \quad (6)$$

$$e^-_{cb} + h^+_{vb} \longrightarrow \text{heat (Recombination)} \quad (7)$$

เมื่อ $h\nu$ = อนุภาคของแสง (Photon)

h^+_{vb} = โฮลที่แถบวาเลนซ์

e^-_{cb} = อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า

$\bullet OH$ = ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)

O_2^- = ซูเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radicals)

R = โมเลกุลของสารอินทรีย์ (Organic Molcule)

3. กลไกในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e^-_{cb}) ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน (O_2) ที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคัล (O_2^-) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์ (h^+_{vb}) สามารถรับอิเล็กตรอน (Oxidized) จากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในก๊าซได้โดยตรง หรือไฮดรอกซิลอิออน (Hydroxyl ions : OH^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet OH$) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong Oxidizing Agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly Reactive) และทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในก๊าซที่ดูดติดผิวหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล สามารถที่ทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ 8

$$2O_2^- + 2H^+ + 2\,e^- \longrightarrow H_2O_2 \qquad (8)$$

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e^-_{cb} ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ 9 และ 10

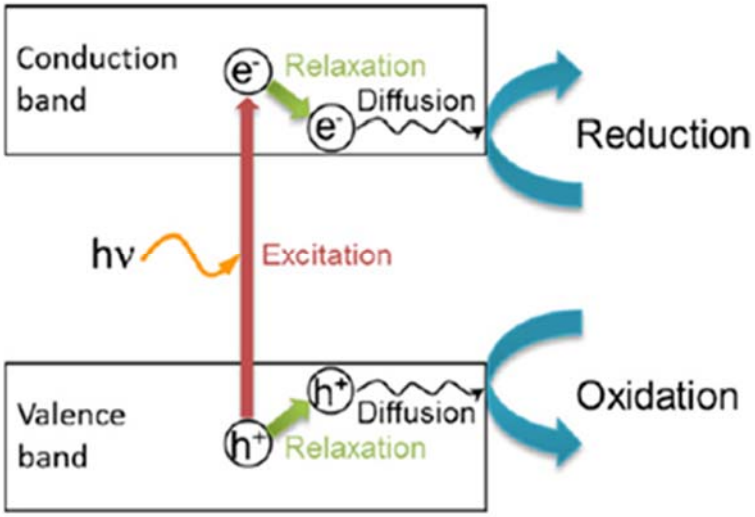
$$H_2O_2 + e^-_{cb} \longrightarrow \bullet OH + OH^- \qquad (9)$$

$$H_2O_2 + O_2^- \longrightarrow \bullet OH + OH^- + O_2 \qquad (10)$$

ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งพบว่ามีอยู่ 3 แบบตามลักษณะของโครงสร้างของผลึก คือ Anatase, Rutile และBrookite สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Anatase และ Rutile จะอยู่ในรูปผง โดยทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีสมบัติใกล้เคียงกันมาก เช่น ความมันวาว ความแข็งและความหนาแน่น พบว่าที่อุณหภูมิ 915 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Anatase สามารถ

เปลี่ยนเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Rutile ได้ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 แสดงถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Nakata and Fujishima, 2012)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติทางกายภาพ	คุณสมบัติทางเคมี
1. มีลักษณะเป็นของแข็ง	1. จุดเดือด 2500-3000 °C
2. สีขาว	2. จุดหลอมเหลว 1840 °C
3. ไม่มีกลิ่น	3. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.9
4. น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 79.90	4. ไม่ละลายน้ำ
5. ความแข็ง 5.5-6	5. pH 7-8 ที่อุณหภูมิ 20 °C

ที่มา: Amethyst Galleries, Inc. (1996)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึกอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่

1) รูไทล์ (Rutile) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนมากจะเป็นแบบรูไทล์เกือบทุกโรงงาน เช่น โรงงานสี, โรงงานทำเครื่องสำอาง, โรงงานทำอาหาร และบางครั้งพบในหินอัคนี

2) อนาเทส (Anatase) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง

3) บรูคไคต์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และโครงสร้างผลึกเป็นแบบออโทรอมบิค (Orthorhombic)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติดังนี้

- มีเสถียรภาพต่อสารเคมี ไม่ละลาย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในปริมาณสูง
- มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูกและไม่มีอันตราย
- มีช่องว่างพลังงาน (Eg) ไม่สูง (Eg=3.2 อิเล็กตรอนโวลต์)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผลึกชนิดรูไทล์และอนาเทสถูกนำมาใช้ในด้านการบำบัดน้ำเสีย โดยทั้งสองมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ผลึกทั้งสองแบบถือว่าเป็นแบบธรรมดาที่พบได้ทั่วไป เพราะสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย โดยทั่วไปไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบอนาเทสจะมีถูกกระตุ้นด้วยแสงดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบรูไทล์ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาดูดติดและหลุดออกของออกซิเจนในรูปแบบของ O_2^- และ O^- ได้ดีกว่า และมีอัตราการเกิดรีคอมบีเนชันของอิเล็กตรอนและโฮลที่ต่ำกว่า (Sclafani and Herrmann, 1996)

ทฤษฎีโซล-เจล (sol-gel)

กระบวนการโซล-เจล เป็นวิธีการที่ใช้เตรียมสารละลายในการสร้างวัสดุจำพวกเซรามิคและแก้ว หลักการพื้นฐานของกระบวนการ คือ สารที่นำมาใช้ในการเตรียมการเคลือบจะเป็นสารละลายของสารประกอบโลหะหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ในของเหลว และจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (sol) เป็นสถานะกึ่งของแข็งที่เรียกว่า เจล (gel) โดยการดึงน้ำออกหรือการเพิ่มอุณหภูมิ หลังจากนั้นนำไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1- 1,000 นาโนเมตร) ดังขั้นตอนที่แสดงในภาพที่ 2.3

การเคลือบผิวด้วยวิธีโซล-เจล ซึ่งวิธีการเคลือบผิวมี 2 แบบที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือการจุ่มเคลือบแบบกะ (batch dip coating) และการจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (continuous dip coating) โดยการจุ่มเคลือบแบบกะ (Batch dip coating) สามารถแบ่งขั้นตอนในขณะเคลือบได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

1) ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (immersion)

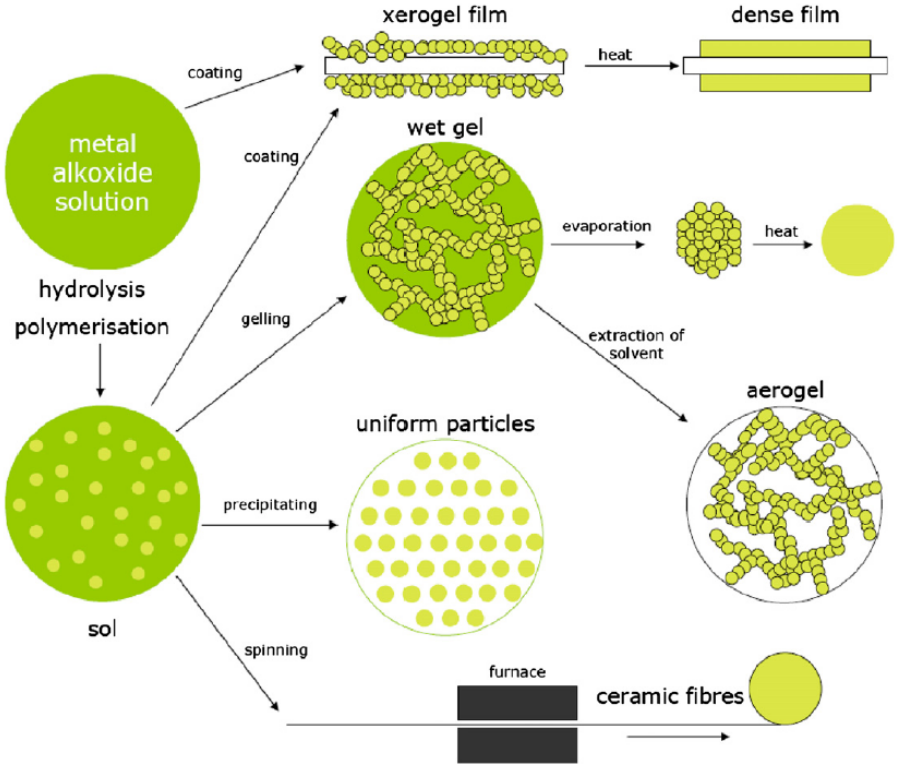
2) ขั้นตอนการเริ่มต้นดึงชิ้นงานขึ้น (start up)

3) ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (deposition and drainage)

4) ขั้นตอนที่สารละลายไหลแยกออกจากชิ้นงาน (drainage)

5) ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (evaporation)

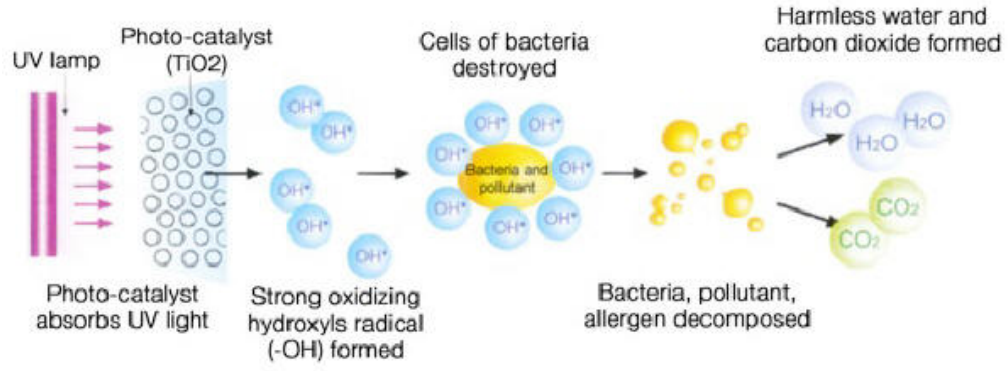
การเคลือบผิววัสดุด้วยวิธีการโซลเจลนั้น เป็นวิธีการที่นิยมใช้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพ โดยมีผลการศึกษาพบว่า การเตรียมสารด้วยวิธีการดังกล่าวได้สารที่มีความบริสุทธิ์ (High purity), เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous), สามารถควบคุมขนาดอนุภาค (Controlled size) และการกระจายตัว (Narrow size distribution) นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Rahim et al., 2012)



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนของเทคนิคโซล-เจล และผลิตภัณฑ์ต่างๆ (Cannavale. et al., 2010)

การกำจัดแบคทีเรียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

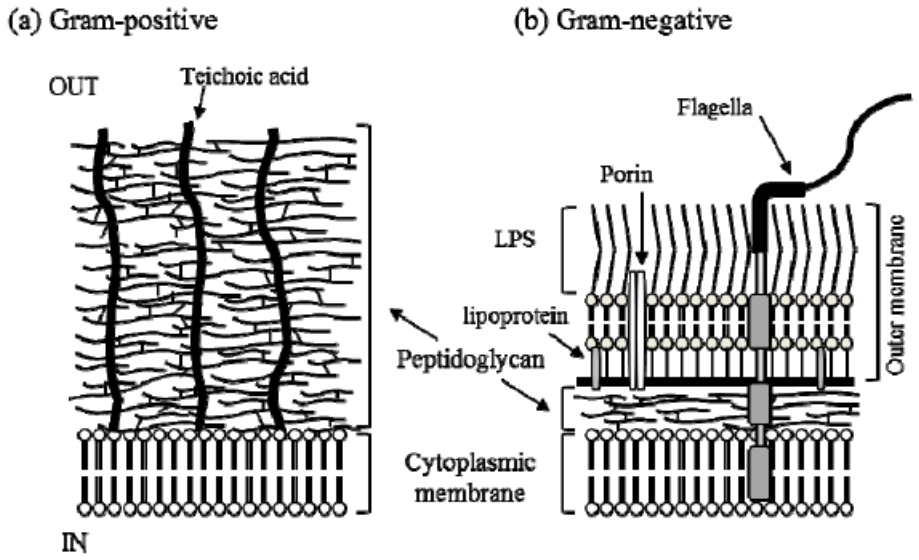
ในปัจจุบันนี้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกควบคู่กับการมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับการบำบัดสารมลพิษต่างๆอย่างกว้างขวาง ส่วนการใช้กระบวนการดังกล่าวในการกำจัดหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อาทิเช่น แบคทีเรีย, รา, ไวรัส, และสปอร์ (Venieri et al., 2014) เริ่มมีรายงานการวิจัยปรากฏ ทั้งนี้เนื่องจากในปัจจุบันมีการแพร่กระจายของแบคทีเรียก่อโรคไปสู่สิ่งแวดล้อม และก่อเกิดปัญหาทางด้านสาธารณสุขตามมา (Žvab et al., 2014) โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถกำจัดแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงถือเป็นวิธีการฆ่าเชื้อ (Disinfection) ทางเลือกอีกวิธีหนึ่งที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Xiong and Hu, 2013) โดยภายใต้กระบวนการดังกล่าวจะก่อให้เกิด Reactive oxygen species (ROS) ซึ่งสามารถฆ่าแบคทีเรียได้ โดยแบคทีเรียบางชนิดอาจถูกรบกวนกระบวนการสร้างผนังเซลล์ (Cell walls) หรือผนังเซลล์ถูกทำลาย ในขณะที่บางชนิดดีเอ็นเอ หรืออาร์เอ็นเอถูกทำลาย (Carré et al., 2014; Janus et al., 2012; Liou and Chang, 2012; Ye et al., 2013)



ภาพที่ 2.4 กระบวนการกำจัดแบคทีเรียด้วยโฟโตคะตะไลติก (AirOasis, 2015)

เนื่องจากการที่กลไกหลักในการทำลายแบคทีเรียจะมุ่งประเด็นไปที่ส่วนของผนังเซลล์ แต่จากการที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive bacteria) และแกรมลบ (Gram-negative bacteria) มีความแตกต่างกัน จึงส่งผลต่อกระบวนการดังกล่าว (ภาพที่ 2.5 และตารางที่ 2.2) โดยแบคทีเรียแกรมลบซึ่งรวมถึงอีโคไลมีองค์ประกอบของไขมันในผนังเซลล์สูงกว่า ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับการทนทานต่อน้ำยาฆ่าเชื้อ (Disinfectants, antiseptics) และสารซักล้างต่างๆ (Detergents) (Nakano et al., 2013) ดังนั้น ผนังเซลล์น่าจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพล และจำเป็นจะต้องคำนึงถึงเมื่อต้องการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดแบคทีเรีย นอกจากนี้

ลักษณะการอยู่รวมกลุ่มกันเป็นชั้นเมือกของแบคทีเรีย (Biofilm) ยังมีผลต่อการกำจัดด้วยโฟโตคะตะไลติกเมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรียที่อยู่ในลักษณะแขวนลอย (Planktonic) (Polo et al., 2011)



ภาพที่ 2.5 แผนภาพแสดงองค์ประกอบเปรียบเทียบระหว่างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ (Nakano et al., 2013)

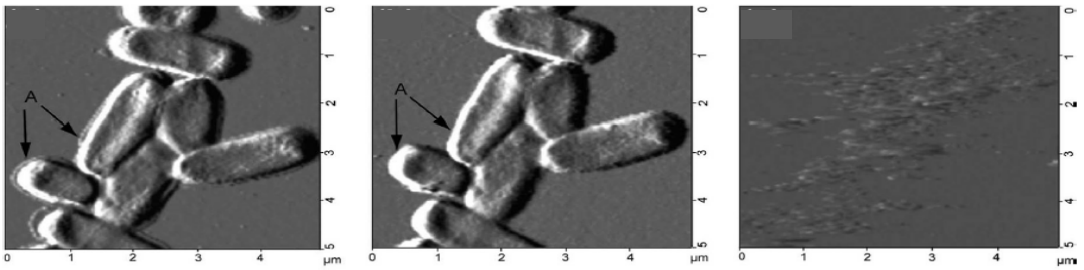
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่พบในผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ

ลักษณะ	แบคทีเรียแกรมบวก	แบคทีเรียแกรมบวก
ความหนาของผนังเซลล์	20-80 nm	10 nm
จำนวนชั้นของผนังเซลล์	1	2
Peptidoglycan	>50%	10-20%
Lipid และ Lipoprotein	0-3%	58%
Lipopolysaccharide	0%	13%

ที่มา (Nakano et al., 2013)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเชิงลึกถึงลักษณะโครงสร้างของอีโคไลหลังการถูกกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผ่านกล้อง Atomic force microscopy (AFM) (ภาพที่ 2.6) ซึ่งพบว่า ก่อนเข้าสู่กระบวนการอีโคไลมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่ง

(Cylindrical shape) แต่หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าวมาได้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง โครงสร้างโดยทั่วไปยังมีลักษณะเหมือนเดิม เพียงแต่โครงสร้างผนังเซลล์ชั้นนอก (Outermost layer) เริ่มหายไป ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการ นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาผ่านไปถึง 6 วัน จะพบว่าเซลล์อีโคไลหายไป ไม่พบในลักษณะเป็นรูปร่างดังเช่นช่วงก่อนหน้า แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรีย (Karunnakaran, 2013)

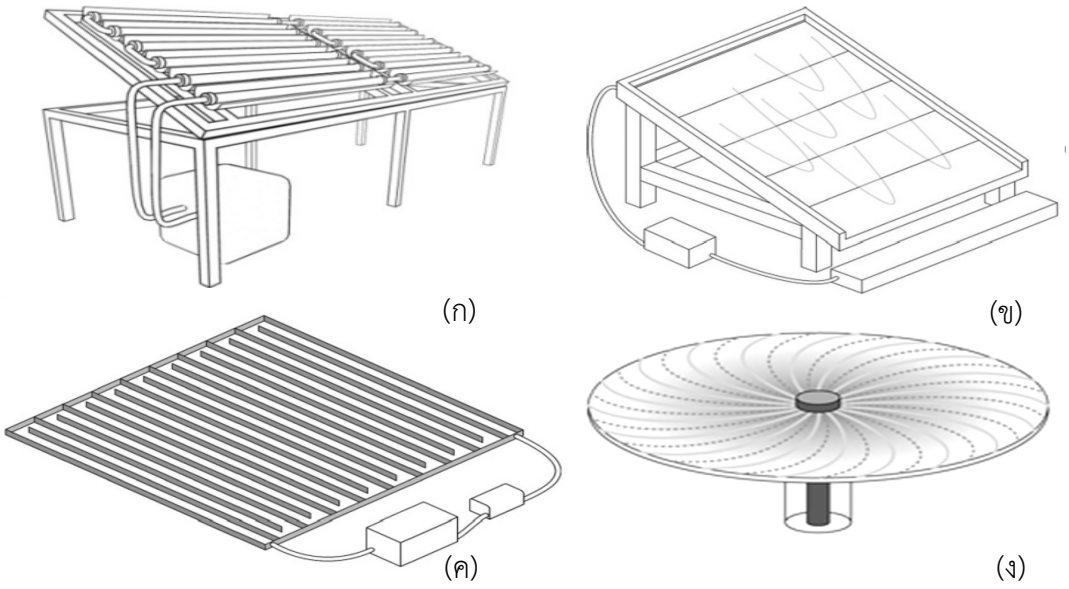


(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 2.6 แสดงภาพจากกล้อง AFM ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของอีโคไลหลังการถูกกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยภาพ (ก) แสดงอีโคไลก่อนเข้าสู่กระบวนการ ภาพ (ข) แสดงอีโคไลหลังผ่านการการกำจัด 1 วัน และภาพ (ค) แสดงอีโคไลหลังผ่านการกำจัด 6 วัน (Karunnakaran, 2013)

ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

การที่ต้องการจะเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยทั่วไปแล้วนิยมที่จะปรับปรุงถังปฏิกรณ์โดย 1) การปรับปรุงโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 crystal structure) และพื้นที่ผิวที่จะใช้ในการทำปฏิกิริยา, 2) การปรับปรุงการเคลือบผิววัสดุด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากขึ้น, และ 3) การเพิ่มสนามไฟฟ้าในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Xiong and Xu, 2013) นอกจากนี้ในส่วนของรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่มีรายงานการใช้ในการศึกษาการกำจัดแบคทีเรีย ได้แก่ Continuous stirred tank reactor (CSTR), Fountain photoreactors, Fixed-bed reactor, และ Compound parabolic collector (CPC) solar reactor (Karunnakaran, 2013) โดยรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกร่วมกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน โดยภาพ (ก) Compound parabolic collector (CPC), (ข) Inclined plate collector (IPC), (ค) Double skin sheet photoreactor (DSS), และ (ง) horizontal rotating disk reactor (RDR) (Braham and Harris, 2009)

แบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ (Antibiotic resistance bacteria)

ยาปฏิชีวนะนั้น ในปัจจุบันจัดเป็นยาที่มีการใช้กันในวงกว้าง เนื่องจากมีการใช้ยากันอย่างไม่สมเหตุสมผล และใช้กันอย่างเกินจำเป็น จึงก่อให้เกิดปัญหาการดื้อยาปฏิชีวนะขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชื้อแบคทีเรีย (Zhang and Zhang, 2011) ซึ่ง ณ ปัจจุบันถือเป็นโรคอุบัติใหม่ และจัดเป็นปัญหาใหญ่ในระดับนานาชาติ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Bouki et al., 2013; Rizzo et al., 2013[b]) และเศรษฐกิจตามมา ภายใต้สภาวะที่มีการคงอยู่ของยาปฏิชีวนะ หรือแม้แต่กระทั่งสภาวะหรือสารเหนี่ยวนำต่างๆนั้น จะก่อให้เกิดการคัดเลือกสายพันธุ์ของแบคทีเรียขึ้น โดยจะมีการพัฒนาและปรับตัวให้เหมาะสมเพื่อความอยู่รอดภายใต้สภาวะที่มีการปรากฏของสารเหล่านั้น ก่อให้เกิดการเปลี่ยนกลุ่มประชากรของแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดสายพันธุ์ใหม่ที่มีความทนทานต่อสภาวะกดดันมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแบคทีเรียที่มีความทนทานต่อสภาวะต่างๆมักจะมีหลากหลายกระบวนการเมตาโบลิซึมเพื่อช่วยให้เซลล์อยู่รอด (Bahig et al., 2008) และในแบคทีเรียเหล่านั้นมักจะพบพลาสมิด (Plasmid) ซึ่งยีนส่วนใหญ่ที่ควบคุมกระบวนการเหล่านั้นมักจะพบที่พลาสมิด และ

ไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กับยีนที่จำเป็นต่อการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมไปสู่รุ่นถัดไป ซึ่งจะพบอยู่ที่โครโมโซม (chromosome) การที่แบคทีเรียมีการพัฒนาสายพันธุ์ให้มีความทนทานต่อยาปฏิชีวนะเรียก แบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ ซึ่งแบคทีเรียดังกล่าวจะมีหลายกลไกในการต้านยาปฏิชีวนะ ซึ่งถูกควบคุมกลไกด้วยยีนดื้อยาปฏิชีวนะ โดยยีนส่วนใหญ่จะอยู่ที่พลาสมิดของแบคทีเรีย ซึ่งสามารถถ่ายทอดผ่านยีนจากแบคทีเรียที่ดื้อยาไปสู่แบคทีเรียที่ไม่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้ หรืออาจมีการถ่ายทอดยีนจากแบคทีเรียทั่วไปในสิ่งแวดล้อมไปสู่แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค รวมถึงอาจเกิดการถ่ายทอดยีนระหว่างแบคทีเรียที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะด้วยกันเอง ก่อให้เกิดแบคทีเรียสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะหลายชนิดมากยิ่งขึ้น (Wellington et. al., 2013) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้การสืบพันธุ์ แต่ส่วนใหญ่ในสิ่งแวดล้อมจะเกิดผ่านกระบวนการที่เรียกว่าการถ่ายทอดยีนฯในแนวราบ (Horizontal gene transfer, HGT) ซึ่งทำให้เชื้อแบคทีเรียสามารถถ่ายทอดยีนฯข้ามสายพันธุ์กันได้ (Kelly et al., 2009) โดยถือเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เชื้อแบคทีเรียมีวิวัฒนาการอย่างรวดเร็ว และมีการแพร่กระจายยีนฯเหล่านี้ไปสู่กลุ่มแบคทีเรียในสิ่งแวดล้อม โดยยีนดื้อยาที่ได้รับขนถ่ายมานี้จะอยู่ในรูปต่างๆ ที่สำคัญ คือ naked DNA, phage หรือ plasmids ซึ่งมีผลทำให้เกิดปัญหาการเพิ่มขึ้นของเชื้อดื้อยา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียในการศึกษานี้ (นงลักษณ์ และปรีชา, 2554)

1. แบคทีเรียในวงศ์ *Enterobacteriaceae*

แบคทีเรียในวงศ์ *Enterobacteriaceae* มีลักษณะที่ประกอบไปด้วย: 1) เซลล์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ไมโครเมตร ถึง 1.5 ไมโครเมตร, 2) รูปร่างเป็นท่อนตรง, 3) ถ้าเคลื่อนที่จะใช้แฟลกเจลลาที่มีรอบตัว, 4) ให้ผลออกซิเดสเป็นลบ, 5) ไม่ต้องการ Na^+ เพื่อเพิ่มการเจริญของเซลล์, 6) เซลล์มีแอนติเจนพิเศษ เรียก Enterobacterial common antigen, และ 7) ความต้องการอาหารแบบง่ายๆ นอกจากนี้แบคทีเรียในวงศ์ดังกล่าวยังจัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียแกรมลบ (Gram positive bacteria) รูปท่อน และเป็นพวก Facultatively anaerobic โดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มนี้มีลักษณะรูปร่างท่อนตรงหรือท่อนโค้ง มีหายใจแบบใช้ออกซิเจน และแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยกระบวนการหมัก (fermentation) คาร์โบไฮเดรตได้ และจีนัสส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับสัตว์ หรือพืช บางชนิดพบในดิน และน้ำ

แบคทีเรียในวงศ์ *Enterobacteriaceae* นี้ประกอบไปด้วยหลายจีนัส ซึ่งมีความแตกต่างทางชีวเคมี เพราะมีความสามารถในการย่อยน้ำตาลหลายชนิด จึงใช้บอกความแตกต่างของจีนัสและสปีชีส์ได้ โดยสมบัติบางประการของแบคทีเรียบางจีนัสในตระกูลนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยตัวอย่าง

แบคทีเรียในวงศ์ *Enterobacteriaceae* ได้แก่ Escherichia coli ซึ่งพบมากในลำไส้คนและสัตว์เลือดอุ่น ซึ่งเป็นแบคทีเรียประจำถิ่น

2. สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ

สภาพแวดล้อมทางกายภาพ และเคมีมีผลต่อจำนวนจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ และจะแตกต่างไปตามแหล่งน้ำแต่ละชนิด ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสำคัญของเชื้อแบคทีเรียบางจีนัสในวงศ์ *Enterobacteriaceae*

Property	*Escherichia*	*Shigella*	*Salmonella*	*Enterobacter*	*Serratia*	*Proteus*	*Yersinia*
Motility	d	-	+	+	+	+	-
Voges - Proskauer test	-	-	-	+	d	d	-
Indole from tryptophan	d	d	-	-	-	d	d
Hydrogen sulfide produced	-	-	+	-	-	d	-
Lysine decarboxylase	+	-	+	d	d	-	-
Gas from glucose	+	-	-	+	d	+	-
Acid from lactose	d	-	-	+	d	-	d
Urease	-	-	-	d	-	+	d
Phenylalanine deaminase	-	-	-	-	-	+	-
Deoxyribo nuclease	-	-	-	-	+	-	-

+ = most or all species positive, - = most or all species negative, d = different reactions occur among species

1) อุณหภูมิ (temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเร็วหรือช้า อุณหภูมิของน้ำที่ผิวดินแตกต่างกันมาก ที่ขั้วโลกอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จนถึงบริเวณศูนย์สูตรมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำทะเลมากกว่า 90% มีอุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส จึงเหมาะกับการเจริญของไซโครไฟล์เท่านั้น ในน้ำพุร้อนบางแห่งมีอุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส ก็พบจุลินทรีย์อาศัยอยู่ได้ เป็นพวกเทอร์โมไฟล์ นอกจากนี้อุณหภูมิน้ำยังเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ทำให้ชนิดและจำนวนจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2) ความกดดันของน้ำ (hydrostatic pressure)

น้ำผิวดินและน้ำในมหาสมุทรลึก ๆ มีความกดดันต่างกัน ความกดดันของน้ำจะทำให้ pH ของน้ำทะเลลดลง ทำให้ความสามารถในการละลายสารอาหาร เช่น ไบคาร์บอเนต เพิ่มขึ้น 1 บรรยากาศทุก 10 เมตร ในมหาสมุทรลึกตั้งแต่ 1,000 เมตร จนถึง 10,000 เมตร ก็ยังพบจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเป็นพวกชอบความกดดันของน้ำ (Barophilic microorganisms)

3) แสงสว่าง (light)

สิ่งมีชีวิตในน้ำส่วนใหญ่ต้องการอาศัยสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้ทั้งทางตรง และทางอ้อม ในแหล่งน้ำส่วนใหญ่ผู้ผลิตขั้นต้น คือสาหร่าย ซึ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะถูกจำกัดด้วยแสงที่ส่องลงมา ความลึกของน้ำที่แสงส่องลงมาถึงเรียกว่า โฟติดโซน (photic zone) จะแตกต่างไปตามฤดูกาลและความขุ่นของน้ำ โดยทั่วไปการสังเคราะห์แสงเกิดที่น้ำระดับบน ๆ คือ 50 ถึง 125 เมตร นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังได้จากไบคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบ้างที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

4) ความเค็ม (salinity)

ในน้ำทะเลมีความเค็มสูง และมักคงที่ ความเข้มข้นของเกลืออยู่ระหว่าง 33-37 กรัม/กิโลกรัมของน้ำ เกลือส่วนใหญ่จะเป็นเกลือคลอไรด์ ซัลเฟต และคาร์บอเนตของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ความเข้มข้นของเกลือที่ปากแม่น้ำและชายฝั่งจะมีน้อยกว่า จุลินทรีย์ในทะเลส่วนใหญ่เป็นพวกชอบความเค็ม จะเจริญได้ดีที่ความเค็ม 2.5-4% แต่จุลินทรีย์จากทะเลสาบและแม่น้ำจะไม่เจริญถ้ามีความเค็มมากกว่า 1%

5) ความขุ่น (turbidity)

แหล่งน้ำมีความขุ่นไม่เท่ากัน ในบริเวณทะเลลึกจะใส บริเวณใกล้ฝั่งแม่น้ำจะมีความขุ่น สารแขวนลอยที่ทำให้น้ำมีความขุ่น ได้แก่ 1) แร่ธาตุจากบนบก, 2) ซากสารอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส เอมิสเซลลูโลส ไคทิน, 3) จุลินทรีย์ที่แขวนลอย ความขุ่นของน้ำมีผลต่อการแพร่ผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์แสงด้วย สารที่เป็นอนุภาคจะเป็นซับสเตรตให้จุลินทรีย์มาเกาะ และเป็นซับสเตรตที่จะถูกเมแทบอไลซ์ต่อไป แบคทีเรียในทะเลหลายชนิดเจริญได้เมื่อเกาะกับพื้นผิวที่แข็ง เราเรียกว่าเอพิแบคทีเรีย (epibacteria) หรือเพอริไฟต์ (periphytes)

6) พีเอช (pH)

จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำเจริญที่ pH ระหว่าง 6.5 ถึง 8.5 แต่ pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 เมื่อเลี้ยงแบคทีเรียจากทะเลในอาหารจะเจริญได้ดีที่สุดที่ pH 7.2-7.6

7) สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ (inorganic/organic constituents)

ชนิดและปริมาณของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำมีความสำคัญต่อชนิดของจุลินทรีย์ ไนเตรตและฟอสเฟตเป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญต่อการเจริญของสาหร่ายส่วนสารอินทรีย์จำเป็นต่าการเจริญของแบคทีเรียและเชื้อราที่เป็นแซโพรไฟต์ แหล่งน้ำใกล้ชายฝั่งซึ่งได้รับของเสียจากบ้านเรือนจะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอาหารมากกว่าแหล่งน้ำในทะเลเปิด ซึ่งปริมาณสารอาหารต่ำมากค่อนข้างคงที่ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีสารยับยั้งจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำใกล้ชายฝั่งได้ โลหะบางชนิด เช่น ปรอทและโลหะหนักอื่น ๆ ในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ยับยั้งการ

เจริญของจุลินทรีย์ได้ ในขณะเดียวกันก็ส่งเสริมการเจริญของเชื้อที่ต้านทานได้ซึ่งมีอาร์พลาสมิด (R plasmid, resistance plasmid)

น้ำเสีย และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสีย

1. ลักษณะของน้ำเสีย

น้ำเสีย (waste water หรือ sewage) เป็นน้ำที่ใช้แล้วจากชุมชน ประกอบด้วยน้ำเสียจากบ้านเรือนรวมทั้งสิ่งขับถ่าย น้ำซักล้าง และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมทั้งน้ำมัน คราบน้ำมัน น้ำกรด อาจรวมทั้งน้ำฝน น้ำผิวดิน ที่รวมเข้าสู่ท่อระบายน้ำ

น้ำเสียจากบ้านเรือนประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ถึง 99.9% ของแข็งที่แขวนลอย 0.02-0.03% และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน แอลกอฮอล์ และสารอนินทรีย์อื่น ๆ ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยแม้จะมีน้อย แต่ในเมืองใหญ่ ๆ แต่ละวันจะมีน้ำทิ้งเป็นน้ำเสียจำนวนมหาศาล ดังนั้นปริมาณของแข็งอาจมีถึง 100 ตัน นอกจากนี้ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำเสียยังเปลี่ยนแปลงตามแหล่งที่มาของน้ำเสียและช่วงเวลาที่ปลดปล่อยน้ำเสียออกมา สารอินทรีย์ในน้ำเสียได้มาจากสิ่งขับถ่ายของคนและของเสียจากบ้านเรือน ส่วนโรงงานอุตสาหกรรมจะปลดปล่อยทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้แก่ โรงงานฆ่าสัตว์ โรงงานน้ำตาล โรงงานกระดาษ โรงงานโลหะต่าง ๆ จะปล่อยทั้งกรด เกลือโลหะ และสารอนินทรีย์อื่น ๆ สารอินทรีย์ในน้ำเสียมีทั้งสารประกอบไนโตรเจนและไม่ใช่ไนโตรเจน

เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียเปลี่ยนแปลง ทำให้ชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์ในน้ำเสียเปลี่ยนแปลงด้วย จุลินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ เชื้อรา โพรโทซัว สาหร่าย แบคทีเรีย ไวรัส ในน้ำเสียอาจมีแบคทีเรียจำนวนล้าน ๆ เซลล์ต่อมิลลิลิตร รวมทั้งโคลิฟอร์ม สเตรปโตค็อกไค แอนแอโรบิกบาซิลไลที่สร้างสเปอร์ *Proteus* และแบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้คน จุลินทรีย์บางชนิดเป็นพวกก่อโรค เช่น แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคในทางเดินอาหารไวรัสที่ทำให้เกิดโรคโปลิโอ ตับอักเสบ นอกจากนี้ยังมีไว้รัสที่ทำลายแบคทีเรียที่เรียกว่าแบคทีริโอเฟจ

ดังนั้น เมื่อปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำ จึงเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์และอนินทรีย์สารให้แก่แหล่งน้ำ ทำให้แบคทีเรียนำไปใช้เป็นอาหารและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งย่อยสลายสารอินทรีย์ไปด้วย ในการนี้จะมีการใช้ออกซิเจนไปในการย่อยเรื่อย ๆ จนบางครั้งอาจใช้ไปเกือบหมด จึงเกิดสภาพไร้ออกซิเจนในแหล่งน้ำทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำทนอยู่ไม่ได้และตายไป และทำให้แบคทีเรียพวกแอนแอโรบเจริญขึ้นแทนที่มากมายและย่อยสารอินทรีย์ต่อไป การย่อยในสภาพที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะได้สารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นรวมทั้งก๊าซไข่เน่าด้วย ทำให้น้ำในแหล่งน้ำกลายเป็นน้ำเน่าเสีย การย่อย

สารอินทรีย์ในครั้งแรกเกิดจากแฟคัลเตตีฟแอนแอโรบิกไดเจสเตอร์ (facultative anaerobic digester) เช่น *Enterobacter, Alcaligenes, Escherichia, Pseudomonas* เป็นต้น ส่วนการย่อยในสภาพไร้ออกซิเจนเกิดจากแอนแอโรบที่แท้จริง เช่น *Methanobacterium, Methanosarcina, Methanococcus* ซึ่งจะย่อยสลายสารจนได้มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์

2. ชนิดของจุลินทรีย์ในน้ำเสีย

เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียอาจเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นจำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ในน้ำเสียจึงไม่คงที่ จุลินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ เชื้อรา โพรโตซัว สาหร่าย แบคทีเรียและไวรัส น้ำเสียที่ไม่ได้บำบัดจะมีแบคทีเรียจำนวนมากเป็นล้านๆ ต่อหนึ่งมิลลิเมตร ซึ่งได้แก่ โคลิฟอร์ม สเตรปโตค็อกไค แอนแอโรบแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ กลุ่มProteus และแบคทีเรียอื่นๆ ที่อยู่ในลำไส้คน แบคทีเรียในน้ำเสีย ได้แก่ *Bacteroides* spp., *Bifidobacterium* spp., *Clostridium perfringens*, *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli*, *Lactobacillus* spp. และ *Streptococcus faecalis* จุลินทรีย์ที่พบในน้ำเสียยังได้มาจากดินและแหล่งน้ำอื่นอีก เช่น *Sphaerotilus*, *Crenothrix*, *Beggiatoa* และรา เช่น *Saprolegnia* และ *Leptomitus* จุลินทรีย์พวกนี้ทำให้เกิดเมือกตามท่อน้ำ บางชนิดทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีกลิ่นเหม็นคล้ายไข่เน่า นอกจากนี้ยังพบแบคทีเรียชนิดอื่นอีก คือ *Cytophaga*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Bdellovibrio*, *Chromobacterium*, *Aeromonas*, และ *Rhodospirillum* นอกจากนี้ในน้ำเสียยังมีโพรโทซัว แบคทีเรีย และไวรัสที่ก่อโรคอยู่ด้วยโดยเป็นสาเหตุที่สำคัญของโรคท้องร่วง อหิวาตกโรค และไข้ไทฟอยด์ โปลิโอ ไวรัส ไวรัสตับอักเสบ และคอกแซกกีไวรัส ก็ถูกขับออกทางอุจจาระ และปะปนอยู่ในน้ำเสียด้วยรวมทั้งไวรัสที่เข้าทำลายแบคทีเรียก็พบในน้ำเสียด้วยเช่นกัน

ชนิดของแบคทีเรียในน้ำเสียจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการย่อยสลายน้ำเสียนั้น ในการย่อยสลายแบบแอนแอโรบ แบคทีเรียพวกแฟคัลเตตีฟ (เช่น *Enterobacter*, *Alcaligenes*, *Escherichia*, *Pseudomonas* เป็นต้น) จะมีอยู่มากในตอนต้น ต่อมาจึงมีพวกที่สร้างมีเทนซึ่งเป็นแอนแอโรบที่แท้จริง เช่น *Methanobacterium*, *Methanosarcina* และ *Methannococcus* ในที่สุดจะได้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

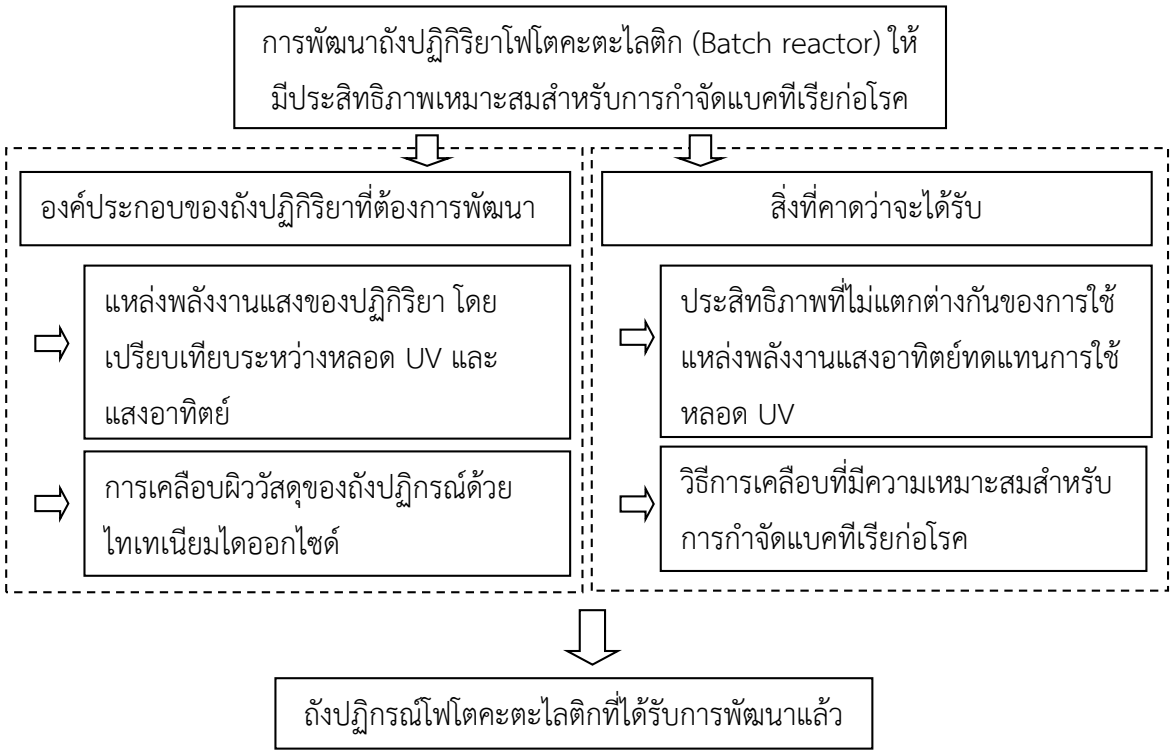
Rizzo[1] et al. (2014) ได้ศึกษาการยับยั้งอีโคไลดื้อยาที่คัดแยกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ใช้ในรูปผง, 0.05-2.00 g TiO_2/L) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้หลอด UVA 250 W ภายในเวลา 10 นาที สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของอีโคไลดื้อยาได้ 99.8% และ 77.2% เมื่อใช้ 0.10 และ 2.00 g TiO_2/L ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้แสงอาทิตย์ทดแทนหลอด UVA ยังพบว่าสามารถยับยั้งการอีโคไลดื้อยาได้เช่นเดียวกัน (93.2% ที่ 10 นาที และใช้ 0.05 g TiO_2/L) ส่วน Sousa et al., (2013) ยังได้ทำการทดสอบการกำจัดอีโคไลดื้อยาหลายชนิดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งพบว่าอีโคไลถูกกำจัดไป 98.7% และ 99.5% เมื่อได้รับการกระตุ้นเป็นเวลา 40 นาที ด้วยหลอด UVA 10 W/m^2 ภายใต้ปฏิกิริยาที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ paint coat และแบบ suspended ตามลำดับ ส่วนการศึกษาของ Rizzo[2] et al., 2014 ที่มีการศึกษาการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาด้วยระบบที่ใช้สาร non-methallic species เช่น ไนโตรเจน เคลือบผิววัสดุ (N-doped TiO_2, NDT) เนื่องจากเป็นระบบที่ช่วยส่งเสริมให้การเกิดกระบวนการมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งพบว่ากระบวนการไม่มีอิทธิพลต่ออีโคไลที่อยู่รอด ในแง่ของการดื้อยา tetracycline แต่พบการลดระดับการดื้อยา vancomycin และไวต่อยา cefuroxime และยังมีในส่วนของ Tasi et al. (2010) ที่สนับสนุนว่าโฟโตคะตะไลติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ UVA กระตุ้น มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแบคทีเรียหลายชนิด เช่น *Staphylococcus aureus*, *Acinetobacter baumannii* และ *Enterococcus faecalis* ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกกำจัดได้ภายใต้กระบวนการดังกล่าว

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Molling et al. (2014) ที่ได้ทำการศึกษาพวกสารเคมีชนิดต่างๆ ซึ่งมีคุณสมบัติในการการกำจัดแบคทีเรียได้มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยการเคลือบบนผิววัสดุ ก่อนการนำมาทดสอบในกระบวนการกำจัดแบคทีเรีย ซึ่งมีอีโคไลเป็นแบคทีเรียตัวแทน ซึ่งผลการศึกษานั้นพบว่า TiO_2, poly (dimethylsiloxane), tricosan, และ zine pyrithione มีประสิทธิภาพ 100% ในการกำจัดอีโคไล และยังมีการทดสอบการพัฒนาการใช้ TiO_2 เคลือบผิววัสดุร่วมกับสารชนิดอื่นๆ เช่น Silver (Ag), Manganese (Mn), และ Cobalt (Co) เพื่อประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำ (Kowal et al., 2011; Venieri et al., 2014) ส่วนในงานวิจัยของ García-Fernández et al. (2014) ที่มีการสร้าง pilot plant ขนาด 60 ลิตร ของถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกประเภท Solar compound parabolic collectors (CPC) มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ suspended (100 mg/L) โดยในการศึกษานี้มีการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไล โดยการปรับเปลี่ยน

อุณหภูมิ (15, 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส) ของถังปฏิกิริยาค่อนข้างมีผลต่อประสิทธิภาพดังกล่าว โดยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มมากขึ้น

กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัยแสดงรายละเอียดได้ดังในแผนภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

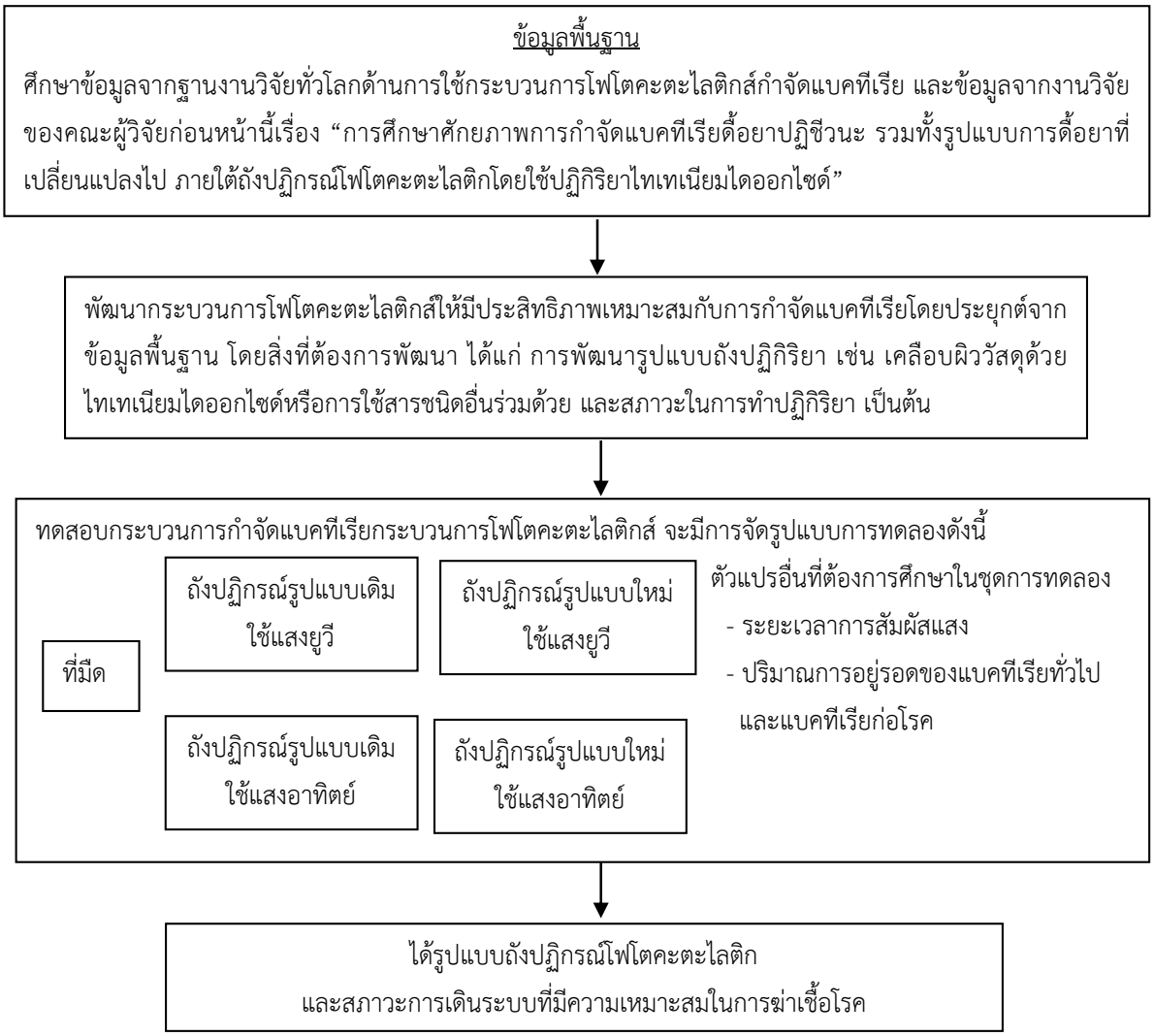
การดำเนินการศึกษาในครั้งนี้ ถือเป็นการดำเนินงานวิจัยต่อเนื่องจากงานเรื่อง“การศึกษาศักยภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ รวมทั้งรูปแบบการดื้อยาที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์” โดยงานในส่วนดังกล่าวจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้โฟโตคะตะไลติกส์ทดแทนการใช้คลอรีนในการกำจัดแบคทีเรีย โดยศึกษาการพัฒนารูปแบบการดื้อยาของทั้งสองกระบวนการเปรียบเทียบควบคู่ไปด้วย แต่การศึกษาในครั้งนี้ซึ่งเป็นส่วนต่อเนื่องจะทำการศึกษาเชิงลึกเพิ่มเติมภายใต้วัตถุประสงค์ที่ต้องการพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกให้มีรูปแบบที่เหมาะสมในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคในน้ำเสียชุมชน ซึ่งจะดำเนินการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของคณะผู้วิจัย และจากฐานงานวิจัยด้านการกำจัดแบคทีเรียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกส์มาสรุปข้อมูลเพื่อต่อยอดการศึกษา โดยภาพรวมการดำเนินการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3.1

นอกจากนี้การศึกษายังแบ่งออกเป็น 3 ส่วน หลักๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนที่ 1 การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกเพื่อให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรียโดยเฉพาะ, ส่วนที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี และส่วนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโฟโตคะตะไลติกภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแง่ของการอยู่รอดของแบคทีเรียและคุณสมบัติการก่อโรคที่คาดว่าน่าจะมีอิทธิพลในการก่อเกิดปัญหาทางด้านสาธารณสุข โดยรายละเอียดการศึกษาข้อมูลในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

<u>ส่วนที่ 1</u> การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกที่เคลือบผิวด้วยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาในส่วนที่ 1 นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติก (Batch reactor) ให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรียโดยเฉพาะ ซึ่งรูปแบบการดำเนินงานมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบถังปฏิกรณ์ ซึ่งข้อมูลในประเด็นนี้นำมาจาก 2 ส่วนหลักๆ โดยส่วนแรก คือ ข้อมูลงานวิจัยจากฐานข้อมูลนานาชาติในช่วงปัจจุบันที่มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกในการกำจัดแบคทีเรีย และข้อมูลในส่วนที่ 2 เกี่ยวข้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของคณะผู้วิจัยที่มีการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นมาแล้วบางส่วน



ภาพที่ 3.1 แสดงภาพรวมของการดำเนินการวิจัย

2. นำข้อมูลทั้ง 2 ส่วน ตามที่กล่าวมาในข้อ 1 มาประมวลผลเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ของถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรีย

3. เมื่อได้ประเด็นที่ต้องการใช้ในการพัฒนาถังปฏิกิริยาฯให้มีความเหมาะสมได้แล้ว จะทำการออกแบบ และสร้างถังปฏิกรณ์ให้มีความเหมาะสมต่อไป

4. ทดสอบคุณลักษณะเบื้องต้นของถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติก และประเมินคุณภาพเบื้องต้น เช่น ข้อมูลทางด้านวัสดุศาสตร์ โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

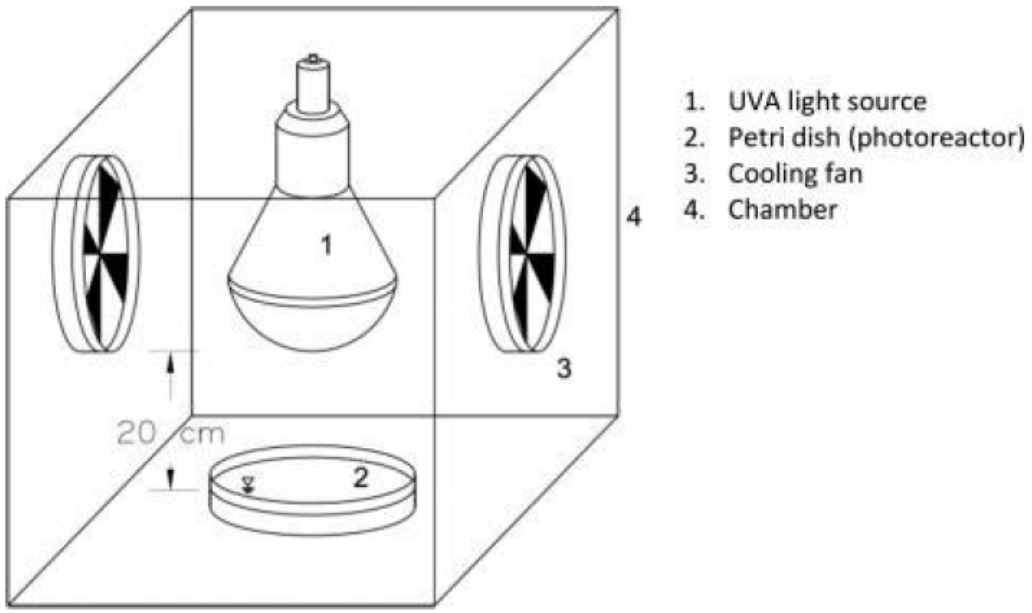
5. เมื่อได้คุณสมบัติต่างๆตรงตามที่ต้องการ จึงจะนำถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่ได้ ไปใช้ในการศึกษาขั้นตอนถัดไป

<u>ส่วนที่ 2</u> การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกในการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี

การศึกษาข้อมูลต่อเนื่องในส่วนนี้ จะดำเนินการหลังจากทำการออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์แบบ Batch เป็นที่แล้วเสร็จ ซึ่งการดำเนินการประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ออกแบบแผนการทดลองดังแผนภาพที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ในการศึกษา (ถังปฏิกรณ์ต้นแบบ) เป็นถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ (Batch Reactor) ที่เป็นระบบปิดที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารเคมีหลักในการเคลือบผิววัสดุ และอาจมีการใช้สารเคมีประเภทอื่นร่วมในการเคลือบผิว ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์สำหรับการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Rojviroon et al., 2015)

- ลักษณะของถังปฏิกรณ์ต้นแบบที่นำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการศึกษาการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะในครั้งนี้ เป็นองค์ความรู้ที่มีการต่อยอดงานวิจัยมาจากงานวิจัยของทางห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีการศึกษาถึงกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการจัดการสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ อาทิเช่น โทลูอีน สีย้อม และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี เป็นต้น

(Rojviroon et al., 2012; Rojviroon et al., 2014, Rojviroon et al., 2015; Rojviroon and Sirivithayapakorn, 2013)

- แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดสอบ คือ หลอด UV-LED ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 365 นาโนเมตร และแสงอาทิตย์

- มีการใช้ที่มืดเป็นตัวควบคุมในชุดการทดสอบ

- ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ใช้เป็นตัวแทนการศึกษาในครั้งนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองขนาดใหญ่ และเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยก่อนที่จะนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาทำการศึกษา จะมีการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพเบื้องต้น รวมทั้งคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียก่อโรคตัวแทน

- น้ำเสียที่ทำการศึกษาประกอบด้วยน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด น้ำเสียภายในระบบบำบัด และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

- การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมีในการศึกษานี้ประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH), ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS), ของแข็งละลายน้ำ (Total dissolved solids, TDS), ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย (MLSS), บีโอดี (Biological oxygen demand, BOD), ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD), ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl nitrogen, TKN), ซัลไฟด์ (Sulfide) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphate) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012)

- ตัวแทนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบไปด้วย 1) จุลินทรีย์ทั้งหมด (Total microorganism) และ 2) แบคทีเรียก่อโรค โดยใช้ตัวแทนกลุ่มโคลิฟอร์ม (Coliform bacteria) และอีโคไล (*E. coli*) ซึ่งจัดเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ โดยในที่นี้จะใช้แบคทีเรียที่พบจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยเฉพาะในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเป็นตัวแทน

2. ชุดการทดลองทั้งหมดที่ออกแบบเรียบร้อยแล้ว ทุกชุดการทดลองจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงอาทิตย์, หลอด UVA และใช้ที่มืดเป็นตัวควบคุม

3. การติดตามประชากรของแบคทีเรียประเภทต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไป ในที่นี้ใช้การนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏ (CFU/ml) โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

- การติดตามปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ด้วยการใช้เทคนิคการเจือจางตัวอย่างน้ำ (Serial dilution) และบ่มตัวอย่างในลักษณะของการทำ plate count agar โดยใช้อาหาร Nutrient agar (NA) (HIMEDIA) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

- การติดตามปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม และอีโคไล ใช้การกรองน้ำตัวอย่าง (Filtration technique) และเลี้ยงบนอาหาร Chromocult coliform agar ES® (Merck Micro-

biology) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายหลังการบ่มจะทำการตรวจสอบโคโลนีที่ปรากฏ โดยโคโลนีสีน้ำเงิน คือ อีโคไล และโคโลนีสีชมพู คือ แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มสายพันธุ์อื่น

4. ทำการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือรอดจากกระบวนการฆ่าเชื้อและมีความทนทานต่อการดื้อยาปฏิชีวนะ โดยในที่นี้ใช้วิธีการ Microbial inhibitory concentration (MIC) test ในการวิเคราะห์ มีการใช้ยาปฏิชีวนะแบบผงจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ Tetracycline hydrochloride (SRL), Ciprofloxacin hydrochloride (SRL) และ Ampicillin sodium salt (SRL) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกมาทำการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือรอดในอาหารแข็ง NA ที่มีการเติมยาปฏิชีวนะที่ระดับความเข้มข้นต่างๆในรูปแบบ double dilution (0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 และ 256 µg/ml) โดยบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

<u>ส่วนที่ 3</u> การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแง่ของการอยู่รอดของแบคทีเรียและคุณสมบัติการก่อโรคที่มีอิทธิพลก่อเกิดปัญหาทางด้านสาธารณสุข

จากการศึกษาข้อมูลในช่วงก่อนหน้าจะทราบถึงสภาวะที่มีความเหมาะสมที่ใช้สำหรับการกำจัดแบคทีเรียจากน้ำเสียชุมชน ทางคณะผู้วิจัยจะนำข้อมูลดังกล่าวมาศึกษาเชิงลึกถึงสิ่งที่หลงเหลืออยู่ภายหลังกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

1. สภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสมเมื่อใช้แหล่งพลังงานแสงที่แตกต่างกันอาจมีรูปแบบที่แตกต่างกันก็เป็นไปได้ ในที่นี้จะยึดรูปแบบการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับแหล่งกำเนิดแสงแต่ละประเภทในการทดสอบขั้นถัดไป

2. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจะมุ่งเน้นในเรื่องของระยะเวลาที่กักพักน้ำไว้ หลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะทราบว่า เมื่อทิ้งน้ำที่ผ่านการบำบัดไว้นั้น แบคทีเรียจะสามารถกลับมาเจริญเติบโตได้อีกครั้งหรือไม่ อีกทั้งจะมีการตรวจวัดคุณสมบัติการก่อโรคเพิ่มเติม

3. เมื่อได้สภาวะการเดินระบบที่มีความเหมาะสม จะทำการทดสอบความปลอดภัยจากการนำน้ำนั้นกลับมาใช้ประโยชน์ โดยในที่นี้จะใช้การศึกษาปริมาณอีโคไลที่เหลือรอดจากการบำบัดน้ำเสียและคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะต่างๆที่มีความสำคัญเพื่อศึกษาเชิงลึกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำปรากฏการณ์ดังกล่าวหรือไม่

4. การวิเคราะห์ความไวต่อยาปฏิชีวนะด้วยวิธี Disk diffusion method (CLSI, 2012)

1) การทดสอบความไวต่อยาปฏิชีวนะของอีโคไลด้วยวิธี Disk diffusion method (CLSI, 2012) ซึ่งการศึกษานี้จะใช้ยาในการทดสอบจำนวน 11 ชนิด แบ่งออกเป็นยาจำนวน 9 กลุ่ม โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1

2) การทดสอบเริ่มจากการนำโคโลนีเดี่ยวๆของอีโคไลมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ TS broth (HIMEDIA) บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส จนระดับความขุ่นของอาหารมีค่าเท่ากับ McFarland Standard เบอร์ 0.5 ซึ่งมีปริมาณเชื้อเทียบเท่า $1.5x10^8$ โคโลนี/มิลลิลิตร (CFU/ml) จากนั้นทำการ swap เชื้อให้ทั่วอาหารเลี้ยงเชื้อ Muller Hinton agar (Difco™) ด้วยไม้พันสำลี จากนั้นทำการวางเม็ดยาปฏิชีวนะ (BBL™) บนอาหาร นำไปบ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง

3) อ่านผลการทดสอบโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบเม็ดยาปฏิชีวนะในหน่วยมิลลิเมตร แล้วแปรผลเป็นค่า S, I, R จากการเทียบกับค่ามาตรฐานของ Clinical and Laboratory Standards Institute, CLSI (2012)

โดย	S = Sensitive	เชื้อแบคทีเรียไม่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะชนิดที่ทำการทดสอบ
	I = Intermediate	เชื้อแบคทีเรียอาจมีการพัฒนาจนดื้อต่อยาปฏิชีวนะชนิดที่ทำการทดสอบ
	R = Resistant	เชื้อแบคทีเรียดื้อต่อยาปฏิชีวนะชนิดที่ทำการทดสอบ

4) ข้อมูลรูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะของอีโคไลจากแต่ละจุดเก็บตัวอย่างที่จะทำการแปลผล ได้แก่ เช่น จำนวนเชื้อที่ดื้อต่อยา (Resistant), จำนวนเชื้อที่น่าจะพัฒนาไปเป็นเชื้อดื้อยาในอนาคต (Intermediate), จำนวนเชื้อที่ไม่ดื้อต่อยา (Sensitive), รูปแบบการดื้อยา (เชื้อ 1 โคโลนี มีความสามารถในการดื้อยาได้กี่ชนิด, Antibiotic resistant pattern), และจำนวนเชื้อที่ดื้อต่อยามากกว่า 1 ชนิด ขึ้นไป (Multiple antibiotic resistance bacteria, MAR) โดยวิธีการคำนวณการดื้อยาแสดงดังสมการที่ 3.1-3.3

$$\text{\% การดื้อยา (\% Resistance)} = \frac{\text{จำนวนอีโคไลที่ดื้อยา}}{\text{จำนวนอีโคไลทั้งหมดที่ทดสอบ}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{\% การเริ่มพัฒนาการดื้อยา (\% Intermediate)} = \frac{\text{จำนวนอีโคไลที่เริ่มการพัฒนาการดื้อยา}}{\text{จำนวนอีโคไลทั้งหมดที่ทดสอบ}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{\% ความไวต่อการต้านการดื้อยา (\% Sensitive)} = \frac{\text{จำนวนอีโคไลที่ไวต่อการต้านการดื้อยา}}{\text{จำนวนอีโคไลทั้งหมดที่ทดสอบ}} \times 100 \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการทดสอบความไวต่อยาของอีโคไล

ยาปฏิชีวนะ	ตัวย่อ	ความเข้มข้นในแผ่นยา (μg)	ค่ามาตรฐาน		
			S	I	R
Aminoglycoside					
- Gentamicin	GM	10	≥15	13-14	≤12
Tetracycline					
- Tetracycline	TC	30	≥15	12-14	≤11
Phenicol					
- Chloramphenicol	CP	5	≥18	13-17	≤12
Fluoroquinolone					
- Norfloxacin	NOR	10	≥17	13-16	≤12
- Ciprofloxacin	CIP	5	≥21	16-20	≤15
Folate pathway inhibitors					
- Sulfamethoxazole /Trimethoprim	SXT	1.25/23.75	≥16	11-15	≤10
Fosfomycin					
- Fosfomycin	FOS	200	≥16	13-15	≤12
Cephalosporins 2nd generation					
- Cefuroxime	CXM	30	≥18	15-17	≤14
Cephalosporins 3rd generation					
- Cefotaxime	CTX	30	≥26	23-25	≤22
- Cetazidime	CAZ	30	≥21	18-20	≤17
Penicillin					
- Ampicillin	AMP	10	≥17	14-16	≤13

ที่มา: CLSI (2012)

นอกจากนี้ยังมีการหาค่า MAR index (multiple antibiotic resistance index) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกระดับการดื้อยาในภาพรวมของแต่ละตัวอย่าง โดยคำนวณจากสูตร “*a/b*” โดยที่ “*a*” แทนจำนวนแผ่นยาทดสอบทั้งหมดที่แสดงผลว่าอีโคไลดื้อต่อยานั้นๆ และ “*b*” แทนจำนวนแผ่นยาทดสอบทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ (Krumperman 1983) เมื่อค่า *“a/b”* ของตัวอย่างใดเข้าใกล้ 1 แสดงว่าอีโคไลในตัวอย่างนั้นมีระดับการดื้อยารุนแรง คือเป็นอีโคไลที่ดื้อยาหลายชนิดนั่นเอง

ในการศึกษาครั้งนี้มีการเพิ่มเติมผลการศึกษาในส่วนของการทดสอบการผลิตเอนไซม์เบต้าแลคตาเมสชนิด Extended spectrum beta-lactamase (ESBL) ในอีโคไลที่คัดแยกโดยเอนไซม์ดังกล่าวจะพบมากในแบคทีเรียวงศ์ *Enterobacteriaceae* และสามารถยับยั้งการออกฤทธิ์ของยากลุ่ม beta-lactam เช่น penicillin และ cephalosporin โดยการย่อยสลายวงแหวนของยา (Mesa et al., 2006; Rupp and Fey, 2003) วิธีการเริ่มจากการ swap อีโคไลที่เลี้ยงในอาหาร TS broth ลงบนอาหาร Muller Hinton agar และวางแผ่นยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 2 คู่ ซึ่งประกอบด้วยคู่ที่ 1 แผ่นยา Cefotaxime (30 µg) และ Cefotaxime ผสม Clavulanic acid (30/10 µg) และคู่ที่ 2 แผ่นยา Cetazidime (30 µg) และ Cetazidime ผสม Clavulanic acid (30/10 µg) ทำการบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาอ่านผลการทดสอบจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาแต่ละชนิด เปรียบเทียบผลการศึกษาในแต่ละคู่ โดยกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นยาที่ผสม Clavulanic acid มีค่ามากกว่าแผ่นยาที่ไม่ผสมสารดังกล่าวตั้งแต่ 5 mm. ขึ้นไป จะจัดว่าอีโคไลสายพันธุ์ดังกล่าวเข้าข่ายเป็นอีโคไลที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ ESBL (CLSI, 2012)

ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการศึกษาทั้ง 3 ส่วน ทางคณะผู้วิจัยมีความคาดหวังว่า จะได้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกส์ต้นแบบ (Lab-scale) ที่ความเหมาะสมสำหรับกำจัดแบคทีเรียโดยใช้ในน้ำเสียชุมชนเป็นต้นแบบ และองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการต่อยอดเพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และมีประโยชน์ในการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข และน่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทำการศึกษาทางด้านนี้ และมีประโยชน์ต่อหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการดำเนินงานวิจัยต่อเนื่องจากงานเรื่อง“การศึกษาศักยภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ รวมทั้งรูปแบบการดื้อยาที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์” โดยการดำเนินงานครั้งนี้มีการพัฒนารูปแบบการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยการคัดเลือกแหล่งน้ำเสียชุมชนที่จะใช้เป็นตัวแทนจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพขนาดใหญ่ ในขณะที่การทดลองในช่วงที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยใช้น้ำเสียที่ทำการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัด นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคจากแบคที่เรียที่พบปรากฏในแหล่งน้ำเสียจริงทดแทนการคัดเลือกเฉพาะแบคทีเรียตัวแทนจำนวนไม่กี่สายพันธุ์มาทำการการทดลองดังเช่นในงานส่วนที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัย โดยในที่นี้ทำการนำเสนอผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนที่ 1 การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกที่เคลือบผิวด้วยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรียโดยเฉพาะ, ส่วนที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี, และส่วนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแง่ของการอยู่รอดของแบคทีเรียและคุณสมบัติการก่อโรคที่คาดว่าน่าจะมีอิทธิพลก่อเกิดปัญหาทางด้านสาธารณสุข โดยผลการศึกษาข้อมูลในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกที่เคลือบผิวด้วยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการกำจัดแบคทีเรีย

ในส่วนของการพัฒนาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ต้นแบบโฟโตคะตะไลติกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำเสีย ซึ่งส่วนแรกของการดำเนินงานจะเป็นการทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์เป็นบทความลงในวารสารระดับนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาถังปฏิกรณ์ โดยจะมุ่งเน้นเฉพาะในประเด็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียเป็นหลัก ซึ่งปัจจัยที่ทำการพิจารณา ได้แก่ สารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา วิธีการเคลือบผิววัสดุ แหล่งพลังงานแสงที่ใช้ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และแบคทีเรียตัวแทนที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งผลจากการทบทวนวรรณกรรมในเบื้องต้น แสดงรายละเอียดดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสีย

วัสดุที่ใช้	วิธีการเคลือบผิว	วิธีการศึกษา	แหล่งอ้างอิง
Ag/AgBr/ $ZnFe_2O_4$	Sol gel method และ hydrothermal method	ทดสอบโดยใช้หลอดซีนอนเติมสารที่เตรียมในน้ำมีอีโคไล และทำปฏิกิริยาช่วง 0-120 นาที	Xu et al. (2018)
Ag-doped TiO_2	Sol gel method	ทดสอบโดยใช้หลอดฮาโลเจน เตรียมละลายสารในตัวอย่างน้ำก่อนทำการทดสอบ เวลาทดสอบคือ 60 นาที โดยใช้อีโคไล และแบคทีเรียอื่นๆเป็นตัวแทน	Ali et al. (2018)
Ag/BiOI composite	solvothermal process และ subsequent photodeposition method	ทดสอบโดยใช้หลอดแกลเลียมไอโอดีน เตรียมละลายสารในตัวอย่างน้ำก่อนทำการทดสอบ และใช้อีโคไล8099เป็นตัวแทน เวลาที่ทดสอบ 0-30 นาที	Zhu et al. (2012)
Ag3PO4/TiO2/Fe3O4 Heterostructure	จุ่มสารที่เตรียมเคลือบที่ผิวกระดาษกรอง	ใช้หลอดซีนอนและตัวกรองตัดแสงUV ทดสอบในน้ำที่เติมอีโคไล DH5**α** ระยะเวลา 0-50 นาที	Xu et al. (2014)
Bi_2MoO_6-AgBr	mixed solvothermal-precipitation method	ทดสอบโดยใช้หลอดซีนอนมีการเติมสารที่เตรียมและอีโคไลATCC15597ลงในน้ำ ทดสอบที่ 0-90 นาที	Liang et al. (2018)

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสีย

วัสดุที่ใช้	วิธีการเคลือบผิว	วิธีการศึกษา	แหล่งอ้างอิง
Cu-doped TiO_2	Sol gel method และ wet impregnation method	ทดสอบโดยใช้หลอดยูวีและหลอดฟลูออเรสเซนต์ ใช้อีโคไล K12 เป็นตัวแทน และ ทดสอบตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำช่วงระยะเวลา 0-180 นาที	Khraisheh et al. (2015)
Cu-TiO2 nanofibers	สังเคราะห์เป็นแบบผง	ทดสอบโดยใช้หลอดซีนอนทำการละลายสารที่เตรียมในน้ำที่เติมอีโคไล285 และแบคทีเรียโอฟาจ f2 ทดสอบที่ 0-240 นาที	Zheng et al. (2018)
Ln^{3+}-doped ZnO	precipitation method	ทดสอบโดยใช้หลอดยูวี ในน้ำเสียและน้ำที่เติมอีโคไล ATCC7701 ที่ระยะเวลา 0-120 นาที	Ibrahim and Asal (2017)
Mn-, Co-, Mn/Co-doped TiO_2	Co-precipitation method	ทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์หลอดซีนอนควบคู่แผ่นกรองแสง และใช้อีโคไล ATCC23716 ที่เติมลงในน้ำเป็นตัวแทน ทดสอบที่ 0-30 นาที	Venieri et al. (2014)
Nitrogen-doped TiO_2	solvent-casting method	ทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์ด้วยถังปฏิกิริยาชนิด Solarphoto reactor ที่เวลา 0-120 นาที โดยใช้อีโคไลเป็นตัวแทน	Sacco et al. (2018)

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกสำหรับการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสีย

วัสดุที่ใช้	วิธีการเคลือบผิว	วิธีการศึกษา	แหล่งอ้างอิง
ZnO/TiO_2 composites	incipient wet impregnation method	ทดสอบโดยใช้แสงยูวีและแสงจากหลอดไฟทั่วไป (T5 8W) ใช้น้ำประปาที่มีการเติมสารที่เตรียมและอีโคไลในน้ำก่อนทำการทดสอบ โดยทดสอบที่เวลา 0-60 นาที	Sethi and Sakthivel (2017)
ZnO-CdS-Ag ternary nanocomposite	Combustion Synthesis และ hydrothermal method	ทดสอบโดยใช้แสงยูวี ใช้น้ำที่มีการเติมสารที่เตรียมและอีโคไล MG1665 ในน้ำก่อนทำการทดสอบ โดยทดสอบที่เวลา 0-60 นาที	Gupta et al. (2017)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจะพบว่าในการที่จะพัฒนาถังปฏิกรณ์โฟโคคะตะไลติกให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำ สามารถปรับรูปแบบของถังปฏิกรณ์ได้ในหลายส่วนไม่ว่าจะเป็น

1) การปรับเปลี่ยนแหล่งพลังงานแสงที่ใช้เพื่อกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา เช่น การใช้หลอดไฟหลายชนิดร่วมกัน หรือการใช้ร่วมกับแสงอาทิตย์ และการใช้แผ่นกรองแสงเพื่อปรับให้ได้ความยาวคลื่นแสงในช่วงที่สนใจ เป็นต้น

2) การใช้สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารเคมีอื่นๆ (เป็นวิธีการที่นิยม) รวมทั้งวิธีการที่ใช้ในการเตรียมสารก็ยังส่งผลต่อรูปแบบการเรียงตัวของอนุภาคซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเช่นกัน นอกจากนี้สารที่งานวิจัยต่างๆสนใจศึกษามักจัดเป็นสารที่ต้านฤทธิ์ของแบคทีเรีย (Antimicrobial agents)

3) รูปแบบการนำสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ข้อ 2) ไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจากการทบทวนข้อมูลพบว่ามีการใช้งานทั้งในรูปของแบบผงที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนต่างๆและแบบที่เคลือบติดบนผิวของวัสดุที่รองรับตัวอย่างน้ำที่จะทำการทดสอบ ซึ่งรูปแบบแรกจะมีความยุ่งยากในขั้นตอนการ

แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำเสีย ส่วนรูปแบบหลังมีความสะดวกมากกว่าแต่มีต้นทุนสูงจากการเคลือบสารติดผิววัสดุรวมทั้งใช้ระยะเวลาในการดำเนินการ

4) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก จากการศึกษาข้อมูลพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง 0-240 นาที แต่ส่วนใหญ่นิยมทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เช่น 0-120 นาที โดยประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียตัวแทนส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าร้อยละ 90

กล่าวโดยสรุป ในการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยจะคงรูปแบบที่มีการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ และมีการเพิ่มเติมสารที่มีคุณสมบัติในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคเพิ่มเติมซึ่งในที่นี้สนใจสารประกอบซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) อีกทั้งยังมีการทดสอบการปรับเปลี่ยนมาใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนการใช้หลอดยูวี

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียระหว่างการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนหลอดยูวี

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการดำเนินงานทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียที่เหลือรอดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะการเคลือบติดผิววัสดุ และระบบที่มีลักษณะเช่นเดียวกันแต่มีการพัฒนาสารประกอบที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในที่นี้ใช้ซิลเวอร์ซัลเฟตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้น ในการศึกษานี้จะมีถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกในการศึกษาจำนวน 2 ประเภท ซึ่งในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานจะดำเนินการควบคู่กันไปและทดสอบเปรียบเทียบเพิ่มเติมระหว่างการใช้พลังงานแสงจากหลอดยูวีและแสงอาทิตย์ในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้แบ่งการนำเสนอผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ส่วนที่ 2 การศึกษารูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ส่วนที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และส่วนที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยรายละเอียดผลการดำเนินงานมีดังนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ที่ใช้เป็นแหล่งตัวแทนในการศึกษามีความสามารถในการรองรับน้ำเสียจากชุมชนจำนวน 200,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน จากประชากร 580,000 คน ครอบคลุมพื้นที่

28.5 ตารางกิโลเมตร โดยระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวจัดเป็นระบบ Activated sludge (AS) แบบ Sequencing batch reactor (SBR) หรือ CASS (Cyclic Activated Sludge System) โดยใช้การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์แบบเป็นรอบๆภายใต้ถังเติมอากาศและใช้ถังเดียวกันนี้ทำหน้าที่เป็นถังตกตะกอน โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ดำเนินการศึกษาข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มาจากชุมชน โดยมุ่งเน้นในประเด็นของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว เนื่องจากจะมีการนำน้ำจากแหล่งดังกล่าวมาใช้เป็นแหล่งน้ำเสียตัวแทนในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาข้อมูลคุณภาพน้ำเสียของระบบ CASS จำนวน 3 จุด ได้แก่ 1) น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ 2) น้ำเสียภายในถัง SBR และ 3) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด โดยพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีที่ทำการติดตามตรวจสอบประกอบไปด้วยพีเอช (pH), ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS), ของแข็งละลายน้ำ (Total dissolved solids, TDS), ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย (MLSS), บีโอดี (Biological oxygen demand, BOD), ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD), ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl nitrogen, TKN), ซัลไฟด์ (Sulfide) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphate) นอกจากนี้ยังมีการติดตามตรวจสอบพารามิเตอร์ทางชีววิทยา เช่น ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (Total bacteria) โคลิฟอร์ม (Coliform bactrtia) และอีโคไล (*Escherichia coli*) โดยทั้งหมดใช้วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) ซึ่งข้อมูลผลการศึกษาแสดงรายละเอียดดังในตารางที่ 4.2

ซึ่งผลจากการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำ พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบ CASS ที่ทำการศึกษามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อพิจารณาในรูปของบีโอดีเป็นหลัก โดยมีความสามารถอยู่ที่ร้อยละ 93.7 ซึ่งน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบมีค่า 18.9 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ภายหลังผ่านออกระบบบำบัดมีค่าลดลงอยู่ที่ 1.2 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อพิจารณาคุณภาพน้ำในพารามิเตอร์ทางชีวภาพจะพบว่าปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์มีปริมาณอยู่ในช่วง 3.90×10^4-2.07×10^6 โคโลนี/มิลลิลิตร โดยปริมาณแบคทีเรียส่วนใหญ่มีการสะสมตัวอยู่ที่ตะกอนภายในถังเติมอากาศ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบบำบัดดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการลดปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดโดยสามารถลดลงได้ถึงร้อยละ 90.49 และเมื่อศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมถึงปริมาณแบคทีเรียก่อโรคซึ่งในที่นี้ใช้แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (Coliform bacteria) และอีโคไลซึ่งเป็นหนึ่งในแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวเป็นตัวแทนในการศึกษาแบคทีเรียก่อโรค โดยทั่วไปนิยมใช้เป็นแบคทีเรียตัวแทนในการศึกษาการปนเปื้อนของสิ่งขับถ่ายจากสิ่งมีชีวิต (คน และสัตว์เลือดอุ่น) สู่สิ่งแวดล้อม (Ishii and Sadowsky, 2008; Łuczkiewicz et al., 2010) ซึ่งจากผลการศึกษาข้อมูลปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มในระบบบำบัด CASS จะพบค่าอยู่ในช่วง 2.94×10^2-8.62×10^3 โคโลนี/มิลลิลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 0.75-0.87 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด สำหรับปริมาณอีโคไลในระบบนั้นพบว่ามีปริมาณ

อยู่ที่ร้อยละ 22.45-47.89 ($6.60x10^1$-$3.06x10^3$ โคโลนี/มิลลิลิตร) เมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม แสดงให้เห็นว่าในระบบบำบัดแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มส่วนใหญ่ที่พบจัดเป็นแบคทีเรียชนิดอีโคไล นอกจากนี้แนวโน้มของการพบแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและอีโคไลในระบบเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกันกับข้อมูลการพบปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า ภายในถังเติมอากาศจัดเป็นจุดที่มีค่าความหนาแน่นของของแข็งแขวนลอยสูง (MLSS มีค่า 8,508 มิลลิกรัม/ลิตร) ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของจุลินทรีย์สายพันธุ์ต่างๆที่ทำหน้าที่ร่วมกันในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ อีกทั้งยังพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและอีโคไล โดยสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 91.72 และร้อยละ 96.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมีและชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	ระบบบำบัดน้ำเสีย		
	ก่อนเข้าระบบ	ถังเติมอากาศ	หลังผ่านระบบ
พีเอช	7.84	-	7.86
ของแข็งแขวนลอย (mg/l)[ก]	67	8,508	2
ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	374	-	286
บีโอดี (mg/l)	18.9	-	1.2
ซีโอดี (mg/l)	69	-	16
ทีเคเอ็น (mg/l)	20.2	-	11.2
ซัลไฟด์ (mg/l)	0.06	-	0.01
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (mg/l)	1.97	-	1.94
แบคทีเรียทั้งหมด (CFU/ml)	$4.10x10^5$	$2.07x10^6$	$3.90x10^4$
โคลิฟอร์มทั้งหมด (CFU/ml)	$3.55x10^3$	$8.62x10^3$	$2.94x10^2$
อีโคไล (CFU/ml)	$1.70x10^3$	$3.06x10^3$	$6.60x10^1$

หมายเหตุ [ก] ของแข็งแขวนลอยภายในถังเติมอากาศวัดในรูปของตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย (MLSS)

2. การศึกษารูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

จากการศึกษาในส่วนก่อนหน้าเมื่อพิจารณาเฉพาะประเด็นการกำจัดแบคทีเรียและแบคทีเรียก่อโรคจากระบบบำบัดน้ำเสีย จะพบว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคมากกว่าร้อยละ 90 ดังนั้น ก่อนที่จะดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นควรที่จะดำเนินการศึกษาถึงคุณสมบัติเพิ่มเติมของ

แบคทีเรียก่อโรคดังกล่าว เพื่อที่จะได้ทราบถึงแนวทางที่เหมาะสมในการดำเนินงานต่อไป โดยในส่วนของการดำเนินงานนั้นจะทำการศึกษาถึงคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยทำการคัดแยกอีโคไล (แบคทีเรียตัวแทน) จากน้ำเสียในแต่ละจุดมาใช้ในการทดสอบกับตัวยา 11 ชนิด ด้วยวิธีการ disk diffusion method (CLSI, 2012)

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาภาพรวมของการดื้อยาปฏิชีวนะในอีโคไลจากน้ำเสียจากจุดต่างๆ ของระบบบำบัด (อีโคไลจุดละ 40 สายพันธุ์) ในที่นี้จะนำเสนอในรูปของค่า MAR index ซึ่งจะพบว่าค่า MAR index ของอีโคไลในน้ำเสียก่อนเข้าระบบ ในตะกอนแขวนลอยของถังเติมอากาศ (MLSS) และในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า 0.307, 0.280 และ 0.295 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานของคณะผู้วิจัยก่อนหน้า (สิมนัส และคณะ, 2559) จะพบว่ามีค่า MAR index ที่แตกต่างกัน โดยค่าจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษาในครั้งนี้สื่อให้เห็นว่ามีระดับการดื้อยาปฏิชีวนะที่สูงกว่า (งานวิจัยเดิมมีค่า MAR index 0.133-0.273) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ที่รองรับน้ำเสียจากชุมชนที่มีกิจกรรมค่อนข้างหลากหลายมากกว่า ส่วนระบบที่ทำการศึกษาในช่วงก่อนหน้ารองรับเฉพาะน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยเพียง 1 แห่ง แสดงให้เห็นว่ากิจกรรมการดำเนินชีวิตที่หลากหลายรูปแบบส่งผลต่อรูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเช่นกัน และที่สำคัญไปกว่านั้นจะพบว่าแนวโน้มการดื้อต่อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียตัวแทนมีระดับใกล้เคียงกัน โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อน้ำนั้นผ่านการบำบัด

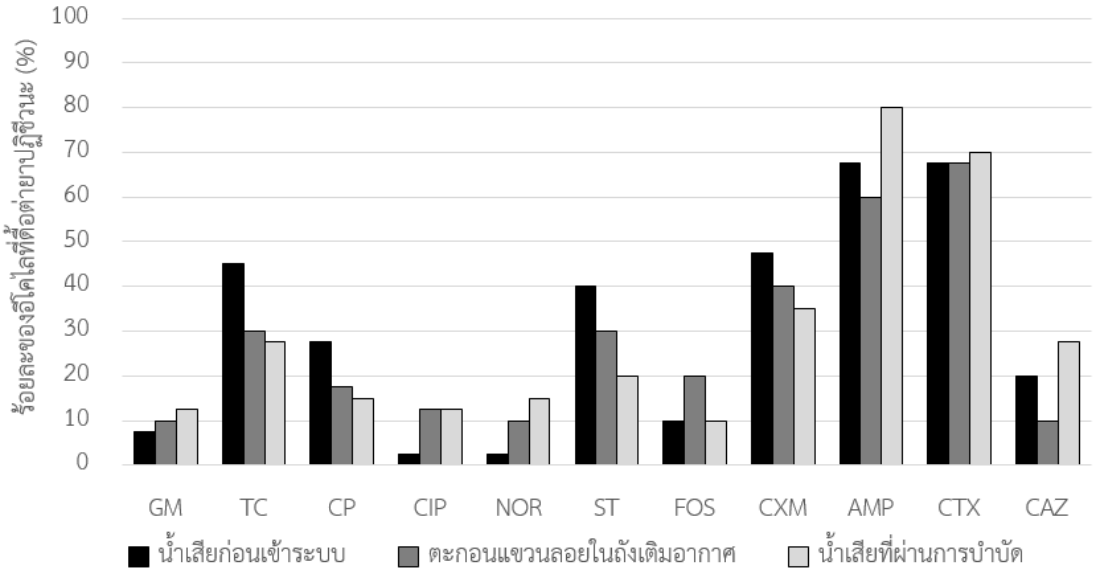
เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในประเด็นของสายพันธุ์อีโคไลที่ทำการทดสอบจะพบว่าในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดจัดเป็นอีโคไลดื้อยาปฏิชีวนะในอัตราส่วนร้อยละ 82.5 ส่วนอีโคไลในตะกอนแขวนลอยของถังเติมอากาศมีอัตราส่วนของอีโคไลดื้อยาลดลงเหลือร้อยละ 75.0 แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นเกือบทั้งหมดจัดเป็นอีโคไลดื้อยา (ร้อยละ 92.5) โดยรายละเอียดผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลการดื้อยาปฏิชีวนะของอีโคไลที่พบจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	ระบบบำบัดน้ำเสีย		
	ก่อนเข้าระบบ	ถังเติมอากาศ	หลังผ่านระบบ
MAR index	0.307	0.280	0.295
อีโคไลที่พบ (CFU/ml)	1.70×10^3	3.06×10^3	6.60×10^1
อีโคไลดื้อยาปฏิชีวนะ (ร้อยละ)	82.5	75.0	92.5
อีโคไลดื้อยาปฏิชีวนะ* (CFU/ml)	1.40×10^3	2.30×10^3	6.11×10^1

หมายเหตุ *ค่าจากการคำนวณ = ร้อยละของอีโคไลดื้อยาปฏิชีวนะ x จำนวนอีโคไลที่พบ

จากตารางที่ 4.3 เมื่อประเมินผลการศึกษาในรูปของปริมาณแบคทีเรียสามารถระบุได้ว่าแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะส่วนใหญ่มีการสะสมตัวอยู่ที่ตะกอนแขวนลอยภายในถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย CASS โดยมีค่ามากกว่าปริมาณอีโคไลดื้อยาในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบประมาณ 1.6 เท่า และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่หลุดรอดออกจากระบบไป ($6.60x10^1$ CFU/ml) นอกจากนี้ยังพบข้อมูลเพิ่มเติมว่าอีโคไลที่ทำการคัดแยกจากแหล่งน้ำตัวอย่างเป็นอีโคไลที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะมากกว่า 1 ชนิดยา หรือเรียกว่า Multi-drug resistant bacteria โดยพบอัตราส่วนของอีโคไลดังกล่าวจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ร้อยละ 72.5) > ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศ (ร้อยละ 70.0) > น้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด (ร้อยละ 60.0) แนวโน้มปรากฏการณ์ดังกล่าวยิ่งมีส่วนสนับสนุนผลการศึกษาที่ระบุว่าระบบบำบัดน้ำเสียมีส่วนพัฒนาระดับการดื้อยาปฏิชีวนะของประชากรแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสีย (Wellington et. al., 2013) และเมื่อพิจารณาเพิ่มเติมถึงรูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะที่เปลี่ยนแปลงไปภายในระบบบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษา จะพบข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงข้อมูลการศึกษาคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของอีโคไลที่คัดแยกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ทำการศึกษา (n=40)

จากผลการศึกษาข้อมูลรูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะชนิดต่างๆของอีโคไลที่คัดแยกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียตัวแทนมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะในกลุ่ม Beta-lactams สูงกว่ากลุ่มอื่นๆ โดยพบระดับการดื้อยามากกว่าร้อยละ 50 ในยาชนิด ampicillin (AMP, ร้อยละ 60.0-80.0) และ cefotaxime (CTX, ร้อยละ 67.5-70.0) ลำดับรองลงมาจะพบการดื้อยาในกลุ่ม tetracycline (TC, ร้อยละ 27.5-45.0), sulfonamide (sulfamethoxazole/trimethroprim,

ST, ร้อยละ 20.0-40.0) และ cefuroxime (CXM, ร้อยละ 35.0-47.5) อีกทั้งรูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะของอีโคไลที่พบจากแต่ละจุดของระบบบำบัดน้ำเสียยังมีความคล้ายคลึงกัน ($p>0.05$) แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบการดื้อยาที่พบจากอีโคไลในน้ำเสียก่อนก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีความแตกต่างจากรูปแบบที่พบในตะกอนแขวนลอยจุลินทรียในถังเติมอากาศมากกว่าจุดอื่น

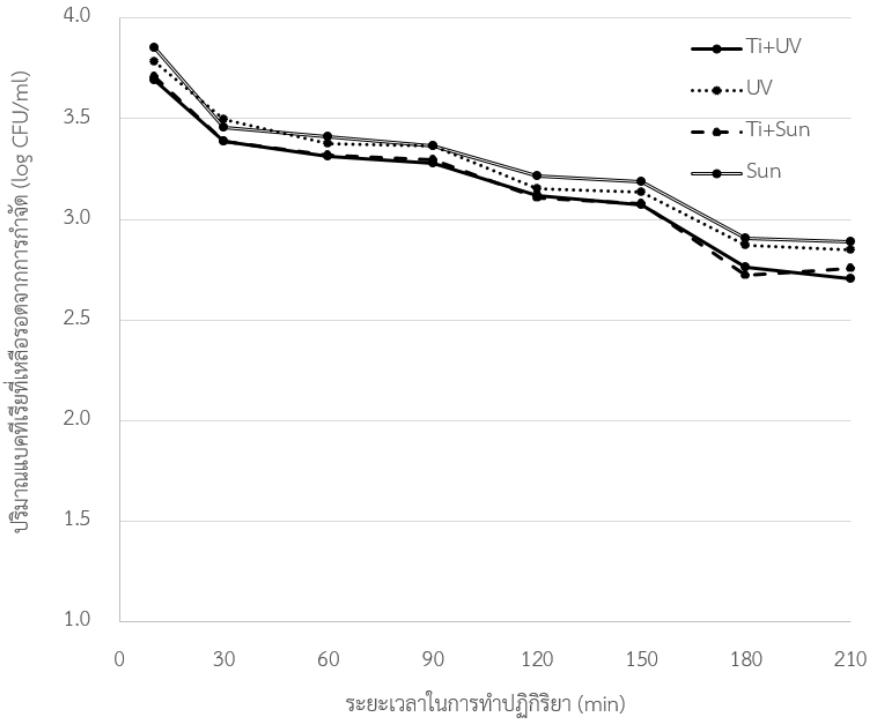
นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงรายละเอียดการดื้อต่อยาปฏิชีวนะกลุ่ม beta-lactam ของอีโคไลที่ทำการคัดเลือก ซึ่งจัดเป็นแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและส่วนใหญ่พบกลไกการดื้อยาด้วยการผลิตเอนไซม์ ESBL ในการย่อยสลายวงแหวนของยาส่งผลให้ยาหมดฤทธิ์ในการทำลายแบคทีเรีย (Mesa et al., 2006; Rupp and Fey, 2003) ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่าอีโลในระบบบำบัดน้ำเสียมีการผลิตเอนไซม์ ESBL ในปริมาณที่ต่ำและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อผ่านกระบวนการของระบบ CASS โดยพบร้อยละ 10 ในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด ต่อมาพบร้อยละ 15 จากตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศ และร้อยละ 20 ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการเกิดอีโคไลผลิตเอนไซม์ ESBL เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนอีโคไลดื้อยาปฏิชีวนะชนิด tetracycline (TC), chloramphenicol (CP), sulfonamide (ST) และ cefuroxime (CXM) มีอัตราส่วนของการดื้อยาลดลงภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ในขณะที่อีโคไลดื้อยาชนิด gentamicin (GM), ciprofloxacin (CIP), norfloxacin (NOR), ampicillin (AMP), cefotaxime (CTX) และ ceftazidime (CAZ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลไกการปรับตัวของประชากรแบคทีเรียภายในระบบบำบัดส่งผลต่อปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยข้อมูลจากการดำเนินงานในส่วนนี้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบผลการศึกษาเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกต่อไป

3. การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การดำเนินงานในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกส์ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แหล่งพลังงานจากแสงยูวีและแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้น เนื่องจากการดำเนินการวิจัยในส่วนนี้เป็นการดำเนินงานต่อยอดจากงานวิจัยของคณะผู้วิจัยในชื่อเรื่อง “การศึกษาศักยภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะรวมทั้งรูปแบบการดื้อยาที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยใช้ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์” ซึ่งภายใต้งานวิจัยดังกล่าวพบว่า การใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดอีโคไลตัวแทน แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำกว่ากระบวนการใช้คลอรีน แต่เมื่อพิจารณาในประเด็นของการพัฒนาคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของแบคทีเรียก่อโรค จะพบว่าแบคทีเรียตัวแทนสามารถเพิ่มระดับความรุนแรงของ

การดื้อยาภายใต้กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยการเติมคลอรีนมากกว่ากระบวนโฟโตคะตะไลติกที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องถึงการพัฒนากระบวนการฆ่าเชื้อที่เหลือรอดภายใต้กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน

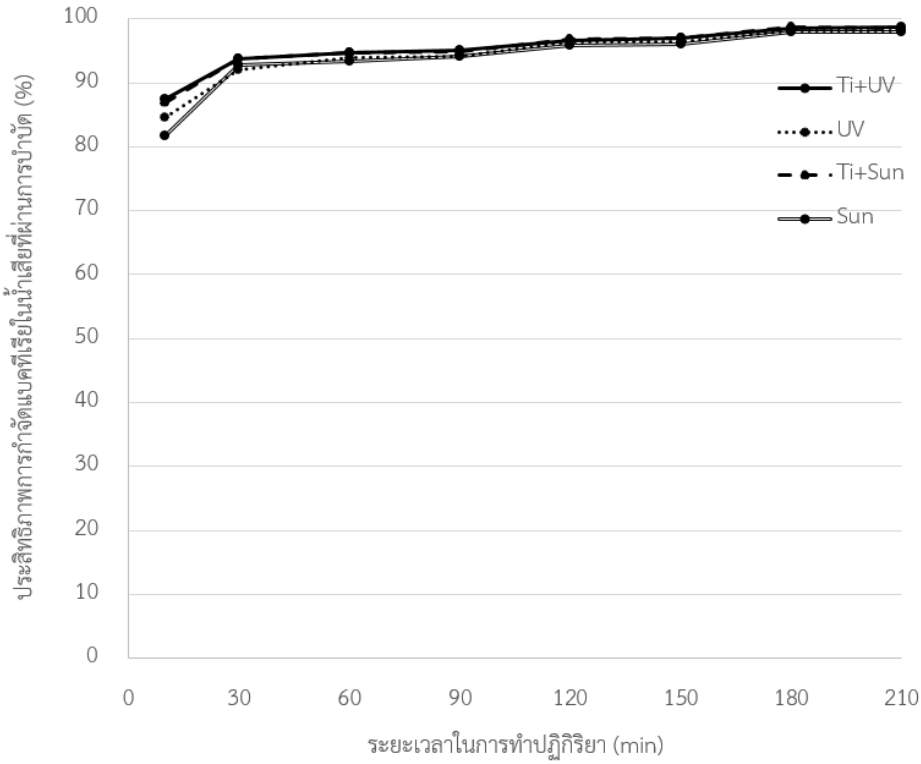
ในเบื้องต้นของการศึกษาในส่วนนี้ ได้ดำเนินการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่เหลือรอดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อที่ 10, 30, 60, 90, 120, 180 และ 210 นาที นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุเคลือบผิวถังปฏิกรณ์ (รวมทั้งหมด 32 ชุดการทดสอบ) โดยผลจากการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.2-4.3



ภาพที่ 4.2 แสดงปริมาณแบคทีเรียที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 4.2 เมื่อพิจารณาในภาพรวมของชุดการทดสอบทั้ง 4 ชุด จะพบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดจากระบบ CASS ที่คัดเลือกเป็นแหล่งตัวแทน โดยจะพบว่าชุดทดสอบ

ที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบติดผิววัสดุให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อได้ดีกว่าชุดทดสอบที่มีเฉพาะการใช้แหล่งพลังงานจากแสงยูวีหรือแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อภายใต้การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแหล่งแสงยูวีให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้ดีกว่าการใช้แสงอาทิตย์ แต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียที่ดีกว่าทั้งสภาวะที่มีการใช้ทั้งแสงยูวีและแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้น โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียเพิ่มเติมดังในภาพที่ 4.3 จะพบว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 120 นาที ทั้ง 4 ชุดการทดสอบมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 95 ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านออกจากระบบ CASS (ร้อยละ 95.8-98.7) ดังเช่นในงานวิจัยของ Xiong and Hu (2013)



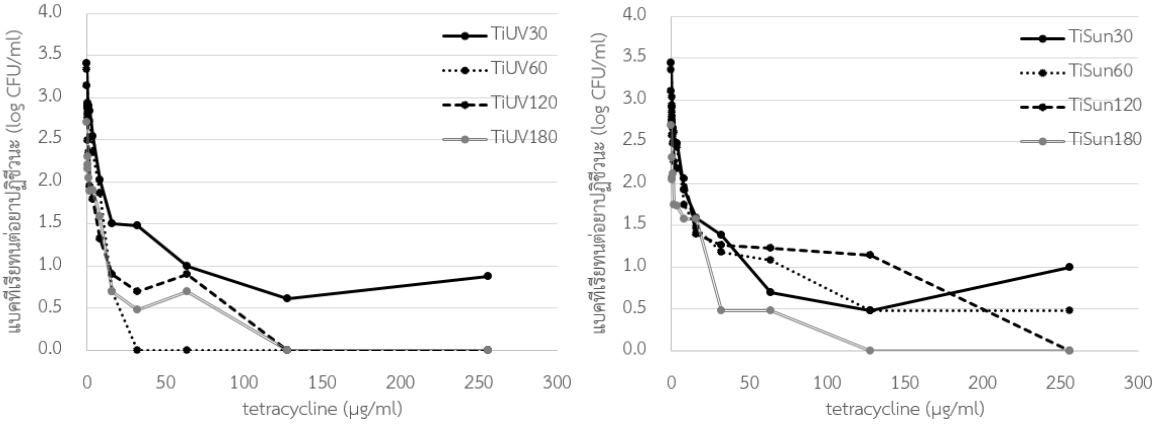
ภาพที่ 4.3 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะชุดการทดสอบที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุเคลือบผิวถังปฏิกรณ์ จะสังเกตได้ว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สั้น (10, 30, 60 และ 90 นาที)

การใช้แหล่งแสงยูวีจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียได้ดีกว่าอีกชุดการทดสอบเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 87.5-95.2 ในขณะที่อีกชุดการทดสอบมีค่าร้อยละ 86.8-94.9 แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น (120, 150, 180 และ 210 นาที) ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียในทั้งสองชุดตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการใช้แหล่งแสงยูวีและแสงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 96.7-98.7 และร้อยละ 96.7-98.5 ตามลำดับ

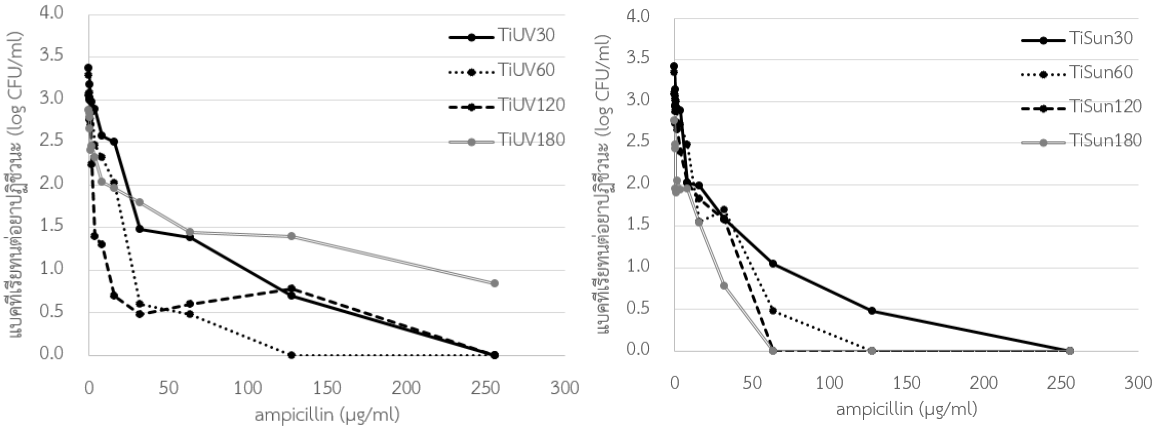
จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า การใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัด โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันกับการใช้แสงยูวี ดังนั้น จะมีการดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมในขั้นตอนถัดไปทั้งในส่วนของคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียก่อโรคภายหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อดังกล่าว และการทดลองพัฒนารูปแบบของถังปฏิกรณ์ต้นแบบให้มีประสิทธิภาพการบำบัดแบคทีเรียก่อโรคได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้จะมีคัดเลือกชุดการทดสอบที่มีความเหมาะสมไปทำการศึกษาต่อเนื่องถึงรูปแบบการดื้อยาปฏิชีวนะที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้การใช้แสงอาทิตย์ร่วมในปฏิกิริยา

ในขั้นตอนถัดไปจะดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะในภาพรวมโดยในที่นี้ ได้ทำการคัดเลือกยาปฏิชีวนะจำนวน 3 ชนิดยา ได้แก่ tetracycline (TC), ciprofloxacin (CIP) และ ampicillin (AMC) มาทำการทดสอบด้วยวิธี minimum inhibitory concentration (MIC) โดยใช้ความเข้มข้นของยาเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เท่า (double dilution) ตั้งแต่ 0.125-1,024 µg/ml และเลือกทำการทดสอบที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก 0, 30, 60, 120 และ 180 นาที โดยผลจากการศึกษาแสดงข้อมูลดังภาพที่ 4.4-4.6



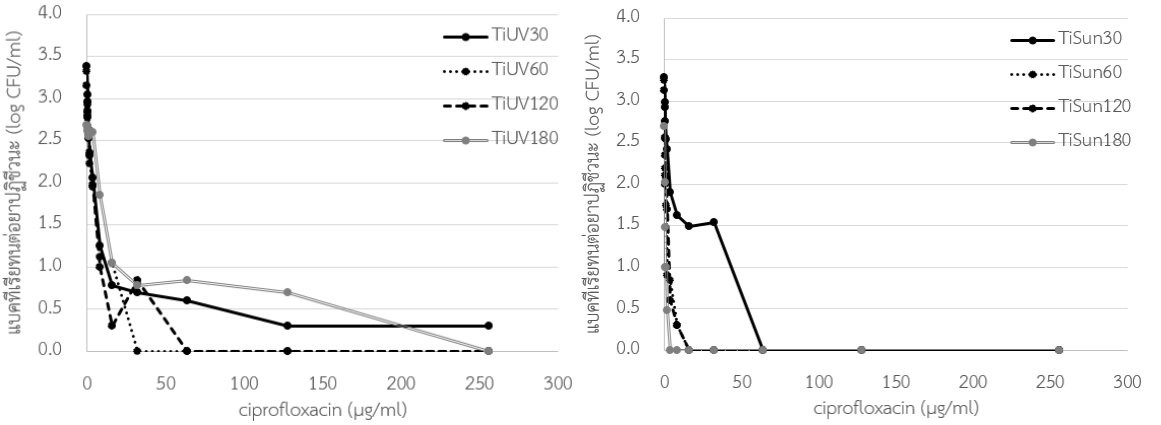
4.4 ก 4.4 ข

ภาพที่ 4.4 แบคทีเรียทนต่อยา tetracycline (TC) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 30-180 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ก) แสงยูวี และ ข) แสงอาทิตย์



4.5 ก 4.5 ข

ภาพที่ 4.5 แบคทีเรียทนต่อยา ampicillin (TC) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 30-180 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ก) แสงยูวี และ ข) แสงอาทิตย์



4.6 ก 4.6 ข

ภาพที่ 4.6 แบคทีเรียทนต่อยา ciprofloxacin (CIP) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ระยะเวลา 30-180 นาที ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ก) แสงยูวี และ ข) แสงอาทิตย์

จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณแบคทีเรียที่อยู่รอดสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะในทุกชุดการทดสอบ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยในที่นี้แบคทีเรียที่อยู่รอดจัดเป็นแบคทีเรียที่ไม่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกและมีความคงทนต่อยา

ปฏิชีวนะที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ โดยสาเหตุที่พบแบคทีเรียที่มีความคงทนต่อยาปฏิชีวนะภายหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อเนื่องมาจากคุณสมบัติการดื้อต่อยาอาจเกิดการพัฒนาขึ้นภายใต้กระบวนการบำบัดน้ำเสีย สังเกตได้จากผลการที่ประเมินพบว่าอีโคไลที่คัดแยกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจัดเป็นแบคทีเรียดื้อยาถึงร้อยละ 92.5 โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียในการศึกษานี้จะคงทนต่อยาปฏิชีวนะในระดับความเข้มข้นต่ำ ซึ่งมีความคงทนต่อยา tetracycline และ ampicillin ในระดับที่ใกล้เคียงกัน

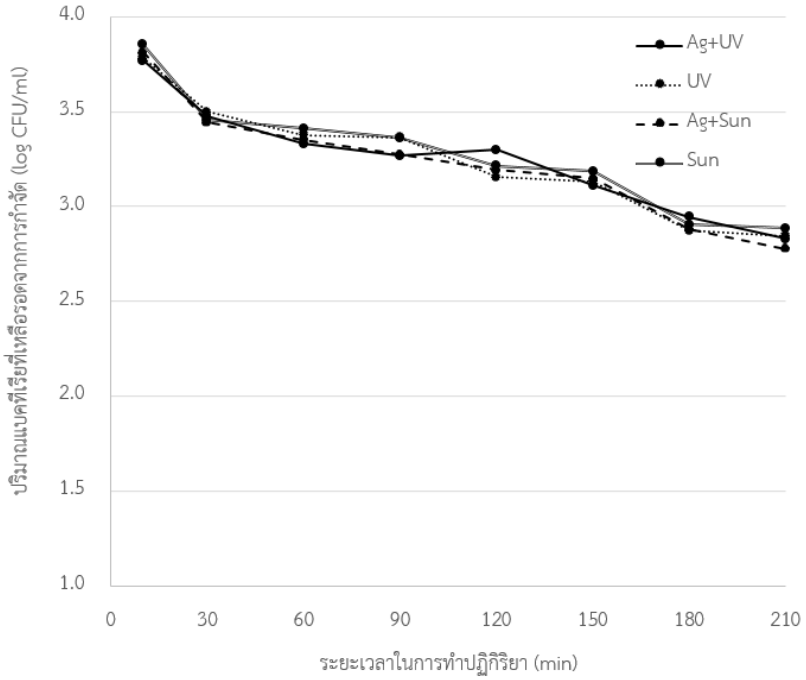
เมื่อพิจารณาความคงทนของแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่คงทนต่อยา ciprofloxacin จะพบว่ามีความคงทนในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่าในยา tetracycline และ ampicillin แต่อย่างไรก็ตามปริมาณแบคทีเรียที่คงทนต่อยาแต่ละชนิดอยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแบคทีเรียเริ่มต้น (น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด) ซึ่งมีปริมาณ 4.59 log CFU/ml อีกทั้งข้อมูลดังกล่าวยังสอดคล้องกับค่ามาตรฐานของ CLSI (2012) ที่ระบุไว้ว่าแบคทีเรียกลุ่ม *Enterobacteriaceae* ที่สามารถเจริญเติบโตหรืออยู่รอดได้ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของยา ciprofloxacin ในระดับความเข้มข้น ≥ 4 µg/ml จัดเป็นแบคทีเรียดื้อต่อยาดังกล่าว ในขณะที่ระดับการดื้อต่อยาชนิด tetracycline และ ampicillin อยู่ในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่าโดยมีค่า ≥ 16 µg/ml และ ≥ 32 µg/ml ตามลำดับ เหตุผลอีกประการหนึ่งอาจเนื่องมาจากยา ciprofloxacin เป็นยาที่ค่อนข้างใหม่กว่ายาอีก 2 ชนิด โดยจัดเป็นยากลุ่ม quinolone รุ่นที่ 2 จึงพบการดื้อต่อยาในระดับที่ต่ำกว่า

เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษาในบริบทของค่า MIC ซึ่งเป็นค่าที่ระดับความเข้มข้นของสารเคมีสามารถกำจัดแบคทีเรียได้ทั้งหมด และค่า LC50 (50% lethal concentration) หรือระดับค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่ส่งผลให้แบคทีเรียที่ทดสอบลดลงหรือตายลงร้อยละ 50 ซึ่งในแต่ละชุดการทดสอบนั้นจะพบข้อมูลดังนี้ การทดสอบแบคทีเรียที่ทนทานต่อยา tetracycline พบมีค่า MIC อยู่ในช่วง 32 µg/ml ถึง >256 µg/ml ส่วนค่า LC50 อยู่ที่ 0.125 µg/ml สำหรับการทดสอบด้วยยา ampicillin พบว่าแบคทีเรียที่อยู่รอดมีระดับความทนทานต่อยาสูงกว่าใน tetracycline โดยมีค่า MIC อยู่ที่ 64 µg/ml ถึง >256 µg/ml และค่า LC50 อยู่ในช่วง 0.125-0.5 µg/ml ในกรณีของการทนทานต่อยา ciprofloxacin พบระดับค่า MIC อยู่ในช่วง 4 µg/ml ถึง >256 µg/ml และค่า LC50 อยู่ที่ 0.125 µg/ml ซึ่งผลสรุปเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการพิจารณาจากค่ามาตรฐานการทนทานต่อยาของมาตรฐาน (CLSI 2012) โดยการที่ใช้ยาปฏิชีวนะทั้ง 3 ชนิด ในระดับความเข้มข้นต่ำที่สุดในการทดสอบ (0.125 µg/ml) พบว่าส่วนใหญ่ส่งผลให้แบคทีเรียลดปริมาณลงมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งสื่อให้เห็นว่าการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในแหล่งน้ำอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาคุณสมบัติการดื้อยาของแบคทีเรียก็เป็นไปได้

4. การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

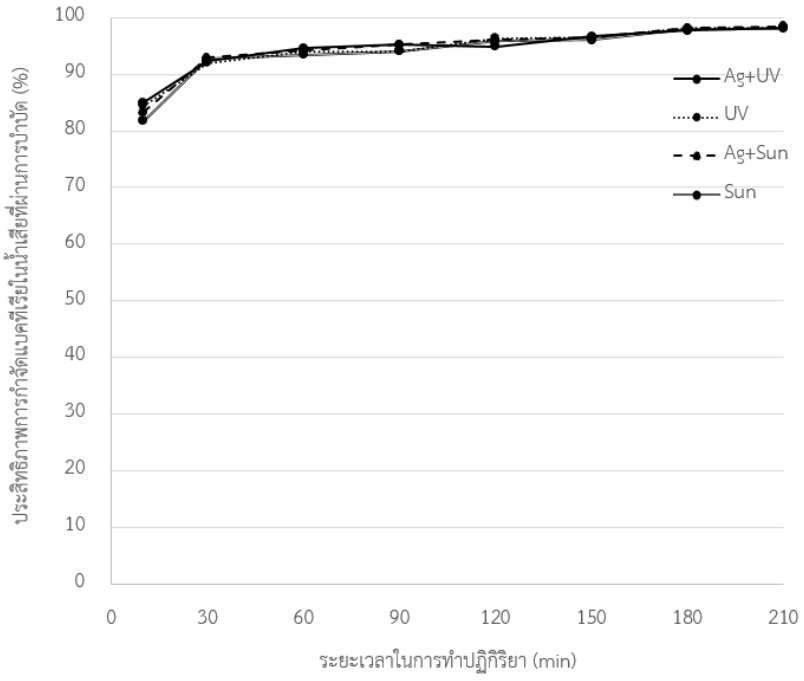
จากการทบทวนวรรณกรรมเพื่อพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียจากแหล่งน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ได้คัดเลือกวิธีการพัฒนาการเคลือบผิวของถังปฏิกรณ์ด้วยการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรท ตามวิธีการของ Kobwittaya and Sirivithayapakorn (2014) และ กฤษณะ (2557) ที่ทำการเคลือบผิววัสดุที่ทำการศึกษาด้วยกระบวนการโซลเจล เมื่อได้ถังปฏิกรณ์ที่จะทำการศึกษาแล้วนั้น

ในเบื้องต้นของการศึกษาส่วนนี้ ได้ดำเนินการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่เหลือรอดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์เช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้า โดยทำการทดสอบด้วยระยะเวลาในการฆ่าเชื้อที่ 10, 30, 60, 90, 120, 180 และ 210 นาที โดยผลจากการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.7



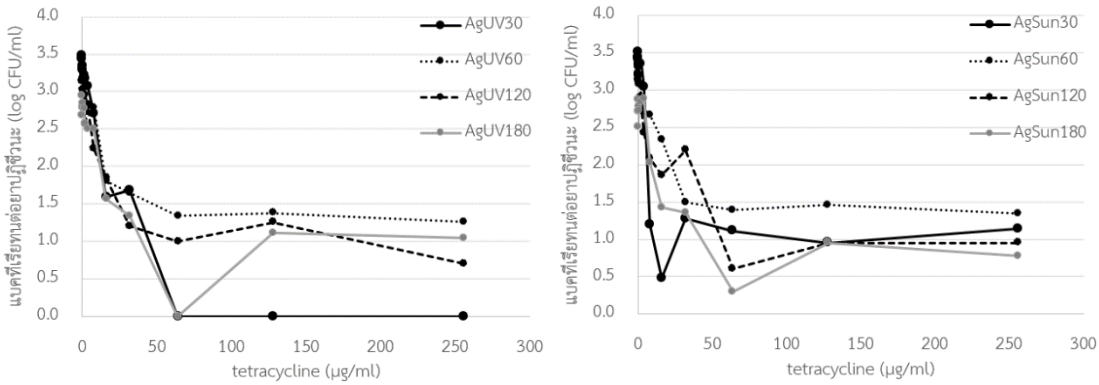
ภาพที่ 4.7 แสดงปริมาณแบคทีเรียที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 4.7 เมื่อพิจารณาในภาพรวมของชุดการทดสอบทั้ง 4 ชุด จะพบว่ามีแนวโน้มผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อนในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัด และชุดทดสอบที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบติดผิววัสดุให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อได้ดีกว่าชุดทดสอบที่มีเฉพาะการใช้แหล่งพลังงานจากแสงยูวีหรือแสงอาทิตย์ อีกทั้งเมื่อพิจารณาข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียเพิ่มเติมดังผลการประเมินที่แสดงในภาพที่ 4.8 จะพบว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 150 นาที เป็นต้นไป ทั้ง 4 ชุดการทดสอบมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 96 ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียตัวอย่าง (ร้อยละ 96.1-98.5) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะชุดทดสอบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นวัสดุเคลือบผิวถังปฏิกรณ์ จะพบว่าทุกช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (10-210 นาที) การใช้แหล่งแสงยูวีและแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) เช่น ที่ระยะเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียร้อยละ 92.3 และร้อยละ 92.9 ตามลำดับ ส่วนที่ระยะเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียที่ร้อยละ 94.5 และร้อยละ 94.2 ตามลำดับ เป็นต้น



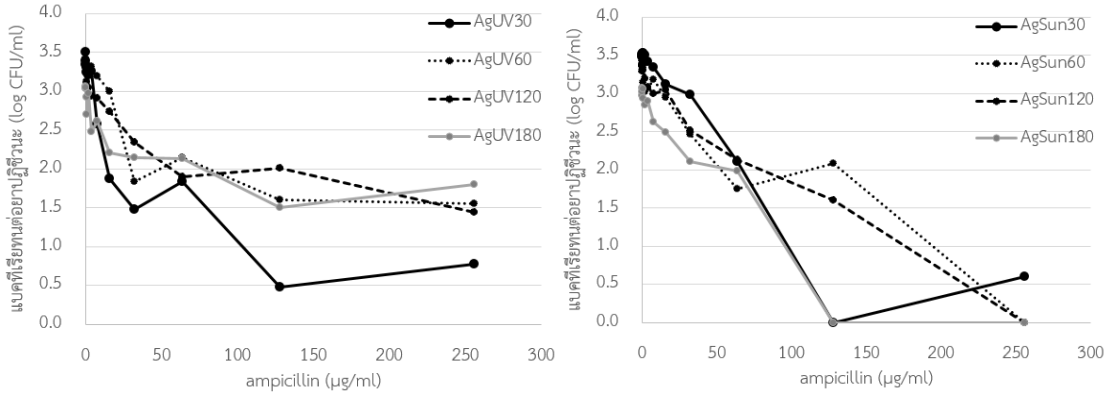
ภาพที่ 4.8 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

อาจกล่าวโดยสรุปได้เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ทำการทดสอบภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่ใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียที่เหลือรอดภายหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อดังกล่าว โดยการใช้วิธี MIC test ทดสอบในตัวยา 3 ชนิด ที่สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับการนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา โดยผลจากการศึกษาแสดงข้อมูลดังภาพที่ 4.9-4.11



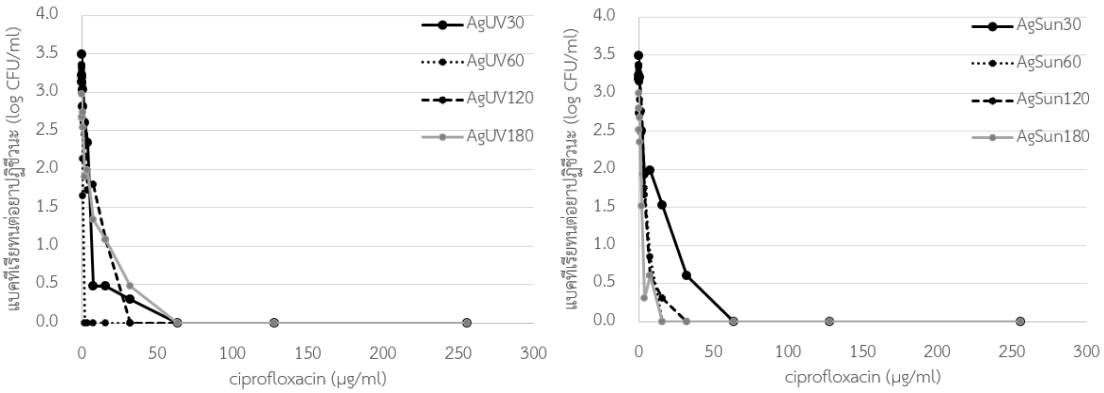
4.9 ก 4.9 ข

ภาพที่ 4.9 แบคทีเรียทนต่อยา tetracycline (TC) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไนเตรทที่ระยะเวลา 30-180 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ก) แสงยูวี และ ข) แสงอาทิตย์



4.10 ก 4.10 ข

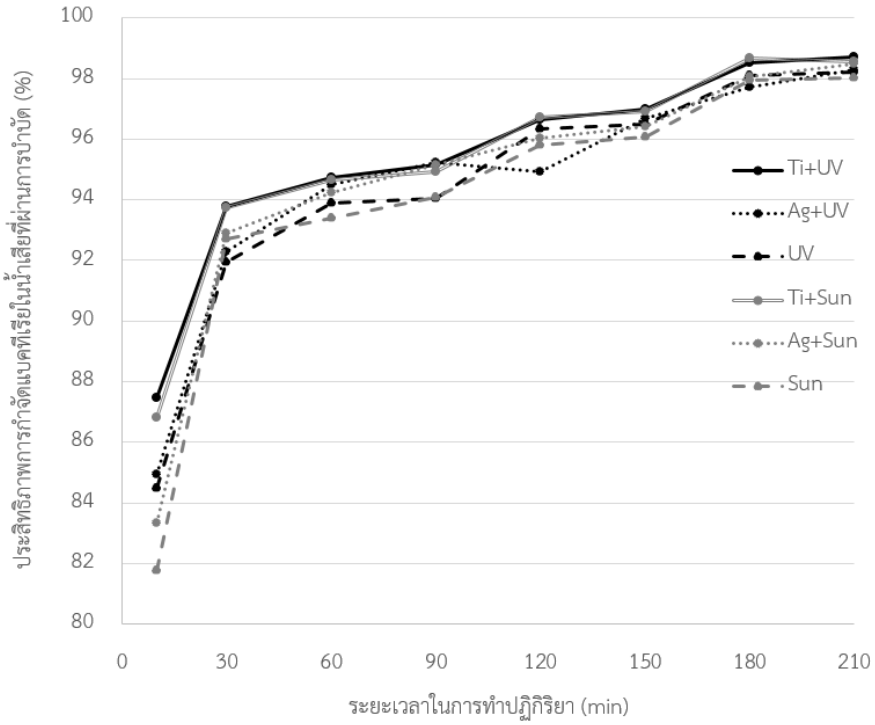
ภาพที่ 4.10 แบคทีเรียทนต่อยา ampicillin (AMP) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไนเตรทที่ระยะเวลา 30-180 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ก) แสงยูวี และ ข) แสงอาทิตย์



4.11 ก 4.11 ข

ภาพที่ 4.11 แบคทีเรียทนต่อยา ciprofloxacin (CIP) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไนเตรทที่ระยะเวลา 30-180 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ก) แสงยูวี และ ข) แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาจะพบว่าปริมาณแบคทีเรียที่อยู่รอดสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะในทุกชุดการทดสอบ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก อีกทั้งมีระดับความคงทนต่อยา tetracycline และ ampicillin ในระดับใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีค่าความคงทนต่อยา ciprofloxacin ในระดับที่ต่ำกว่ายาทั้ง 2 ชนิดดังที่กล่าวมา เช่นเดียวกันกับการศึกษาในช่วงก่อนหน้าที่มีศึกษาเฉพาะกรณีที่มีการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจากการศึกษาผ่านค่า MIC (Minimum inhibitory concentration) และ LC50 (50% lethal concentration) จะพบข้อมูลว่า แบคทีเรียในน้ำเสียทนทานต่อยา tetracycline พบมีค่า MIC อยู่ในช่วง 64 µg/ml ถึง >256 µg/ml ส่วนค่า LC50 อยู่ที่ 1-8 µg/ml ส่วนในการทดสอบด้วยยา ampicillin พบว่าแบคทีเรียที่อยู่รอดมีระดับความทนทานต่อยาสูงกว่าใน tetracycline โดยมีค่า MIC อยู่ที่ 128 µg/ml ถึง >256 µg/ml และค่า LC50 อยู่ในช่วง 1-16 µg/ml และในกรณีของการทนทานต่อยา ciprofloxacin พบระดับค่า MIC อยู่ที่ 2-64 µg/ml และค่า LC50 อยู่ในช่วง 0.125-1 µg/ml ซึ่งผลสรุปเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการพิจารณาจากค่ามาตรฐานการทนทานต่อยาของมาตรฐาน (CLSI 2012) และเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาดังกล่าวกับผลการศึกษาในกรณีที่มีการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะพบว่าระดับค่า MIC และ LC50 มีค่าสูงกว่าซึ่งอาจคาดการณ์ได้ว่าซิลเวอร์ไนเตรทอาจมีอิทธิพลที่จะเหนี่ยวนำให้แบคทีเรียในแหล่งน้ำที่เหลือรอดจากกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยโฟโตคะตะไลติกทนทานต่อยาปฏิชีวนะทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบก็เป็นไปได้ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจากถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ 1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ 2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

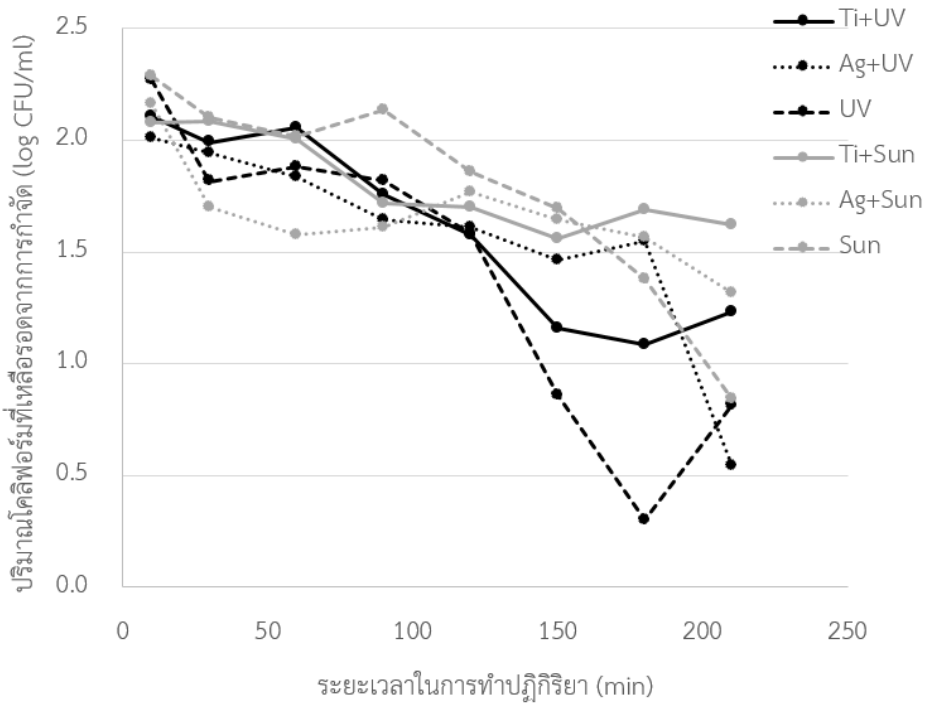
จากภาพที่ 4.12 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียเปรียบเทียบระหว่างการใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งจะพบว่ามีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้ออยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยเกือบทุกชุดการทดสอบนั้นการใช้เฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 30 นาที เป็นต้นไป มีค่าประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 โดยตั้งแต่ระยะเวลาที่ 120-210 นาที ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้ออยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันมากที่ร้อยละ 94.9-98.7 ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า การใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ ไม่มีความแตกต่างกันในแง่ของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเชิงลึกถึงคุณสมบัติการทนต่อยาปฏิชีวนะจะพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเหนี่ยวนำให้ระดับค่า MIC และ LC50 ของยาที่นำมาใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามจะต้องมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่พบ

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโฟโตคะตะไลติกหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแง่ของการอยู่รอดของแบคทีเรียและคุณสมบัติการก่อโรค

การศึกษาข้อมูลในส่วนนี้จะแบ่งรูปแบบการดำเนินการออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การศึกษาปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มที่เหลือรอดภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก และส่วนที่ 2 การศึกษาคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มดังกล่าว ซึ่งผลการศึกษามีรายละเอียดนำเสนอดังต่อไปนี้

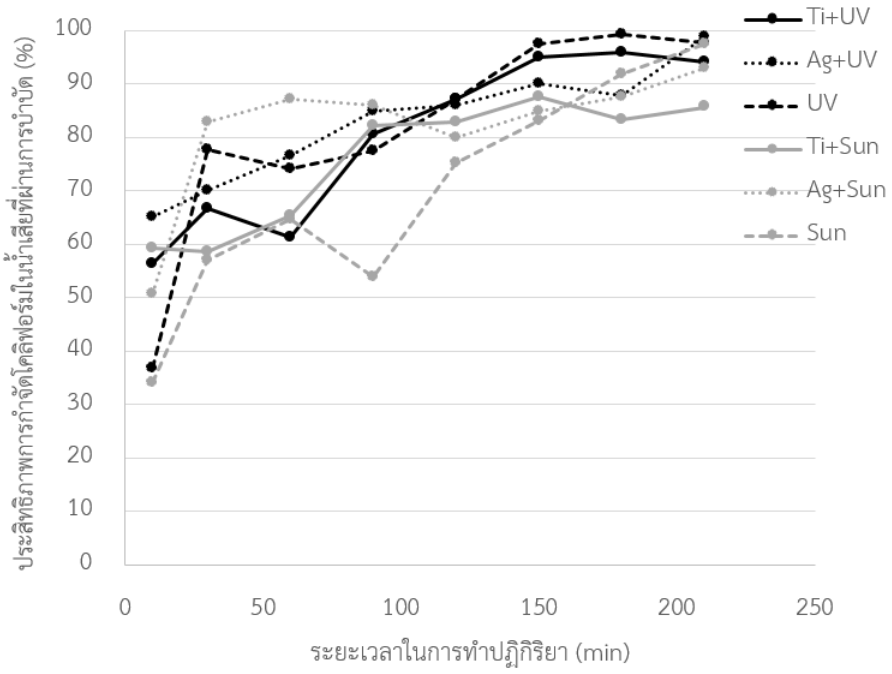
1. การศึกษาปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มที่เหลือรอดในน้ำเสียภายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

การศึกษาในส่วนนี้จะดำเนินการทดสอบให้ครอบคลุมการศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 10-210 นาที โดยผลการศึกษาแสดงรายละเอียดดังในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 แสดงปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ 1) ไทเทเนียมไดออกไซด์และ 2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ในเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 4.13 เมื่อพิจารณาปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มในน้ำเสียที่เหลือรอดจากกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ จะพบว่ามีแนวโน้มผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับในกรณีการศึกษาปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด โดยที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาในน้ำเสียจริงซึ่งเป็นน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพมาก่อน จึงพบปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มในน้ำเสียก่อนเริ่มต้นทำการทดสอบในปริมาณที่ต่ำ (66 CFU/ml) ดังนั้น จึงอาจส่งผลกระทบต่อผลการศึกษาในแต่ละชุดการทดสอบก็เป็นไปได้ โดยชุดการทดสอบส่วนใหญ่สามารถลดปริมาณโคลิฟอร์มลงได้ประมาณ 1 log CFU/ml ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟอร์มเพิ่มเติมจะพบว่ามีรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพการทดสอบการกำจัดโคลิฟอร์มที่พบในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ 1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ 2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์

ซึ่งจากภาพที่ 4.14 จะพบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 90 นาที เป็นต้นไป มีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟอร์มมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อใกล้เคียงกัน โดยยังพบอีกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทส่วนใหญ่ให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าเล็กน้อย

2. การศึกษาคุณสมบัติการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มที่เหลือรอดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

จากการศึกษาในช่วงก่อนหน้าซึ่งพบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากระบบบำบัดทางชีวภาพอีกทั้งยังหลงเหลือแบคเรียกลุ่มดังกล่าวในปริมาณที่ต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวจัดเป็นหนึ่งในตัวแทนของแบคทีเรียก่อโรค จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติของการดื้อต่อยาปฏิชีวนะที่พบโดยในที่นี้ได้ทำการคัดเลือกชุดการทดสอบจำนวน 4 ชุดการทดสอบเพื่อทำการศึกษา ได้แก่ ชุดการทดสอบที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ และการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที และใช้อีโคไลเป็นตัวแทนในการศึกษา โดยในที่นี้จะพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนที่อยู่รอบแผ่นยาปฏิชีวนะแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบ ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาปฏิชีวนะของอีโคไลเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ 60 นาที

ยาปฏิชีวนะ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาปฏิชีวนะของอีโคไล				
	ก่อนทดสอบ* (n=100)	TiO_2+UV (n=5)	TiO_2+Sun (n=5)	$AgNO_3$+UV (n=5)	$AgNO_3$+Sun (n=5)
Gentamicin	17.5	18.2	21.2	20.7	18.7
Tetracycline	14.4	13.0	10.5	12.8	11.0
Chloramphenicol	20.2	21.3	18.7	21.8	15.5
Ciprofloxacin	23.6	21.7	22.3	22.2	20.8
Norfloxacin	20.7	20.0	19.8	18.5	21.2
Sulfamethozaxole	18.7	22.5	20.6	18.0	13.0
Fosfomycin	18.6	19.5	20.2	15.8	15.5
Cefuroxime	14.5	13.2	19.8	15.3	10.5
Ampicillin	10.4	7.7	8.3	7.0	7.2
Cefotaxime	19.8	20.3	27.8	25.3	23.5
Ceftazidime	19.6	20.3	26.2	22.8	25.7

หมายเหตุ * ข้อมูลจากการศึกษาอีโคไลในน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในช่วงก่อนหน้า

จากผลการศึกษาในตารางที่ 4.4 นั้น เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาปฏิชีวนะของอีโคไลในน้ำเสียเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ระยะเวลา 60 นาที จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์ของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่มีขนาดที่เล็กลง ยกเว้นในยา gentamicin, cefotaxime และ ceftazidime ในทุกชุดการทดสอบ นอกจากนี้ ยังพบเหตุการณ์ดังกล่าวเพิ่มเติมในยา Chloramphenicol, Norfloxacin, Sulfamethozaxole, Fosfomycin และ Cefuroxime ในบางชุดการทดสอบเช่นกัน ซึ่งการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนมีขนาดที่เล็กลงชี้ให้เห็นว่า แบคทีเรียอาจเริ่มมีการพัฒนาไปสู่การเป็นแบคทีเรียที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะก็เป็นไปได้ แต่จากผลการศึกษาที่พบในภาพรวมถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาจะมีขนาดเล็กลงแต่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่จัดว่าอีโคไลดังกล่าวมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะ ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบไม่เหนี่ยวนำให้แบคทีเรียมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะส่วนใหญ่ ยกเว้นในกรณีของยา ampicillin ทั้งนี้เนื่องจากแสดงคุณสมบัติดื้อต่อยาดังกล่าวตั้งแต่ก่อนทำการทดสอบ ส่วนในกรณีของยา tetracycline และ cefuroxime ในบางชุดการทดสอบสามารถถูกเหนี่ยวนำให้แสดงคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยจะคงรูปแบบที่มีการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ และมีการเพิ่มเติมสารที่มีคุณสมบัติในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคเพิ่มเติมซึ่งในที่นี้ใช้สารประกอบซิลเวอร์ อีกทั้งยังมีการทดสอบการปรับเปลี่ยนมาใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนการใช้หลอดยูวี สำหรับน้ำเสียที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่ และระบบมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อพิจารณาในรูปของบีโอดีเป็นหลัก โดยมีความสามารถอยู่ที่ร้อยละ 93.7 และระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรคมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งภาพรวมของการดื้อยาปฏิชีวนะในอีโคไลจากระบบบำบัดน้ำเสียมีค่า MAR index ของอีโคไลอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยมีค่า 0.280-0.307 แบคทีเรียตัวแทนที่ทำการคัดแยกได้ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติการดื้อยามากกว่าหนึ่งกลุ่มขึ้นไป โดยส่วนใหญ่ดื้อต่อยากลุ่ม Beta-lactams เป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามพบอีโคไลที่มีคุณสมบัติผลิตเอนไซม์ ESBL เพื่อใช้ในการย่อยสลายวงแหวนของ Beta-lactams ในอัตราส่วนที่ต่ำ โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 10-20 นอกจากนี้ยังพบระดับการดื้อยากลุ่ม tetracycline (ร้อยละ 27.5-45.0) และ sulfonamide (ร้อยละ 20.0-40.0) รองลงมา ตามลำดับ

สำหรับการกำจัดแบคทีเรียที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น พบว่าการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานแสงทดแทนการใช้หลอดยูวีให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีเทียบเท่าการใช้แสงยูวี ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สั้น (10, 30, 60 และ 90 นาที) การใช้แหล่งแสงยูวีจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียได้ดีกว่าอีกชุดการทดสอบเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 87.5-95.2 ในขณะที่อีกชุดการทดสอบมีค่าร้อยละ 86.8-94.9 ในส่วนของการพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์โฟโคตะคะไลติกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในการกำจัดแบคทีเรียจากแหล่งน้ำ การศึกษาครั้งนี้ได้คัดเลือกวิธีการพัฒนาการเคลือบผิวของถังปฏิกรณ์ด้วยการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรท ซึ่งผลทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาในกรณีที่ใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ อีกทั้งระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 150 นาที เป็นต้นไป มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 96 ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียตัวอย่าง (ร้อยละ 96.1-98.5) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะชุดทดสอบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นวัสดุ

เคลือบผิวถังปฏิกรณ์ จะพบว่าทุกช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (10-210 นาที) การใช้แหล่งแสงยูวีและแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาเพิ่มเติมถึงระดับความทนทานต่อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียที่เหลือรอดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในรูปแบบของค่า MIC และ LC50 ของยา tetracycline, ciprofloxacin และ ampicillin ซึ่งพบว่าในการใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทในการฆ่าเชื้อในน้ำเสียให้ค่า MIC และ LC50 ในระดับที่สูงกว่าการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเฉพาะในยา tetracycline และ ampicillin เช่น แบคทีเรียที่เหลือรอดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า MIC อยู่ในช่วง 64 μg/ml ถึง >256 μg/ml ส่วนค่า LC50 อยู่ที่ 1-8 μg/ml ซึ่งมีระดับค่าสูงกว่าระบบที่มีการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพบค่า MIC อยู่ในช่วง 32 μg/ml ถึง >256 μg/ml ส่วนค่า LC50 อยู่ที่ 0.125 μg/ml โดยจากผลการศึกษาอาจคาดการณ์ได้ว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำเสีย แต่แบคทีเรียที่เหลือรอดดังกล่าวกลับถูกเหนี่ยวนำให้ทนทานต่อยาปฏิชีวนะได้ โดยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทอาจมีแนวโน้มถูกเหนี่ยวนำได้ง่ายกว่าเพื่อพิจารณาอ้างอิงจากค่า MIC และ LC50 ของยาที่ทำการทดสอบ

ในการศึกษาถึงปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มในน้ำเสียที่เหลือรอดจากกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ จะพบว่ามีแนวโน้มผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับในกรณีการศึกษาปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด โดยที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 90 นาทีเป็นต้นไป มีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟอร์มมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อใกล้เคียงกัน โดยยังพบอีกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทส่วนใหญ่ให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้น จึงได้มีการคัดเลือกชุดการทดสอบที่เหมาะสมเพื่อศึกษาถึงข้อมูลการดื้อต่อยาปฏิชีวนะที่พบโดยได้ทดสอบที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ ที่ 60 นาที และใช้อีโคไลเป็นแบคทีเรียก่อโรคตัวแทน และพิจารณาผลการทดสอบจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนอีโคไลที่อยู่รอบแผ่นยาปฏิชีวนะแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังกล่าวส่วนใหญ่มีขนาดที่เล็กลงยกเว้นในยา gentamicin, cefotaxime และ ceftazidime ซึ่งการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนมีขนาดที่เล็กลงชี้ให้เห็นว่าแบคทีเรียอาจเริ่มมีการพัฒนาไปสู่การเป็นแบคทีเรียที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะ เช่น ในกรณีของยา tetracycline และ cefuroxime ในบางชุดการทดสอบสามารถถูกเหนี่ยวนำให้แสดงคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคลียร์โซนรอบแผ่นยาจะมีขนาดเล็กลงแต่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่จัดว่าอีโคไล

ดังกล่าวมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะ ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบไม่เหนี่ยวนำให้แบคทีเรียมีคุณสมบัติดื้อต่อยาปฏิชีวนะส่วนใหญ่

ดังนั้นในการศึกษานี้ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกทั้ง 2 รูปแบบ มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงในการกำจัดแบคทีเรียและแบคทีเรียก่อโรคที่พบในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพมาก่อน อีกทั้งการใช้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ในการทำปฏิกิริยายังให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้ทดแทนกันได้ แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลเชิงลึกถึงค่า MIC, LC50 และคุณสมบัติการดื้อต่อยาปฏิชีวนะ จะพบว่ากระบวนการดังกล่าวมีส่วนเหนี่ยวนำให้แบคทีเรียคงทนต่อยาแต่ส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ในระดับที่จะก่อเกิดการพัฒนาไปสู่การเป็นแบคทีเรียดื้อต่อยาปฏิชีวนะ ยกเว้นแต่ในกรณีที่แบคทีเรียก่อนทำการทดสอบนั้นมีคุณสมบัติการดื้อต่อยาปฏิชีวนะอยู่ก่อนแบคทีเรียดังกล่าวจะสามารถคงคุณสมบัตินั้นๆไว้ได้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรทสามารถเหนี่ยวนำให้ระดับค่า MIC และ LC50 ของยาปฏิชีวนะที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่าการใช้เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้น การใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาน่าจะมีความเหมาะสมในการฆ่าแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำเสียชุมชนมากกว่าเมื่อพิจารณาในแง่ความปลอดภัยต่อสุขภาพ ทั้งนี้จะต้องมีการศึกษาข้อมูลเชิงลึกเพิ่มเติมเพื่อพัฒนากระบวนการดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

อภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เบื้องต้นจะทำการอภิปรายในประเด็นของการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่เหลือรอดจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมในชุมชนได้ว่า การใช้แสงอาทิตย์ร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้น ถ้าเป็นการใช้งานโดยให้ถังปฏิกรณ์สัมผัสแสงอาทิตย์โดยตรงจะมีข้อจำกัดอยู่ที่ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ฤดูกาล และสภาพอากาศ ซึ่งควรจะต้องมีการศึกษาข้อมูลเชิงลึกเพิ่มเติมต่อไป อีกทั้งถ้ามีการจัดทำระบบในการเก็บกักพลังงานแสงอาทิตย์จะช่วยให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพคงที่มากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

งานวิจัยในส่วนนี้ยังอยู่ในขั้นตอนของการพัฒนาถังปฏิกรณ์โดยยังคงเป็นระบบขนาดเล็กและมีการเดินระบบแบบ Batch ถ้าจะมีการนำงานวิจัยส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ คงจะต้องเป็นไปในลักษณะของการนำองค์ความรู้และกระบวนการศึกษาวิจัยไปต่อยอดงานพัฒนาของผู้ที่มีความสนใจต่อไป

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

การทำการศึกษาวิจัยในอนาคตน่าจะเป็นในเรื่องของการศึกษาเชิงลึกถึงอิทธิผลของเวลา สภาพอากาศ และฤดูกาลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียที่เหลือรอดในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ และศึกษาถึงความปลอกภัยต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมหากจะมีการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกไปประยุกต์ใช้ในกิจกรรมต่างๆต่อไป

บรรณานุกรม

บรรณานุกรมภาษาไทย

กฤษณะ กอบวิทยา. (2557). กระบวนการโฟโตคะตะไลติกรีดักชันของไนเตรตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปลงจากโลหะ. ปริญญาวิศกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม).. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. (2554). จุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 9. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิมนัส ตรีเดช, จุฑารัตน์ ศรีชูเปี่ยม, เพียงกมล ยุวนานนท์, มณฑล สุวรรณประภา และอนิรุทธ์ ศรีเลขา. (2559). การศึกษาศักยภาพการกำจัดแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ รวมทั้งรูปแบบ การดื้อยาที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์. มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

บรรณานุกรมภาษาต่างประเทศ

AirOasis. (2015). PCO (photo catalytic oxidation) nano-technology how TiO_2 UV photocatalytic oxidation (PCO) works. http://www.air-oasis-uv-pco-sanitizers.com/how-pco-works.htm

Ali, T., Ahmed, A., Alam, U., Uddin, I., Tripathi, P. and Muneer, M. (2018). Enhanced photocatalytic and antibacterial activities of Ag-doped TiO_2 nanoparticles under visible light. *Materials Chemistry and Physics*. 212, 325-335.

Al-Ekabi, H., Edwords, G., Holden, W., Safarazadeh-Amiri, A. and Story, J. (1991). Water treatment by heterogeneous photocatalysis, pp. 254-261. In Echenfelder W. W., Bowers A. R. and Roth J. R. (eds.). Chemical Oxidation. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster.

Al-Jawad, S.M.H., Taha, A.A. and Salima, M.M. (2017). Synthesis and characterization of pure and Fe doped TiO_2 thin films for antimicrobial activity. *Optik*. 142, 42-53.

Amethyst Galleries, Inc. (1996). The Mineral Anatase: http://mineral.galleries.com/minerals/oxides/anatase/anatase.htm, August 24, 2011.

APHA, AWWA & WEF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd edition, Port City Press, USA.

Bahig, A., Aly, E. A., & Amel, K. A. (2008). Isolation, characterization and application of bacterial population from agricultural soil at Sohag province, Egypt. *Malaysian Journal of Microbiology*, 4(2), 42-50.

Belapurkar, A., D., Kamble, V., S. and Dey, G., R. (2010). Photo-oxidation of ethylene in gas phase and methanol and formic acid in liquid phase on synthesized TiO_2 and Au/TiO_2 catalysts. *Materials Chemistry and Physics*. 123: 801-805.

Bouki, C., Venieri, D., & Diamadopoulos, E. (2013). Detection and fate of antibiotic resistant bacteria in wastewater treatment plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 91, 1-9.

Braham, R.J. and Harris, A.T. (2009). Review of major design and scale-up considerations for solar photocatalytic reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 48 (19): 8890-8905.

Cannavale, A., F. Fiorito, M. Manca, G. Tortorici, R. Cingolani and G. Gigli. (2010). Multifunctional bioinspired sol-gel coatings for architectural glasses. *Building and Environment*. 45: 1233–1243.

Carré, G., Hamon, E., Ennahar, S., Estner, M., Lett, M., C., Horvatovich, P., Gies, J., P., Keller, V., Keller, N. and Andre, P. (2014). TiO_2 photocatalysis damages lipids and proteins in *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*. 80(8), 2573-2581.

Cloete, T. E. (2003). Resistance mechanisms of bacteria to antimicrobial compounds. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 51, 277-282.

CLSI. (2012). *Performance standards for antimicrobial susceptibility testing; twenty-second informational supplement*. Clinical and Laboratory Standards Insititute, USA.

García-Fernández, I., Fernández-Calderero, I., Polo-LÓpez, M. I. and Fernández-Ibánez. (2014). Disinfection of urban effluents using solar TiO_2 photocatalysis: A study of significance of dissolved oxygen, temperature, type of microorganism and water matrix. *Catalysis Today*. 240(A), 30-38.

Gupta, R., Eswar, N. K., Modak, J. M. and Madras, G. (2017). Effect of morphology of zine oxid in ZnO-CdS-Ag ternary nanocomposite towards photocalytic inactivation of E. coli under UV and visible light. *Chemical Engineering Journal*. 307, 966-980.

Ibrahim, M.M. and Asal, S. (2017). Physicochemical and photocatalytic studies of Ln^{3+}-ZnO for water disinfection and wastewater treatment applications. Journal of *Molecular Structure*. 1149, 404-413.

Ishii, S., & Sadowsky, M. J. (2008). *Escherichia coli* in environmental: implication for water quality and human health. *Microbes and Environment*, 23(2), 101-108.

Janus, M., Markowska-Szczupak, A., Kusiak-Nejman, E. and Morawski, A., W. (2012). Disinfection of *E. coli* by carbon modified TiO_2 photocatalysts. *Environmental Protection Engineering*. 38(2), 89-97.

Karunakaran, C. (2013). Solar photocatalytic disinfection of bacteria. *Solar photocatalysis*, 243-262.

Kelly, B. G., Vespermann, A., & Bolton, D. J. (2009). Horizontal gene transfer of virulence determinants in selected bacterial foodborne pathogens. *Food and Chemical Toxicology*, 47, 969-977.

Khraisheh, M., Wu, L., Al-Muhtaseb, A. H. and Al-Ghouti, M. (2015). Photocatalytic disinfection of Escherichia coli using TiO_2 P25 and CU-doped TiO_2. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 28, 369-376.

Kobwittaya, K. and Sirivithayapakorn, S. (2014). Photocatalytic reduction of nitrate over TiO_2 and Ag-modified TiO_2. *Journal of Saudi Chemical Society*. 18, 291-298.

Kowal, K., Wysocka-KrÕl, K., Kopacznska, M., Dworniczek, E., Franiczek, R., Wawrzynska, M., Vargová, M., Zahoran, M., Rakovský, E., Kuš, P., Plesch, G., Plecenik, A., Laffir, F., Tofail, S., A., M. and Podbielska, H. (2011). In situ photoexcitation of silver-doped titania nanopowers for activity against bacteria and yeasts. *Journal of Colloid and Interface Science*. 362, 50-57.

Liang, J., Deng, J., Liu, F., Li, M. and Tong, M. (2018). Enhanced bacterial disinfection by Bi_2MoO_6-AgBr under visible light irradiation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 161, 528-536.

Liou, J., W. and Chang, H., H. (2012). Bactericidal effects and mechanisms of visible light-responsive titanium dioxide photocatalysts on pathogenic bacteria. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*. 60, 267-275.

Łuczkiewicz, A., Jankowska, K., Fudala-Ksiazek, S. & Olanczuk-Neyman, K. (2010). Antimicrobial resistance of fecal indicators in municipal wastewater treatment plant. *Water research*, 44, 5089-5097.

Mesa, R. J., Blanc, V., Blanch, A. R., Cortés, P., González, J. J., Lavilla, S., Miró, E., Muniesa, M., Saco, M., Tórtola, M. T., Mirelis, B., Coll, P., Llagostera, M., Prats, G. & Navarro, F. (2006). Extended-spectrum β-lactamase-producing *Enterobacteriaceae* in different environments (humans, food, animal farms and sewage). *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 58, 211-215.

Molling, J., W., Seezink, J., W., Teunissen, B., E., Muijrers-Chen, I. and Born, P., J. (2014). Comparative perforformance of a panel of commercially available antimicrobial nanocoating in Europe. *Nanotechnology, Science and Applications*. 7, 97-104.

Monteiro, R., A., R., Miranda, S., M., Vilar, V., J., P., Pastrana-Martínez, L., M., Tavares, P., B., Boaventura, R., A., R., Faria, J., L., Pinto, E. and Silva, A., M., T. (2015). N-modified TiO_2 photocatalytic activity towards diphenhydramine degradation and *Escherichia coli* inactivation in aqueous solutions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 162, 66-74.

Nakano, R., Hara, M., Ishiguro, H., Yao, Y., Ochiai, T., Nakata, K., Murakami, T., Kajioka, J., Sunada, K., Hashimoto, K., Fujishima, A. and Kubota, Y. (2013). Broad spectrum microbicidal activity of photocatalysis by TiO_2. *Catalysts*. 3, 310-323.

Nakata, K. and Fujishima, A. (2012). TiO_2 photocatalysis: Design and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 13, 169-189.

Öncü, N., B., Menceloğlu, Y., Z. and Balcioğlu, I., A. (2011). Comparison of the effectiveness of chlorine, ozone, and photocatalytic disfection in reducing the risk of antibiotic resistance pollution. *Journal of Advanced Technologies*. 14(2), 196-203.

Polo, A. Diamanti, M., V., Bjarnsholt, T., HØiby, N., Villa, F., Pedeferri, M., P. and Cappitelli, F. (2011). Effects of photoactivated titanium dioxide nanopowders and coating on planktonic and biofilm growth of *Pseudomonas aeruginosa*. *Photochemistry and Photobiology*. 87, 1387-1394.

Rahim, S., Radiman, S. and Hamzah, A. (2012). Inactivation of Escherichia coli under fluorescent lamp using TiO_2 nanoparticles synthesized via sol gel method. *Sains Malaysiana*. 41(2), 219-224.

Rizzo[1], L., Sala, A., D., Fiorentino, A. and Puma, G., L. (2014). Disinfection of urban wastewater by solar driven and UV lamp-TiO_2 photocatalysis: Effect on a multi-drug resistant *Escherichia coli* strain. *Water Research*. 53, 145-152.

Rizzo[2], L., Sannino, D., Vaiano, V., Sacco, O., Scarpa, A. and Pietrogiacomi, D. (2014). Effect of solar simulated N-doped TiO_2 photocatalysis on the inactivation and antibiotic resistance of an *E. coli* strain in biologically treated urban wastewater. *Applied Catalysis B: Environmental*. 144, 369-378.

Rojviroon, O., Rojviroon, T. & Sirivithayapakorn, S. (2014). Study of COD removal efficiency from synthetic wastewater by photocatalytic process. *Environmental Engineering Research*, 19(3), 255-259.

Rojviroon, T., Laobuthee, A. & Sirivithayapakorn, S. (2012). Photocatalytic activity of toluene under UV-LED light with TiO_2 thin films. *International Journal of Photoenergy*, doi:10.1155/2012/898464.

Rojviroon, T., Rojviroon, O. & Sirivithayapakorn, S. (2015). Photocatalytic decolourisation of dyes using TiO_2 thin film photocatalysts. *Surface Engineering*, DOI: 10.1179/1743294415y.0000000096.

Rojviroon, T. & Sirivithayapakorn, S. (2013). Properties of TiO_2 thin films prepared using sol-gel process. *Surface Engineering*, 29(1), 77-80.

Rupp, M. E. & Fey, P. D. (2003). Extended spectrum β-lactamase (ESBL)-producing *Enterobacteriaceae* considerations for diagnosis, prevention and drug treatment. *Drugs*, 63(4), 353-365.

Sacco, O., Vaiano, V., Rizzo, L. and Sannino, D. (2018). Photocatalytic activity of a visible light active structured photocatalyst developed for municipal wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*. 175, 38-49.

Schlur, L., Begin-Colin, S., Gilliot, P., Gallart, M., Carré, G., Zafeiratos, S., Keller, N., Keller, V., André, P., Greneche, J.M., Hezard, B., Desmonts, M.H., and Pourroy, G. (2014). Effect of ball-milling and Fe-/Al-doping on the structural aspect and visible light photocatalytic activity of TiO_2 towards *Escherichia coli* bacteria abatement. Materials Science and Engineering C. 38, 11-19.

Sclafani, A. and Herrmann, J., M. (1996). Comparison of the Photoelectronic and Photocatalytic Activities of Various Anatase and Rutile Forms of Titania in Pure Liquid Organic Phases and in Aqueous Solutions. *The Journal of Physical Chemistry*. 100 (32): 13655–13661.

Sethi, D. and Sakthivel, R. (2017). ZnO/TiO_2 composites for photocatalytic inactivation of *Escherichia coli*. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*. 168, 117-123.

Song, M., Y., Jung, H., D., Jurng, J. and Kim, B., C. (2014). Bacterial target-specific photocatalyst for the enhancement of antibacterial property to targets. *Applied Catalysis B: Environmental*. 148-149, 568-572.

Sousa, V., M., Manaia, C., M., Mendes, A. and Nunes, O., C. (2013). Photoinactivation of various antibiotic resistant strains of *Escherichia coli* using a paint coat. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 251, 148-153.

Tasi, T., M., Chang, H., H., Chang, K., C., Liu, Y., L. and Tseng, C., C. (2010). A comparative study of the bactericidal effect of photocatalytic oxidation by TiO_2 on antibiotic-resistant and antibiotic-sensitive bacteria. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* 85, 1642-1653.

Venieri, D., Fraggedaki, A., Kostadima, M., Chatzisymeon, E., Binas, V., Zachopoulos, A., Kiriakidis, G. and Mantzavinos, D. (2014). Solar light and metal-doped TiO_2 to eliminate water transmitted bacterial pathogens: photocatyst characterization and disinfection performance. *Applied Catalysis B: Environmental*. 154-155, 93-101.

Wellington, E. M. H., Boxall, A. B. A., Cross, P., Feil, E. J., Gaze, W. H., Hawkey, P. M., Johnson-Rollings, A. S., Jones, D. L., Lee, N. M., Otten, W., Thomas, C. M., & Williams, A. P. (2013). The role of the natural environment in the emergence of antibiotic resistance in Gram-negative bacteria. *Lancet Infection Disease,* 13, 155-165.

Xiong, P. and Hu, J. (2013). Inactivation/reactivation of antibiotic-resistant bacteria by a novel UVA/LED/TiO2 system. *Water research*. 47, 4547-4555.

Xu, J.W., Gao, Z.D., Han, K., Liu, Y. and Song, Y.Y. (2014). Synthesis of magnetically separable $Ag_3PO_4/TiO_2/Fe_3O_4$ heterostructure with enhanced photocatalytic performance under visible light for photoinactivation of bacteria. *Applied Material & Interfaces*. 6, 15122-15131.

Xu, Y., Liu, Q., Liu, C., Zhai, Y., Xie, M., Huang, L., Xu, H., Li, H. and Jing, J. (2018). Visible-light-driven Ag/AgBr/ZnFe2O4 composites with excellent photocatalytic activity for E. coli disinfection and organic pollutant degradation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 512, 555-566.

Xu, Z. and Meng, X. (2009). Size effects of nanocrystalline TiO_2 on As(V) and As(III) adsorption and As(III) photooxidation. *Journal of Hazardous Materials*. 168, 747-752.

Yamazaki, S., Yamabe, N., Nagano, S. and Fukuda, A. (2007). Adsorption and photocatalytic degradation of 1,4-dioxane on TiO_2. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.* 185, 150-155.

Ye, L., Pelton, R., Brook, M., A., Filipe, C., D., M., Wang, H., Brovko, L. and Griffiths, M. (2013). Target disfection of *E. coli* via bioconjugation to photoreactive TiO_2. Bioconjugate Chemistry. 24, 448-455.

Zaborowska, M., Welch, K., Brånemark, R., Khalilpour, P., Engqvist, H., Thomsen, P. and Trobos, M. (2014). Bacteria-material surface interactions: methodological development for the assessment of implant surface induced antibacterial effects. *Journal of Biomedical Materials Research B: Applied Biomaterials*. 103B(1), 179-187.

Zaki, M., I., Mekhemer, G., A., H., Fouad, N., E., Jagadale, T., C. and Ogale, S., B. (2010). Surface texture and specific adsorption sites of sol–gel synthesized anatase TiO_2 nanoparticles. *Materials Research Bulletin*. 45, 1470-1475.

Zhang, X. X., & Zhang, T. (2011). Occurrence, abundance, and diversity of tetracycline resistance genes in 15 sewage treatment plants across China and other global locations. *Environmental Science and Technology*, 45, 2598-2604.

Zheng, X., Shen, Z., Cheng, C., Shi, L., Cheng, R. and Yuan, D. (2018). Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO_2 nanofibers under visible light. *Environmental Pollution*. 237, 452-459.

Zhu, L., He, C., Huang, Y., Chen, Z., Xia, D., Su, M., Xiong, Y., Li, S. and Shu, D. (2012). Enhanced photocatalytic disinfection of *E. coli* 8099 using Ag/BiOI composite under visible light irradiation. *Separation and Purification Technology*. 91, 59-66.

Žvab, U., Štangar, U., L. and Marušič, M., B. (2014). Methodologies for the analysis of antimicrobial effects of immobilized photocatalytic materials. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 98, 1925-1936.

ประวัติผู้วิจัย

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายธรรมศักดิ์ นามสกุล โรจน์วิรุฬห์
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Thammasak Rojviroon

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
   3-1202-00132-61-3

3. ตำแหน่งปัจจุบัน
   อาจารย์/ผศ. ดร.

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่
   สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
   โทรศัพท์ : 02-549-3418 โทรสาร: 02549-3412
   e-mail : thammasak@rmutt.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชาการศึกษา	วิชาเอก	ชื่อสถาบัน	ประเทศ
2545	ตรี	วศบ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วิศวกรรมศาสตร์	สิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	ไทย
2549	โท	วศม. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมศาสตร์	สิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ไทย
2555	เอก	วศด. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมศาสตร์	สิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ไทย

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

กระบวนการบำบัดน้ำและอากาศขั้นสูงโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน
การติดตามตรวจสอบมลพิษดินและน้ำใต้ดิน
การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน การจัดการของเสียอันตราย
ด้านวิศวกรรมสุขาภิบาล วิศวกรรมระบบท่อภายในอาคาร
เกษตรอินทรีย์ การทดสอบปุ๋ยอินทรีย์ในแปลงเพาะปลูกจริง (On-Farm Testing)

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

1. งานวิจัยขณะศึกษาปริญญาโท เรื่อง การกำจัดไอระเหยของโทลูอีนโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. 2549. (เผยแพร่ผลงานในวารสารวิศวกรรมสาร มก.คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549)
2. โครงการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของเสียชีวมวล: กรณีศึกษาปุ๋ยหมักและน้ำสกัดชีวภาพ, 2550. (ผู้วิจัยร่วม)
3. เพิ่มมูลค่าขยะอินทรีย์: การทดสอบการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในแปลงเพาะปลูกจริง. (Value added to organic wastes: A Case Study of On-Farm Testing for Compost Application.รายงานการวิจัยศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม, 2549-2550. (ผู้วิจัยร่วม)
4. โครงการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของเสียชีวมวล: การทดสอบการใช้ปุ๋ยอินทรีย์สูตร ศวฝ.ในแปลงเพาะปลูกจริง (On-Farm Testing), 2551-2552. (ผู้วิจัยร่วม)
5. โครงการประเมินความเสี่ยง และค่าความปลอดภัยของสารหนู ในพื้นที่อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี, 2551-2552. (ผู้วิจัยร่วม)
6. โครงการพัฒนาและส่งเสริมการนำของเสียชุมชนกลับมาใช้ใหม่ : โครงการย่อยการแปรรูปของเสียชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและแกสซิฟิเคชั่น. 2552. (ผู้วิจัยร่วม)
7. โครงการพัฒนาและส่งเสริมการนำของเสียชุมชนกลับมาใช้ใหม่ : โครงการย่อยการขยายผลการวิจัยเกษตรอินทรีย์ลดวิกฤติภาวะโลกร้อน. 2552. (ผู้วิจัยร่วม)
8. โครงการวิจัยการใช้ประโยชน์ของ FGD ยิปซัมในการลดปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน ตำบลวังคัน และ ตำบลองค์พระ อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี, 2553. (ผู้วิจัยหลัก)

9. การศึกษาการใช้ประโยชน์ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมลูกชิ้นในการผลิตพลังงานทดแทน. 2553. โครงการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี. (ผู้วิจัยร่วม)
10. การกำจัดสีและซีโอดีในน้ำชะมูลฝอยโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก. 2556. โครงการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี. (ผู้วิจัยร่วม)

ผลงานเผยแพร่ บทความ วิทยากร:

1. การกำจัดไอระเหยของโทลูอีนโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วารสารวิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 19 ฉบับที่ 58. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน.
2. การทำปุ๋ยอินทรีย์. 2551. วารสาร Green News. ปีที่ 1 ฉบับที่ 4. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.
3. แนวทางการจัดการขยะในประเทศที่พัฒนาแล้ว. 2551. วารสาร Green Research. ปีที่ 5 ฉบับที่ 9 ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.
4. แนวทางการจัดการขยะในประเทศที่พัฒนาแล้ว. 2551. ระบบสืบค้นข้อมูลบรรณานุกรม. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 5. การประเมินความเสี่ยงของสาร di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม. 2551. วารสารวิจัย มข. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
6. อุบัติภัยจากรถบรรทุกสารเคมี. 2551. วารสาร Green Research. ปีที่ 5 ฉบับที่ 11. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.
7. การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมกับปริมาณสารหนูตกค้างในปัสสาวะ ในพื้นที่ตำบลองค์พระและตำบลวังคัน อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี. วารสาร Green Research. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.
8. แลกเปลี่ยนเรียนรู้ กระบวนการกระตุ้นจิตสำนึกเพื่อการจัดการขยะ. ทีมงานการจัดการความรู้. 2552. วารสาร Green Research. ปีที่ 6 ฉบับที่ 13. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.
9. คณะทำงานจัดทำรายงานประจำปี 2550. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.
10. Rojviroon, T. and Sirivithayapakorn, S. "Properties of TiO_2 Thin Films Prepared using the Sol–gel Process", *Surface Engineering*, Volume 29, Number 1, February 2013 , pp. 77-80(4).

11. Rojviroon, T. and Sirivithayapakorn, S. 2012. "Properties of TiO_2 Thin Films Prepared using the Sol–gel Proces", Proceedings of the Tokyo Tech-KU Joint Seminar on Infrastructure Development.

12. Thammasak Rojviroon, Apirat Laobuthee, and Sanya Sirivithayapakorn. Photocatalytic Activity of Toluene under UV-LED Light with TiO_2 Thin Films. Hindawi Publishing Corporation. International Journal of photoenergy, Volume 2012, 8 pages.

13. วิทยากรในการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ ณ ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ ณ ศูนย์ศึกษาพัฒนาชาวบ้าน วังน้ำเขียว จ. นครราชสีมา
    - เรื่อง การทำปุ๋ยหมักและน้ำสกัดชีวภาพ ณ ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ รุ่นที่ 1 ณ ศูนย์พัฒนาคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุและประชาชนและศูนย์ ส่งเสริมกสิกรรมไร้สารพิษ อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ รุ่นที่ 2 ณ ศูนย์พัฒนาคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุและประชาชน และศูนย์ส่งเสริมกสิกรรมไร้สารพิษ อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ ณ ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมและศูนย์ส่งเสริมกสิกรรมไร้สารพิษอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา
    - เรื่อง การผลิตปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
    - เรื่อง เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ ณ ต. เจ็ดริ้ว อำเภอบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร
    - เรื่อง เกษตรอินทรีย์ลดโลกร้อน ณ ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมและ ต. เจ็ดริ้ว อำเภอบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร
14. วิทยากรการสัมมนา เรื่อง รายงานสถานการณ์การปนเปื้อนสารหนูในพื้นที่ตำบลองค์พระและตำบลวังคัน อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี
15. วิทยากรการสัมมนา เรื่อง การผลิตน้ำหมักชีวภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

16. วิทยากรการสัมมนา โครงการยกระดับคุณภาพชีวิตของหมู่บ้าน และชุมชนแบบมีส่วนร่วม 84 หมู่บ้าน ชุมชน เฉลิมพระเกียรติ ให้กับประชาชนและองค์กรบริหารส่วนตำบล อาษา จังหวัดนครนายก โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวพรธิดา เทพประสิทธิ์
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Bhorntida Thepprasit

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
   3 -7209 - 00212 - 44 – 4

3. ตำแหน่งปัจจุบัน
   นักวิจัย

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
   ศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
   เลขที่ 228-228/113 ถนนสิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700
   โทร. 02- 423-9407-10 โทรสาร 02-423-9409
   E-mail : ptd_t@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา
   วท.บ.(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
   สศ.บ. (อาชีวอนามัยและความปลอดภัย) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
   วท.ม. (พลังงานทดแทน) มหาวิทยาลัยนเรศวร

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
   6.1 การตรวจติดตามและวิเคราะห์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (น้ำ, อากาศ, มูลฝอย, ดิน, กากตะกอน) สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และอาชีวอนามัยและความปลอดภัย
   6.2 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
   6.3 การตรวจติดตามระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025
   6.4 พลังงานทดแทน / การจัดการและอนุรักษ์พลังงาน สาขาวิชา พลังงานทดแทน

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย :

7.1.1 การประเมินศักยภาพการผลิตไบโอดีเซลด้วยไขมันและน้ำมัน จากการผลิตและการบริการอาหาร ในร้านอาหารเขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร

7.1.2 การศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กในเขตอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี

7.1.3 การบริหารจัดการพัฒนาพื้นที่ต้นน้ำแบบบูรณาการ กรณีศึกษาการสร้างแบบจำลองฝายต้นน้ำร่วมกับการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ผู้ร่วมวิจัย

ปี	หัวข้องานวิจัย	แหล่งทุน
2548	การศึกษาพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในการส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมชุมชนของประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร	อนุกรรมาธิการการมีส่วนร่วมด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม วุฒิสภา
2549	การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีบางประการในแหล่งน้ำของ จังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2549	การศึกษาพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในการส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมชุมชนของประชาชนในจังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2549-2551	การพัฒนาองค์ความรู้เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรในพื้นที่ส่วนขยายของเมือง จังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2550	การศึกษาคุณภาพน้ำและแนวทางการจัดการน้ำอย่างยั่งยืน จังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2551-2552	การพัฒนาความเข้มแข็งของชุมชนอย่างยั่งยืนโดยการประยุกต์ใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียระยะที่ 1-2 เพื่อทำปุ๋ยและผลิตภัณฑ์ ประจำปีงบประมาณ 2552	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2552	โครงการการพัฒนาการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อประปาเหล็ก กรณีศึกษาโรงงานบีสไพพ์ ฟิตติ้ง อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2553	การพัฒนาการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อประปาเหล็ก กรณีศึกษา โรงงานบีสไพพ์ ฟิตติ้ง อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวสิมนัส ตรีเดช
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Simanata Threedeach

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
3-3399-00016-44-2

3. ตำแหน่งปัจจุบัน
นักวิจัยประจำศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

4. หน่วยงานและที่อยู่
ศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
228-228/1-3 ถนนสิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700
โทรศัพท์ 02- 423-9407-10 โทรสาร 02-423-9409
E-mail : simanata@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา
วท.บ (เทคโนโลยีชีวภาพ) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
วศ.ม (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วศ.ด (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
การวิเคราะห์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (คุณภาพดิน และน้ำ)
การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม
จุลินทรีย์ในระบบทางสิ่งแวดล้อม
การจัดการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

7. ผลงานวิจัย/งานโครงการที่ทำเสร็จแล้ว

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : การพัฒนาสูตรปุ๋ยสำหรับเร่งผล เร่งใบ และเร่งดอก และทดสอบการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ระบบและกลไกการพัฒนาที่สะอาดด้านการพัฒนาเทคโนโลยีของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อเหล็กต้นแบบโดยอาศัยกลไกพัฒนาที่สะอาดเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก

7.3 หัวหน้าโครงการวิจัย : พฤติกรรมของเกษตรกรในการใช้สารเคมีกำจัดแมลง และศัตรูพืชที่มีผลกระทบต่อคุณภาพดิน และน้ำของชุมชนโดยรอบอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี

7.4 หัวหน้าโครงการวิจัย : ผลกระทบจากการใช้สารเคมีทางการเกษตรที่มีต่อการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียในดิน เพาะปลูกและในพื้นทีชุมชนชาวกระเหรี่ยง หมู่บ้านตะเพินคี่ จังหวัดสุพรรณบุรี แห่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.5 หัวหน้าโครงการวิจัย : ผลกระทบจากการใช้สารเคมีทางการเกษตรที่มีต่อการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียในดิน เพาะปลูกและในพื้นทีชุมชนชาวกระเหรี่ยง หมู่บ้านตะเพินคี่ จังหวัดสุพรรณบุรี

7.6 หัวหน้าโครงการวิจัย : การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดพาราควอทโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

8. ผลงานวิจัยที่เคยตีพิมพ์

8.1. Threedeach S., Chiemchaisri W. and Chiemchaisri C. 2016. Fate of antibiotic resistant *E. coli* in anoxic/aerobic membrane bioreactor treating municipal solid waste leachate. International Biodeterioration & Biodegradation. 113, 57-65.

8.2 Threedeach S., Chiemchaisri W., Watanabe T., Chiemchaisri C., Honda R. and Yamamoto K. 2012. Antibiotic resistance of Escherichia coli in leachates from municipal solid waste landfills: Comparison between semi-aerobic and anaerobic operations. Bioresource Technology. 113, 253-258.

8.3 Chiemchaisri W., Chiemchaisri C., Dumrongsukit C., Threedeach S., Ngo H. H. and Vigneswaran S. 2010. Removal of water-borne microorganisms in floating media filter-microfiltration system for water treatment. Bioresource Technology. 102(9), 5438-5443.

8.4 Chiemchaisri C., Chiemchaisri W., Junsod J., Threedeach S. and Wicranarachchi P. N. 2009. Leachate treatment and greenhouse gas emission in subsurface horizontal flow constructed wetland. Bioresource Technology. 100 (16), 3808-3814.

8.5 Chiemchaisri W., Chiemchaisri C., Somkliang P. and Threedeach S. 2006. Dectection and enumeration of methanotrophs in acidic landfill cover soil by FISH technique. Journal of research in engineering and technology. 3(3), 229-239.

8.6 Chiemchaisri C., Chiemchaisri W., Kornboonraksa T., Dumrongsukit C., Threedeach S., Ngo H. H. and Vigneswaran S. 2005. Particle and microorganism removal in floating plastic media coupled with microfiltration membrane for surface water treatment. Water Science & Technology. 51(10), 93-100.

9. การนำเสนอผลงานวิจัย Oral presentation (เป็นผู้นำเสนองาน)

9.1 Chiemchaisri W., Threedeach S., Watanabe T., Chiemchaisri C., Honda R. and Yamamoto K. Correlation of antibiotic resistant E. coli and water characteristics in solid waste leachate. Proceeding of IWA Water Reuse and Energy 2014, Daegu, South Korea, October, 2014.

9.2 Threedeach S., Chiemchaisri W., Watanabe T., Chiemchaisri C., Honda R. and Yamamoto K. 2011. Occurrence of antibiotic resistant *Escherichia coli* in leachates from municipal solid waste landfill in Thailand. Proceedings of the 9th International **Symposium on** Southeast Asian Water Environment, Bangkok, December 1-3, 2011, 415-421.

9.3 Threedeach S., Chiemchaisri W., Watanabe T., Chiemchaisri C., Honda R. and Yamamoto K. 2011. Antibiotic Resistance of *Escherichia coli* in Leachates from Municipal Solid Waste Landfills: Comparison between Semi-Aerobic and Anaerobic Operations. Proceedings of the International Conference on Challenges in Environmental Science & Engineering, Tainan City, Taiwan, September 2011.

9.4 Chiemchaisri W. and Threedeach S. 2003. Effect of algal shape on coagulation efficiency. Forth Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering (RSID4). 147. Bangkok, Thailand.

9.5 สิมนัส ตรีเดช และ วิไล เจียมไชยศรี. 2546. การกำจัดสาหร่ายโดยระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้ถังกรองแบบเม็ดพลาสติกลอยร่วมกับไมโครฟิลเตรชั่น. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปี 2546 สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวจุฑารัตน์ ศรีชูเปี่ยม
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Jutharat Srichoopium

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
   1–1005–00254–99-8

3. ตำแหน่งปัจจุบัน
   นักวิจัยผู้ช่วย

4. หน่วยงานและที่อยู่
   ศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
   228-228/1-3 ถนนสิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700
   โทรศัพท์ 02- 423-9407-10 โทรสาร 02-423-9409
   E-mail : pinny_envi44@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา
   วท.บ (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
   การวิเคราะห์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (คุณภาพน้ำ และดิน)
   การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม
   การตรวจติดตามคุณภาพสิ่งแวดล้อม ISO/IEC 17025

7. ผลงานวิจัย/งานโครงการที่ทำเสร็จแล้ว

   7.1 ผู้ร่วมโครงการวิจัย : การพัฒนาความเข้มแข็งของชุมชนอย่างยั่งยืนโดยการประยุกต์ใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียระยะที่ 1-2 เพื่อทำปุ๋ยและผลิตภัณฑ์

   7.2 ผู้ร่วมโครงการวิจัย : การพัฒนาการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิต ข้อต่อท่อประปาเหล็ก กรณีศึกษาโรงงานบีสไพพ์ ฟิตติ้งอินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร

7.3 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: พฤติกรรมของเกษตรกรในการใช้สารเคมีกำจัดแมลง และศัตรูพืชที่มีผลกระทบต่อคุณภาพดิน และน้ำของชุมชนโดยรอบอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี

7.4 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: ผลกระทบจากการใช้สารเคมีทางการเกษตรที่มีต่อการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียในดิน เพาะปลูกและในพื้นทีชุมชนชาวกระเหรี่ยง หมู่บ้านตะเพินคี่ จังหวัดสุพรรณบุรี แห่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.5 ผู้ร่วมโครงการวิจัย : การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดพาราควอทโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวเพียงกมล ยุวนานนท์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Piangkamon Yuvananont

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
3-8601-00699-88-7

3. ตำแหน่งปัจจุบัน
หัวหน้างานทดสอบมูลฝอย
นักวิทยาศาสตร์เทคนิค

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่
ศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
228-228/1-3 ถนนสิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700
โทร. 02- 423-9407-10 โทรสาร 02-423-9409
E-mail : yuvananont_p@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา
วท.บ (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
การวิเคราะห์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (คุณภาพมูลฝอย ดินและน้ำ)
การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม
การตรวจติดตามคุณภาพสิ่งแวดล้อม ISO/IEC 17025

7. ผลงานวิจัย/งานโครงการที่ทำเสร็จแล้ว
7.1 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: การศึกษาพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในการส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมชุมชนของประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร ปี 2548 แหล่งทุนอนุกรรมาธิการการมีส่วนร่วมด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม วุฒิสภา

7.2 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: การศึกษาพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในการส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมชุมชนของประชาชนในจังหวัดนนทบุรี ปี 2548 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.3 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: การพัฒนาองค์ความรู้เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรในพื้นที่ส่วนขยายของเมือง จังหวัดนนทบุรี ปี 2549 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.4 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: การศึกษาคุณภาพน้ำและแนวทางการจัดการน้ำอย่างยั่งยืน จังหวัดนนทบุรี ปี 2550 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.5 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: แนวทางการมีส่วนร่วมและการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการจัดการสิ่งแวดล้อม จังหวัดนนทบุรี ปี 2550 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.6 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: การพัฒนาความเข้มแข็งของชุมชนอย่างยั่งยืนโดยการประยุกต์ใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียระยะที่ 1-2 เพื่อทำปุ๋ยและผลิตภัณฑ์ ปี 2552 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.7 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: การพัฒนาการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อประปาเหล็ก กรณีศึกษา โรงงานบีสไพพ์ ฟิตติ้งอินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร ปี 2553 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.8 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: แนวทางการจัดการการท่องเที่ยวเชิงนิเวศอย่างยั่งยืนโดยการมีส่วนร่วมของชุมชนในเขตอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี ปี 2555 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.9 ผู้ร่วมโครงการวิจัย: ผลกระทบจากการใช้สารเคมีทางการเกษตรที่มีต่อการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียในดิน เพาะปลูกและในพื้นทีชุมชนชาวกระเหรี่ยง หมู่บ้านตะเพินคี่ จังหวัดสุพรรณบุรี ปี 2555 แหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายอนิรุทธ์ ศรีเลขา
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Anirut Srilekha

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
3 -1022 - 00518 - 29 – 7

3. ตำแหน่งปัจจุบัน
นักวิจัยผู้ช่วย

4. หน่วยงานและที่อยู่
ศูนย์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
228-228/1-3 ถนนสิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700
โทรศัพท์ 02- 423-9407-10 โทรสาร 02-423-9409
E-mail: ah_s125@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา
- วท.บ.(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
- สศ.บ. (อาชีวอนามัยและความปลอดภัย) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
- การตรวจติดตามและวิเคราะห์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (อากาศ, เสียงและความสั่นสะเทือน, แสง, ความร้อน) สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และอาชีวอนามัยและความปลอดภัย
- การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

7. ผลงานวิจัย/งานโครงการที่ทำเสร็จแล้ว

7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ผู้ร่วมวิจัย

ปี	หัวข้องานวิจัย	แหล่งทุน
2548	การศึกษาพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในการส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมชุมชนของประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร	อนุกรรมาธิการการมีส่วนร่วมด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม วุฒิสภา
2549	การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีบางประการในแหล่งน้ำของ จังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2549	การศึกษาพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในการส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมชุมชนของประชาชนในจังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2549-2551	การพัฒนาองค์ความรู้เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรในพื้นที่ส่วนขยายของเมือง จังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2550	การศึกษาคุณภาพน้ำและแนวทางการจัดการน้ำอย่างยั่งยืน จังหวัดนนทบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2551-2552	การพัฒนาความเข้มแข็งของชุมชนอย่างยั่งยืนโดยการประยุกต์ใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียระยะที่ 1-2 เพื่อทำปุ๋ยและผลิตภัณฑ์ ประจำปีงบประมาณ 2552	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2553	การพัฒนาการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อประปาเหล็ก กรณีศึกษา โรงงานบีสไพพ์ ฟิตติ้ง อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2555	การศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ในเขตอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2557	การบริหารจัดการพัฒนาพื้นที่ต้นน้ำแบบบูรณาการ กรณีศึกษา การสร้างแบบจำลองฝายต้นน้ำร่วมกับการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายธวัชชัย ศรีสอาด

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Thawatchai Srisa-ard

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

1 -2198 - 00116 - 84 – 9

3. ตำแหน่งปัจจุบัน

นักวิชาการสิ่งแวดล้อม

4. หน่วยงานและที่อยู่

ศูนย์สิ่งแวดล้อม/หลักสูตรการจัดการสิ่งแวดล้อมเมืองและอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

228-228/113 ถนนสิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700

โทรศัพท์ 02- 423-9407-10 โทรสาร 02-423-9409

E-mail : Thawatchai_envcenter@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

วท.บ (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

การตรวจติดตามและวิเคราะห์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (อากาศ, เสียงและความสั่นสะเทือน, แสง ความร้อน) สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

7. งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ผู้ร่วมวิจัย

7.1 การบริหารจัดการพัฒนาพื้นที่ต้นน้ำแบบบูรณาการกรณีศึกษา การสร้างแบบจำลองฝายต้นน้ำร่วมกับการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ (วช.)

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - สกุล นายสุภัส มังสาทอง

2. หน่วยงานและที่อยู่

เลขที่ 46 ถนน จรัญสนิทวงศ์ แขวง วัดท่าพระ เขต บางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร 10600

โทร. 0-2878-5000-5 โทรสาร 0-2878-5012

E-mail : auadul@hotmail.com

3. ประวัติการศึกษา

วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

วท.ม. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาวิชาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

4. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การจัดทำแผนนโยบาย มาตรการตรวจสอบและ ติดตามด้านอนุรักษ์พลังงาน

การตรวจสอบวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร

ที่ปรึกษาระบบการจัดการพลังงาน

วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

พลังงานทดแทน

5. ผลงานวิจัย/งานโครงการที่ทำเสร็จแล้ว

5.1 การอนุรักษ์และบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติบนพื้นที่สูงอย่างยั่งยืน : กรณีศึกษาชุมชนชาวกะเหรี่ยง หมู่บ้านตะเพินคี่ จังหวัดสุพรรณบุรี

5.2 การศึกษาศักยภาพการเป็นแหล่งเรียนรู้ทางด้านพลังงานทดแทน เรื่อง การผลิตเชื้อเพลิงเขียว ณ วัดสวนร่มบารมี ตำบลวงฆ้อง อำเภอพรหมพิราม จังหวัดพิษณุโลก

5.3 การศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ในเขตอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี

5.4 การศึกษาแหล่งเรียนรู้พลังงานทดแทน กรณีศึกษา การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ชุมชนชาวกะเหรี่ยง หมู่บ้านตะเพินคี่ จังหวัดสุพรรณบุรี