

ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์
ในการกำจัดสารโทลูอีนโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

นางสาวพลอย สุจริตธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFICIENCY OF TITANIUM DIOXIDE COATED FILTER FOR TOLUENE REMOVAL
BY PHOTOCATALYSIS PROCESS

Miss Ploy Sujaridtham

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศเคลือบ
ไททานเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารโพลีอิน
โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

โดย นางสาวพลอย สุจริตธรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.สิทธิสุนทร สุโพธิณะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชาวลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.สิทธิสุนทร สุโพธิณะ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยะวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี ช่วยบำรุง)

พลอย สุจริตธรรม : ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ใน
 การกำจัดสารโทลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (EFFICIENCY OF TITANIUM
 DIOXIDE COATED FILTER FOR TOLUENE REMOVAL BY PHOTOCATALYSIS
 PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ อ.ที่ปรึกษาวิทยา
 นิพนธ์ร่วม : ดร. สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 109 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินโดยใช้กระดาษกรอง
 ควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
 ทำการทดลองโดยมีแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1
 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์
 ต่อตารางเซนติเมตร ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้
 อยู่ที่ 10 กรัมต่อตารางเมตร สารโทลูอินความเข้มข้นเริ่มต้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ใช้ถึง
 ปฏิริยาขนาด 0.03 ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิการทดลองที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้น
 สัมพัทธ์ในช่วง 50 - 70 เปอร์เซ็นต์ ใช้กระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททา
 เนียมไดออกไซด์ขนาด 0.156 ตารางเมตร ภายใต้ระยะเวลาการทดลอง 180 นาที พบว่าแหล่งกำเนิด
 แสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรอง
 ควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร
 โทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วนดีที่สุดเท่ากับ 42.88 และ 21.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อ
 ใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินทุกความเข้มแสงสามารถกำจัด
 สารให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานภายในอาคารที่อยู่อาศัยระยะยาว ซึ่งกำหนดไว้ว่าที่ระยะเวลาสัมผัส
 สาร 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นต้องไม่เกิน 0.6 ส่วนในล้านส่วน พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโคร
 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมได
 ออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 95.84
 และ 95.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 60 และ 45 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า
 หลอดแบล็คไลท์ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินได้ดีกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจาก
 หลอดแบล็คไลท์มีพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนทำให้เกิดการกำจัดสารโทลูอินได้อย่างรวดเร็ว
 กว่าแสงในช่วงวิสิเบิลจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2555 5..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370303321: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOTOCATALYSIS PROCESS, TOLUENE, TITANIUM DIOXIDE

PLOY SUJARIDTHAM: EFFICIENCY OF TITANIUM DIOXIDE COATED FILTER FOR TOLUENE REMOVAL BY PHOTOCATALYSIS PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF. WONGPUN LIMPASENI, CO-ADVISOR: SITTHSUNTORN SUPOTHINA, Ph.D., 109 pp.

The objective of this research was to study efficiency of toluene removal by photocatalysis process using titanium dioxide coated quartz fiber filter and glass fiber filter. The experiment was carried out by using fluorescent lamp and blacklight lamp as a light source. The intensity of fluorescent lamps and blacklight lamps were 0.6, 1.5 and 2.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ and 52, 124 and 156 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, respectively. The amount of titanium dioxide loading on the quartz fiber filter and glass fiber filter was 10 g/m^2 and initial concentration of toluene was 1, 5 and 10 ppm. The toluene removal efficiency was carried out in a 30-L reactor at controlled temperature of 25 ± 2 °C, relative humidity of 50 -70 %. The size of quartz fiber and glass filter coated titanium dioxide was 0.156 m^2 . The treatment time was 180 minutes. TiO_2 -coated quartz fiber and glass fiber when tested with 10 ppm of toluene showed the best removal efficiency of 42.88 % and 21.74 %, respectively. In contrast, backlight lamp at all UV intensities can remove toluene to the standard level according to the residential indoor air quality guidelines which is 0.6 ppm for long term (24 hour). When testing at 187 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ UV intensity and 10 ppm of toluene with TiO_2 -coated quartz fiber and glass fiber for 60 and 45 minutes, respectively showed the best removal efficiency of 95.84 % and 95.42 %, respectively can be obtained from the test. As a result, it can be concluded that using blacklight lamp can remove more toluene than fluorescent lamp. Due to the backlight characteristics which have high capacity to generate electron in an excited state, toluene removal is faster than using light in visible range from fluorescent lamp. These results were in accordance with the photo catalysis oxidation theory.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2012 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.สิทธิสุนทร สุโพธิณะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ดูแลแก้ปัญหา และอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ורתัย ชาวลาภฤทธิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง และอาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์ ที่กรุณาใช้เวลาในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอรุมา นิมิตรตระกูลชัย และคุณมันทนา สุวรรณ ผู้ช่วยวิจัยห้องปฏิบัติการการผลิตเซรามิกส์ หน่วยวิจัยเทคโนโลยีเซรามิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนกำลังใจในการทำวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่เอื้ออำนวยสถานที่ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำแนะนำในการทำวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ช่วยส่งเสริมสนับสนุนในด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจ จนทำให้การศึกษาครั้งนี้สำเร็จด้วยดี

สารบัญ

หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารประกอบอินทรีย์ระเหย	4
2.1.1 คุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ระเหย	4
2.1.2 การแบ่งกลุ่มสารอินทรีย์ระเหย	4
2.2 โทลูอิน	5
2.2.1 ลักษณะทั่วไป	5
2.2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพ	5
2.2.3 การใช้ประโยชน์	6
2.2.4 การเกิดพิษและอันตรายต่อสุขภาพ	6
2.2.5 การย่อยสลายของสารในร่างกาย	7
2.2.6 มาตรฐานสารโทลูอินภายในอาคารที่อยู่อาศัย	7
2.3 ไททานเนียมไดออกไซด์	8
2.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	12
2.4.1 ทฤษฎีและหลักการทั่วไป	12
2.4.2 การสลายโทลูอินด้วยแสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์	15
2.4.3 กระบวนการสลายโทลูอิน	15

2.4.4	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของไอรอย	16
2.5	รังสีอัลตราไวโอเล็ต	18
2.5.1	ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	18
2.5.2	หลอดฟลูออเรสเซนต์	19
2.5.3	หลอดแบล็คไลท์	19
2.6	กระดาศกรงควอดซ์	20
2.7	กระดาศกรงใยแก้ว	20
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.8.1	การเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์	20
2.8.2	ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์	21
2.8.3	การปรับปรุงการดูดกลืนแสงของไททานเนียมไดออกไซด์	22
2.8.4	ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	22
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1	แผนการทดลอง	29
3.2	เครื่องมือ และอุปกรณ์	30
3.3	ถังปฏิกิริยา	32
3.4	สารเคมี	33
3.5	วิธีดำเนินงานวิจัย	34
3.5.1	วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ	34
3.5.2	วิธีเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศ	34
3.5.3	การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศ	35
3.5.3.1	วิธีเตรียมสารโทลูอิน	35
3.5.3.2	วิธีการทดลอง	35
3.5.3.3	ชุดควบคุม	36
3.5.3.4	ชุดทดสอบการดูดติดสารโทลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ	36
3.5.3.5	ชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	36
3.5.3.6	ชุดทดสอบการกำจัดสารโทลูอินโดยใช้แสงยูวี	36
3.6	ชุดการทดลอง	37
3.7	ตัวแปรในการทดลอง	38

3.8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด.....	39
บทที่ 4	ผลการศึกษา.....	40
4.1	การเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศด้วยวิธี Dip Coat	40
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไททานเนียมไดออกไซด์.....	40
4.1.2	พื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นฟอกอากาศ.....	41
4.1.3	ปริมาณสารไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศ	42
4.2	การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศ	42
4.2.1	Base line.....	42
4.2.2	ชุดควบคุม	44
4.2.3	ชุดทดสอบการดูดติดสารโพลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ	45
4.2.4	ชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	46
4.2.4.1	แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	46
4.2.4.2	แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์	50
4.2.5	ชุดการทดลองการกำจัดสารโพลูอินโดยใช้แสงยูวี	54
4.3	จลนพลศาสตร์.....	55
4.3.1	ชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	56
4.3.1.1	แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	56
4.3.1.2	แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์	59
4.4	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด	63
4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินตามค่ามาตรฐานสารโพลูอินภายใน อาคารที่อยู่อาศัย.....	64
4.6	เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	66
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	67
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	67
5.1.1	การเปลี่ยนแปลงชนิดแผ่นฟอกอากาศ.....	67
5.1.2	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โพลูอิน	67
5.1.3	การเปลี่ยนแปลงแหล่งกำเนิดแสง และความเข้มแสงยูวี.....	68
5.2	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด กับค่า มาตรฐานสารโพลูอิน	68

หน้า	
5.2.1 แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์	68
5.2.2 แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์	69
5.3 ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง Base line	76
ภาคผนวก ข ผลการทดลองชุดควบคุม	78
ภาคผนวก ค ผลการทดลองชุดทดสอบการดูดซับพิษของสาร โทลูอิน ลงบนแผ่นฟอกอากาศ	81
ภาคผนวก ง ผลการทดลองการกำจัดสาร โทลูอิน โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง	84
ภาคผนวก จ ผลการทดลองการกำจัดสาร โทลูอิน โดยใช้หลอดแบล็คไลท์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง	97
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองการกำจัดสาร โทลูอิน โดยใช้แสงยูวี	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	108

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1	มาตรฐานสารโทลูอินภายในอาคารที่อยู่อาศัย	7
2.2	คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของไททานเนียมไดออกไซด์	8
2.3	ตำแหน่งของแถบอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด	9
2.4	การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์ และอนาเทส ...	11
2.5	คุณสมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25	11
2.6	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
3.1	แผนการทดลองชุดควบคุม	37
3.2	แผนการทดลองชุดทดสอบการดูดติดสาร โทลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ	37
3.3	แผนการทดลองชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	37
3.4	แผนการทดลองชุดทดสอบการกำจัดสาร โทลูอิน โดยใช้แสงยูวี.....	38
3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง และช่วงค่าแปรผัน	38
4.1	ผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ	41
4.2	สถานะที่เหมาะสมของสารไททานเนียมไดออกไซด์ กับแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด	42
4.3	สรุปค่าคงที่ปฏิกิริยาชุดทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	63
ก-1	ผลการทดลองสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสถานะ ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ และปิดไฟ.....	77
ข-1	ผลการทดลองสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสถานะ ปิดไฟ ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์ไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	79
ข-2	ผลการทดลองสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสถานะ ปิดไฟ ร่วมกับกระดาศกรองใยแก้วไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์.....	79
ค-1	ผลการทดลองสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสถานะ ปิดไฟ ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	82
ค-2	ผลการทดลองสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสถานะ ปิดไฟร่วมกับกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	82
ง-1	ผลการกำจัดสาร โทลูอินความเข้มข้น 1ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาศกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	85

ตารางที่	หน้า
ง-2 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสงยูวี 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	89
ง-3 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	93
จ-1 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	98
จ-2 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	100
จ-3 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	102
ฉ-1 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะเปิดไฟ จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับกระดาษกรองควอตซ์ไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	107
ฉ-2 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะเปิดไฟ จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับกระดาษกรองใยแก้วไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	107

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	5
2.2	10
2.3	13
2.4	15
2.5	19
3.1	29
3.2	31
3.3	31
3.4	32
3.5	32
4.1	40
4.2	41
4.3	43
4.4	44
4.5	45
4.6	47
4.7	48
4.8	49

ภาพที่	หน้า
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์..... 50
4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์..... 52
4.11	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์..... 53
4.12	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนโดยใช้แสงยูวี..... 55
4.13	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์..... 56
4.14	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์..... 57
4.15	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์..... 58
4.16	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์..... 60
4.17	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์..... 61
4.18	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์..... 62
4.19	ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินตามค่ามาตรฐานสาร โทลูอินภายในอาคารที่อยู่อาศัย..... 65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่ใช้เวลามากกว่าร้อยละ 80 ของแต่ละวันในพื้นที่ภายในอาคาร สารมลพิษภายในอาคารส่วนใหญ่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) (Liang and Zhao, 2009) ไอของสารอินทรีย์ระเหยเป็นสาเหตุหลักของมลภาวะอากาศภายในอาคาร ซึ่งเป็นสารที่มีพิษต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช ก่อให้เกิดอันตรายแก่สุขภาพของผู้ที่สัมผัสในระยะยาว ในชีวิตประจำวันเราอาจได้รับสารอินทรีย์ระเหยจากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้าน น้ำยาฟอกสี สเปรย์ปรับอากาศและระงับกลิ่น น้ำยาขัดและขัดผม สเปรย์ฉีดผม สี และน้ำยาล้างเล็บ สารกำจัดแมลง เป็นต้น (เพลินพิศ พงษ์ประยูร, 2553) หรืออาจเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำอาหาร การทำความสะอาด การสูบบุหรี่ และการใช้รถยนต์ ทำให้เพิ่มระดับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารได้ (Baek et al., 1991b) สารอินทรีย์ระเหยหลายชนิดมีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ เช่น มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาทส่วนกลาง ตับ และไต บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) (กรมควบคุมมลพิษ, 2544) สารอินทรีย์ระเหยยังเป็นสาเหตุหนึ่งของโรค Sick Building Syndrome เป็นภาวะที่ผู้อยู่อาศัยอยู่ในอาคารเกิดความไม่สบาย มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่อยู่อาศัย และคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality) ที่มีการระบายอากาศภายในไม่เพียงพอ อากาศมีสิ่งสกปรก สิ่งระคายเคือง เชื้อโรค ก๊าซ และสารพิษที่ปนเปื้อนในระดับที่ก่อให้เกิดการเจ็บป่วยขึ้น เช่น ปวดศีรษะ วิงเวียน คัดจมูก คอแห้ง ระคายเคือง รู้สึกรายใจไม่ออก เป็นต้น (ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล, 2548) พบว่ามีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบในอากาศภายในอาคารอย่างชัดเจน แม้ว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยจะอยู่ในระดับต่ำก็ตาม (Hedge, 1989)

เทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการกำจัดสารมลพิษในอากาศจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process) ใช้คะตะลิสต์ชนิดไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สำหรับกลุ่มไอระเหยของสารอินทรีย์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ ได้เลือกตัวทำละลายซึ่งพบได้บ่อย และมีความเป็นพิษคือสารโทลูอีน ซึ่งตรวจพบว่ามีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดภายในอาคารสำนักงานในกรุงเทพมหานคร มีค่าความ

เข้มข้นอยู่ที่ 110.19 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รัฐเขต มูลินตี๊ะ, 2552) โดยค่ามาตรฐานสารโทลูอินภายในอาคารที่อยู่อาศัยกำหนดให้ระยะเวลาสัมผัสสารที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายที่ 8 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารโทลูอินอยู่ที่ 4 ส่วนในล้านส่วน และ 0.6 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ (Health Canada, 2011)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการที่สะอาด เหลือสิ่งตกค้างน้อย สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ รวมทั้งต้นทุนไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับวิธีการสลายอื่น สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันปกติ และสามารถหยุดปฏิกิริยาได้โดยการหยุดฉายแสง (Blount and Falconer, 2002) โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นกระบวนการที่ทำให้ สาร โทลูอินเปลี่ยนเป็นสารที่ไม่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยอาศัย 2 ขั้นตอนหลัก คือการดูดซับ สาร โทลูอินจากอากาศลงบนพื้นผิวของคะตะลิสต์ และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (ชวิศรี กรณ์ชัยเมธากุล , 2549) งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษา ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศชนิดกระดาษกรอง ควอดซ์ และกระดาษกรองใย แก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสาร โทลูอินออกจากอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ใช้หลอดแบล็คไลท์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารให้มีคุณภาพดีเหมาะกับการอยู่อาศัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

(1) เพื่อจัดทำแผ่นฟอกอากาศโดยการเคลือบกระดาษกรอง ควอดซ์ และกระดาษกรองใยแก้วด้วยไททาเนียมไดออกไซด์

(2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศชนิดกระดาษกรอง ควอดซ์ และกระดาษกรองใย แก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารโทลูอินในอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

(3) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดสารโทลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ ชนิดของแผ่นฟอกอากาศ ความเข้มข้นของสารโทลูอิน แหล่งกำเนิดแสง และความเข้มแสง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

(1) งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการคุณภาพอากาศ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการการผลิตเซรามิก หน่วยวิจัยเทคโนโลยีเซรามิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

(2) ใช้ถังปฏิกริยาแบบทีละเท (Batch Reactor) ขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.5 เมตร สูง 0.3 เมตร ปริมาตร 0.03 ลูกบาศก์เมตร ทำการทดลองในห้องปรับอากาศ ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 50 - 70 เปอร์เซ็นต์

(3) ตรวจวัดความเข้มข้นไอสารโทลูอิน ความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยแบบพกพา ppbRAE

(4) ชนิดแผ่นฟอกอากาศที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่ กระจกกรอง ควอตซ์ (Quartz Fiber Filter) และกระจกกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) เคลือบด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.156 ตารางเมตร

(5) ใช้แหล่งกำเนิดแสง Visible Light จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสง อัลตราไวโอเล็ตจาก หลอดแบล็กไลท์ ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(6) พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ คือ ชนิดของแผ่นฟอกอากาศ ความเข้มข้นของสารโทลูอิน แหล่งกำเนิดแสง และความเข้มแสง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้แผ่นฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินโดยกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส

(2) สามารถนำข้อมูลผลงานวิจัยไปใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศให้มีความสามารถในการกำจัดสารโทลูอิน และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายอื่นๆ ได้ดีมากยิ่งขึ้น

(3) สามารถนำแผ่นฟอกอากาศที่ได้จากการทดลองไปใช้งานภายในอาคารบ้านเรือน หรือสำนักงาน

(4) ช่วยลดมลพิษอากาศในกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร เพื่อให้เกิดสภาวะความน่าสบายมีความปลอดภัยจากมลภาวะอากาศเป็นพิษทำให้ผู้อยู่อาศัยมีสุขภาพ และความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบอินทรีย์ระเหย

สารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compounds, VOCs) คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยเป็นไอได้ง่ายที่อุณหภูมิ และความดันปกติ โมเลกุล ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นสำคัญ ซึ่งอาจมีอะตอมของออกซิเจน หรือคลอรีนร่วมกับสารอินทรีย์ระเหยเป็นสาเหตุหนึ่งของมลพิษด้านต่างๆ ในปัจจุบัน เช่น มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ รวมทั้งมลพิษทางอากาศภายในอาคาร ซึ่งในปัจจุบันกำลังเป็นปัญหาที่กำลังได้รับความสนใจจากองค์กรที่เกี่ยวข้องทางด้านสุขภาพ และสิ่งแวดล้อมทั้งในประเทศ และต่างประเทศ (ธนวัฒน์ บุญประดิษฐ์, 2551)

2.1.1 คุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

สารอินทรีย์ระเหย คือสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และมีความดันไออย่างน้อย 0.13 กิโลพาสคาล (kPa) ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน (ที่ 298 องศาเซลวิน และ 101 กิโลพาสคาล) ทั้งนี้ไม่รวมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบกลุ่มออกแกโน เมทัลลิก หรือกรดอินทรีย์ต่างๆ (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544)

2.1.2 การแบ่งกลุ่มสารอินทรีย์ระเหย แบ่งตามลักษณะโมเลกุลได้ 2 กลุ่ม คือ

(1) กลุ่ม Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated Hydrocarbons

ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีอะตอมของฮาโลคลอรีนในโมเลกุล สารกลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้ของขยะ พลาสติก วัสดุ สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ ซึ่งทำให้มีผลเสียต่อสุขภาพของผู้ได้รับ คือทำให้ป่วยเป็นโรคทางเดินหายใจ ตัวอย่างกลุ่มสารนี้ ได้แก่

- กลุ่มสารอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น สารตัวทำละลายในโรงงานอุตสาหกรรม สารกลุ่มแอลกอฮอล์ และน้ำมัน เป็นต้น
- น้ำมันเชื้อเพลิงตัวทำละลายในโรงงานอุตสาหกรรม โพรเพน 1,3 บิวตะไดอิน น้ำมันเบนซิน เฮกเซน
- กลุ่มสารแอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ ทีโตน เอทิลแอลกอฮอล์ เมทิลแอลกอฮอล์ ฟอรัมาลดีไฮด์

- กลุ่มสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น สารตัวทำละลายต่างๆ โทลูอีน ไชลีน เบนซีน แนฟทาลีน สไตรีน ฟีนอล เป็นต้น

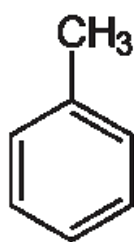
(2) กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons

ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีอะตอมของธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ในอุตสาหกรรม สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษมากกว่า และเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่า สารในกลุ่ม Non-chlorinated VOCs คือสลายตัวได้ยากในธรรมชาติ และในทางเคมีจะมีความคงตัวสูงสะสมได้นาน ครอบคลุมการทำงานของสารพันธุกรรม ขยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ มีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้

2.2 โทลูอีน (Toluene)

2.2.1 ลักษณะทั่วไป

โทลูอีนเป็นอนุพันธ์ของเบนซีน เป็น Aromatic hydrocarbon มีชื่อตามสูตรโครงสร้างว่า เมทิล เบนซีน (methyl benzene) สูตรโมเลกุลคือ $C_6H_5CH_3$ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยเป็นไอ และติดไฟได้ง่ายที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิปกติ มีกลิ่นคล้ายเบนซีน แต่ความเป็นพิษน้อยกว่าเบนซีน และจัดเป็นสารไวไฟ (Inflammable liquid) โทลูอีนจัดเป็นตัวทำละลายที่ดี จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับเบนซีน และไชลีนมาตั้งแต่อดีต โทลูอีนเกิดจากกระบวนการผลิตน้ำมันเบนซีน และเชื้อเพลิงต่างๆจากน้ำมันดิบ กระบวนการผลิตถ่านหิน และเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตสไตรีน (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัยสาธารณสุข, 2553)



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของโทลูอีน

2.2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

- น้ำหนักโมเลกุล 92.13
- จุดหลอมเหลว -95 องศาเซลเซียส
- จุดเดือด 110.4 องศาเซลเซียส
- จุดวาบไฟ 6-10 องศาเซลเซียส

- ความหนาแน่น 0.866 กรัมต่อมิลลิลิตร
- ความดันไอ 36.7 mmHg ที่ 30 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง 623 องศาเซลเซียส
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.5 กรัมต่อกิโลกรัมที่ 20 องศาเซลเซียส

2.2.3 การใช้ประโยชน์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

- สารทำลายในอุตสาหกรรมยา เคมี ยางพลาสติก และสี
- วัตถุประสงค์ต้นในการผลิตสารเคมีหลายชนิด เช่น เบนซาลดีไฮด์ เบนซิลอัลกอฮอล์ กรดเบนโซอิก และสารอนุพันธ์ของคลอไรด์ (Marcí et al., 2003)
- อุตสาหกรรมหนังเทียม เส้นใย การเคลือบกระดาษ และหมึกพิมพ์
- องค์ประกอบในสูตรผสมน้ำมันเชื้อเพลิง
- ทินเนอร์ในสีแล็กเกอร์ และน้ำมันชักเงา
- สารขจัดหรือล้างสี
- การใช้ประโยชน์ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์สำหรับห้องปฏิบัติการทางเคมี ใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย หรือตัวสกัดสารอินทรีย์ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์ใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์ และวิเคราะห์พอลิเมอร์ เนื่องจากโทลูอินสามารถละลายสารพอลิเมอร์ได้ดี และระเหยออกจากพอลิเมอร์ได้ง่าย
- ใช้เป็นองค์ประกอบในสูตรผสมน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องบิน และเครื่องยนต์บางชนิด

2.2.4 การเกิดพิษและอันตรายต่อสุขภาพ

โทลูอินเป็นพิษต่อมนุษย์ และสัตว์ทั้งในแบบเรื้อรัง และเฉียบพลัน เช่น เมื่อหนูได้รับโทลูอินทางปากพบว่ามีความ LD50 เท่ากับ 636 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษกับสารเคมีชนิดอื่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น เบนซีน ไซลีน เมทานอล อะซีโตน และเอทานอล พบว่ามีความ LD50 เท่ากับ 930 4,300 5,628 5,800 และ 7,060 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความเป็นพิษต่ำกว่าโทลูอินทั้งสิ้น เมื่อโทลูอินเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบสมอง และระบบประสาทส่วนกลาง ระบบการหายใจ ตับ ไต ตา และผิวหนัง โดยเกิดพิษได้ 2 ลักษณะ (รัตนานา สิ้นรุภัก, 2537)

(1) พิษเฉพาะที่

- ผู้ป่วยจะมีอาการระคายเคืองผิวหนัง และเยื่อต่างๆ

(2) พิษต่อระบบของร่างกาย

- ในกรณีเฉียบพลันเกิดขึ้นทันทีหลังจากได้รับ อาการเหมือนคนเมาสุรา ควบคุมตัวเองไม่ได้ ระคายเคืองเยื่อในช่องปาก ตาไวต่อแสง ระบบประสาทส่วนกลางจะถูกกระตุ้น ทำให้นอนไม่หลับ ต่อมาจะมีฤทธิ์กดประสาท โทลูอินทำให้เกิดอาการปวดหัว มึนงง รู้สึกอ่อนเพลีย ชัก กล้ามเนื้ออ่อนแรง มีผลต่อความจำ รู้สึกคลื่นไส้ และเบื่ออาหาร นอกจากนี้การได้รับโทลูอินในปริมาณสูงยังอาจทำให้เสียชีวิตได้
- สำหรับกรณีเรื้อรังจะมีอาการของระบบสมอง และประสาทส่วนกลางเรื้อรัง ได้แก่ ความจำเสื่อม สูญเสียสมาธิ เสื่อมความสามารถทางปัญญา สูญเสียความคิดริเริ่ม ขาดความสนใจในสิ่งรื่นเริง ต้องการนอนมากขึ้น อ่อนเพลีย มีอารมณ์เศร้ากังวล อารมณ์เปลี่ยนแปลงง่าย และกระวนกระวาย

2.2.5 การย่อยสลายของสารในร่างกาย

เมื่อสารเข้าสู่ร่างกาย ตับจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารโทลูอินให้กลายเป็น Benzyl alcohol และ Benzoic acid ก่อนจะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ (ประสงค์ คุณานุวัฒน์ชัยเดช และไมตรี สุทธจิตต์, 2545)

2.2.6 มาตรฐานสารโทลูอินภายในอาคารที่อยู่อาศัย

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานสารโทลูอินภายในอาคารที่อยู่อาศัยของประเทศแคนาดา

การได้รับสัมผัส	ความเข้มข้น		ผลกระทบ
	mg/m ³	ppm	
ระยะสั้น (8 ชั่วโมง)	15	4.0	อาการที่เกี่ยวข้องกับระบบประสาท (ปวดหัว เวียนศีรษะ และความรู้สึกของความเมื่อย)
ระยะยาว (24 ชั่วโมง)	2.3	0.6	ส่งผลต่อการทำงานของระบบประสาทความจำ

ที่มา: Health Canada, 2011

2.3 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม มักอยู่ในรูปออกไซด์ และซัลไฟด์ มีหลายชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทังสเตนออกไซด์ (WO₃) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นต้น ซึ่งรวมไปถึงไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เป็นสารกึ่งตัวนำ ไฟฟ้า (semiconductor) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอาศัยแสงที่นิยมกันมาก เนื่องจาก แถบช่องว่างพลังงาน อยู่ที่ประมาณ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (≤ 380 นาโนเมตร)

ข้อดีของไททาเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ประสิทธิภาพสูง มีความโปร่งแสง จึงทำให้แสงส่องผ่านได้เป็นอย่างดี มีพื้นที่ผิวหน้าสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกาะติดผิว มีความคงตัว ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน และไม่สูญเสียประสิทธิภาพ ไปเมื่อถูกนำมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติทางกายภาพ	คุณสมบัติทางเคมี
1. มีลักษณะเป็นของแข็ง	1. จุดเดือด 2,500-3,000 องศาเซลเซียส
2. สีขาว	2. จุดหลอมเหลว 1,840 องศาเซลเซียส
3. ไม่มีกลิ่น	3. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.9
4. น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 79.90	4. ไม่ละลายน้ำ
5. ความแข็ง 5.5 - 6	5. pH 7-8 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ที่มา : Amethyst Galleries, 1996

ช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอาศัยแสงนั้น ควรจะเหมาะสมกับพลังงานที่ได้รับมาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยพลังงานของแถบวาเลนซ์ แถบการนำ ช่องว่างของแถบอิเล็กตรอน และความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าบางชนิด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด

สารกึ่งตัวนำ Semiconductor	แถบวาเลนซ์ Valence band (eV)	แถบการนำ Conduction band (eV)	ช่องว่างแถบ Band gap (eV)	ความยาวคลื่นที่เหมาะสม กับช่องว่างแถบ Band gap wavelength (nm)
TiO ₂	+3.1	+0.1	3.0	380
SnO ₂	+4.1	+0.3	3.9	318
ZnO	+3.0	-0.2	3.2	390
ZnS	+1.4	-2.3	3.7	36
WO ₃	+3.0	+0.2	2.8	443
CdS	+2.1	-0.4	2.5	497
CdSe	+1.6	-0.1	1.7	730
GaAs	+1.0	-0.4	1.4	887
GaP	+1.3	-1.0	2.3	540

ที่มา: Robertson, 1996 อ้างถึงใน พิมพ์ลิรินทร์ แดงสระน้อย, 2548

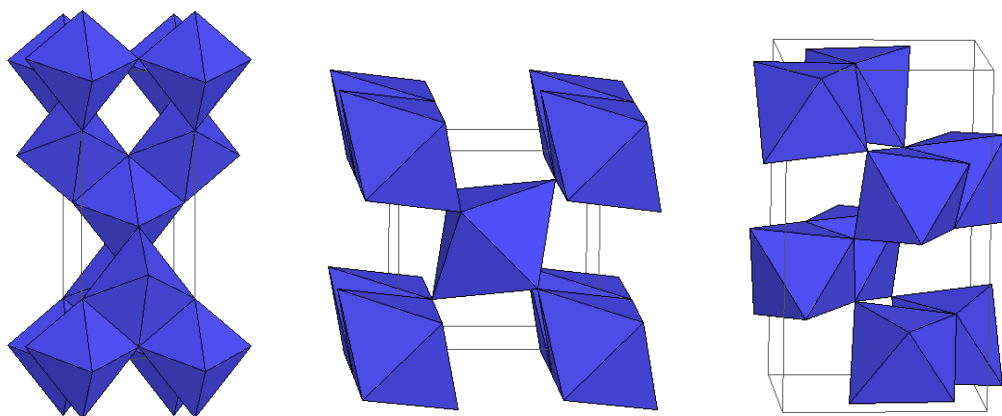
โดยทั่วไปแล้วไททาเนียมไดออกไซด์มี รูปแบบ โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันแบ่งได้เป็น 3 ชนิดได้แก่

(1) อนาเทส (Anatase) เป็นรูปผลึกที่มีโครงสร้างเป็นแบบ tetragonal มีเสถียรภาพมากที่สุด อุณหภูมิต่ำ ไม่ค่อยเสถียรที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิประมาณ 915 องศาเซลเซียส รูปผลึกแบบอนาเทสจะกลายเป็นรูปผลึกแบบรูไทล์ และเมื่อเปลี่ยนรูปผลึกแล้วจะไม่สามารถเปลี่ยนกลับคืนได้ โดยอนาเทสมีสมบัติในการหักเห และสะท้อนแสง (refractive index) น้อยกว่ารูปผลึกแบบรูไทล์ แต่จะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (surface area) มากกว่ารูปผลึกแบบรูไทล์ (อภิชาติ ไชยชนตรดี, 2549) โดยทั่วไปไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดนี้จะให้ photoactivity สูงกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดอื่นๆ

(2) รูไทล์ (Rutile) เป็นรูปผลึกที่มีโครงสร้างเป็นแบบ tetragonal มีโครงสร้างผลึกคล้ายปริซึม และโปร่งบาง มีเสถียรภาพมากที่สุด และมีสมบัติในการหักเห และสะท้อนแสง ได้ดีกว่ารูปผลึกแบบอนาเทส แต่มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าผลึกแบบอนาเทส จึงนิยมนำไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดนี้มาใช้ เป็นอนุภาค ในการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น สี

เครื่องสำอาง ส่วนผสมในอาหาร รวมถึงผลิตภัณฑ์เพื่อให้สีขาว และสารกันแดดชนิดสะท้อนแสง ในครีมกันแดด

(3) บรูคไคท์ (Brookite) เป็นรูปผลึกที่มีโครงสร้างเป็นแบบ orthorhombic ไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส รูปผลึกแบบบรูคไคท์จะเปลี่ยนรูปผลึกเป็นแบบรูไทล์โดยอัตโนมัติ โดยปกติแล้วไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดนี้ ไม่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากจะถูกพบได้ในแร่เพียงอย่างเดียว



(a) อนาเทส (

b) รูไทล์ (

c) บรูคไคท์

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างผลึกไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา: Smyth, 2009

จากการที่ไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่ต่างกัน สำหรับไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทสนั้น มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.895 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้น มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.2743 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร โครงสร้างผลึกแบบบรูคไคท์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.123 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Smyth, 2009) คุณสมบัติที่ต่างกัันดังกล่าวทำให้ผลึกโครงสร้างแบบอนาเทส มีแถบช่องว่างพลังงาน เท่ากับ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่รูไทล์มี แถบช่องว่างพลังงาน เท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบ บรูคไคท์ และ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ e^- และ h^+ ได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในการนำสารไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูง จะต้องคำนึงถึงดัชนีการหักเหสูง และการกระจายของแสงของผลึกชนิดรูไทล์ เพราะจะมีผลกระทบในตัวกลางจับสารอินทรีย์มากกว่าแบบอนาเทสประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์ และอนาเทส

Property	Anatase	Rutile
โครงสร้างผลึก	ออร์โธโรมบิก	ออร์โธโรมบิก
พลังงานแบนด์แก๊ป (eV)	3.200	3.030
ความแข็ง (Mohs)	5.5 – 6.0	6.0 – 7.0
ความหนาแน่น (g/cm ³)	3.84	4.26
พลังงานอิสระกิบส์ (kcal/mole)	-211.4	-212.6
ค่าคงที่ของแลตทิซ, a (Å)	3.784	4.593
ค่าคงที่ของแลตทิซ, c (Å)	9.515	2.959
จุดหลอมเหลว (°C)	เปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์	1858

ที่มา: ชวิศร์ กรันย์เมธากุล (2549)

สำหรับงานวิจัยนี้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองนี้จะเป็นของบริษัท เฮอร์มัน ภายใต้ชื่อการค้า Degussa P-25 ซึ่งมีรูปผลึกเป็นอนาเทส และรูไทล์ ผสมกันในอัตรา 3:1 มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25

คุณสมบัติ	หน่วย	ไททาเนียมไดออกไซด์ P-25
พื้นที่ผิวเฉพาะ	(m ² /g)	50
ฟิโอส(4% disp. In water)	-	3.5-4.5
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	nm	ประมาณ 21 nm
ปริมาณความชื้น	wt. %	≤ 1.5
สารที่หายไปจากการเผา(%)	wt. %	≤ 2.0
ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์(%)	wt. %	≥ 99.5
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	wt. %	≤ 0.300
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	wt. %	≤ 0.200
เหล็ก (III) ออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	wt. %	≤ 0.010
ไฮโดรคลอริก (HCl)	wt. %	≤ 0.300

ที่มา: Degussa, 2002

2.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process)

2.4.1 ทฤษฎีและหลักการทั่วไป

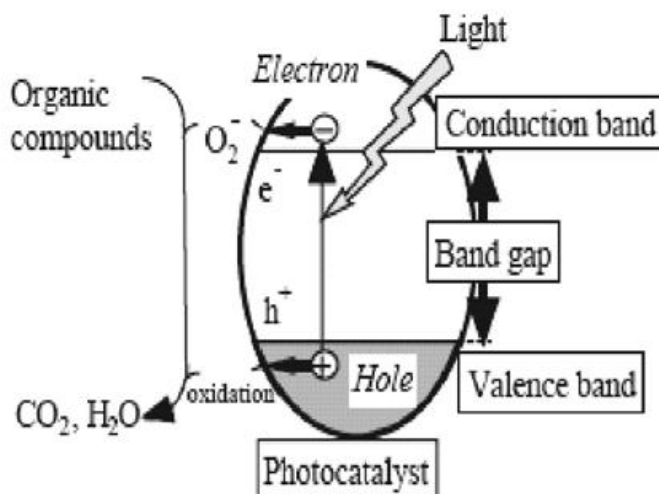
โฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัด หรือทำให้อากาศบริสุทธิ์ทั้งในเรื่องการบำบัดน้ำ และอากาศ หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการดูดติดผิว และการฉายแสง

1. กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Process)

กระบวนการดูดติดผิวถูกพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นกระบวนการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 ได้ค้นพบกระบวนการดูดติดผิวของสารละลาย ซึ่งกระบวนการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี กระบวนการดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของ 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับก๊าซ ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่าสารถูกดูดจับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดจับ เรียก สารดูดจับ (adsorbent) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การดูดติดผิวจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก (ชวิศรี กรณ์ย์เมธากุล, 2549)

2. การฉายแสง (Irradiation)

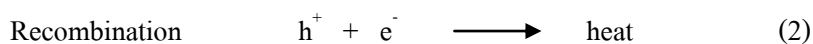
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวคะตะลิสต์ (Catalyst) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งแสงที่ให้แก่ระบบมักเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยตัวคะตะลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา หลักการทำงานของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสออกซิเดชัน คือการให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะ แถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap; E_{bg}) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบการนำไฟฟ้า (conduction band; CB) กับแถบพลังงานที่เต็มแล้ว (Valence band; VB) เมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมีค่าเท่ากับ หรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน ($\text{Band gap} \geq 3.2 \text{ eV}$) แล้วจะมีการสร้างอิเล็กตรอนที่มีประจุ (Electron hole pairs) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน (Photo-oxidation) (Robert and Malato, 2002 อ้างถึงใน กาญจนา ลือพงษ์ และนงนุช ศศิธร , 2553) อธิบายดัง ภาพที่ 2.3 กระบวนการนี้สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูง และไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้กลายเป็นสารประกอบที่มีพิษเพียงเล็กน้อย หรือไม่มี



ภาพที่ 2.3 กระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า

ที่มา: TiPE, 2008

ในสารละลายที่มีสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ดูดซับโฟตอน ($h\nu$) ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นแสดงได้ดังต่อไปนี้

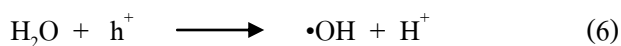


คู่อิเล็กตรอน (e^-) และโพรงอิเล็กตรอน (h^+) หลังจากถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้ว อาจกลับมารวมตัวกันใหม่ได้อย่างรวดเร็วในเวลาเพียงหนึ่งส่วนล้านของหนึ่งวินาที ผลทำให้ได้ความร้อนเกิดขึ้น หรือทั้งสองอาจจับอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่ที่ทั้งอิเล็กตรอน และโพรงอิเล็กตรอนสามารถทำปฏิกิริยากับสปีชีส์อื่นๆ ที่ดูดซับ หรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสารที่มีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor; D) ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา สารนี้จะทำปฏิกิริยากับโพรงอิเล็กตรอน และเกิดกระบวนการออกซิเดชันขึ้น ในทางตรงข้ามถ้าสารที่มีสมบัติรับอิเล็กตรอน (electron acceptor; A) ถูกดูดซับอยู่บนผิว สารนี้จะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน และเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้น แสดงดังสมการที่ (1) – (4)

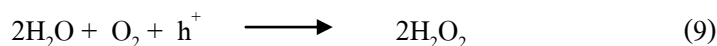
สำหรับกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย มีกลไกทางเคมีที่เป็นไปได้อยู่ 2 กลไกคือ เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสงที่มีพลังงานแสง

มากกว่า หรือเท่ากับพลังงานของช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนคือ 1.การออกซิเดชันโดยตรงกับโพรงอิเล็กตรอน 2.การเกิดกระบวนการออกซิเดชันโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (Ilisz และ Dombi, 1999 อ้างถึงใน พิมพ์สิรินทร์ แดงสระน้อย , 2548) ซึ่งโดยปกติการออกซิไดซ์โดยอนุมูลไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเป็นกลไกหลักในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนิน ส่วนการออกซิเดชันโดยตรงกับโพรงอิเล็กตรอนนั้น โพรงอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ขณะที่กระบวนการออกซิเดชันโดยอนุมูลไฮดรอกซิลนั้น โพรงอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล หรือ โมเลกุลของน้ำที่ดูดซับอยู่ที่ผิวได้เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง อนุมูลไฮดรอกซิลเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และไม่มีภาวะเฉื่อยเฉื่อยในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ โดยจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ

สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการที่ 5-7



การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน และโพรงอิเล็กตรอนนั้นจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่นั้นจะเป็นการขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นการเติมสารที่สามารถกำจัดอิเล็กตรอน เช่น โมเลกุลออกซิเจนจะช่วยให้การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน และโพรงอิเล็กตรอนช้าลง โดยโมเลกุลออกซิเจนสามารถจับกับอิเล็กตรอนให้ออกมาจากโพรงอิเล็กตรอน และออกซิเจนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นไอออนอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical ion; $\text{O}_2\cdot^-$) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลให้สูงขึ้นอีกด้วย แสดงดังสมการที่ (8) – (10) (Litter, 1999 อ้างถึงใน พิมพ์สิรินทร์ แดงสระน้อย, 2548)



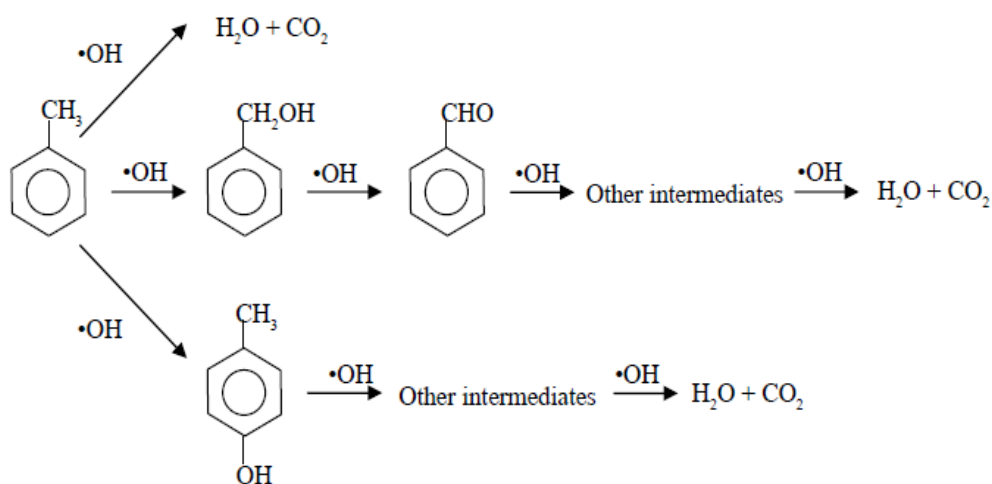
จากที่กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าทั้งโมเลกุลของน้ำ และออกซิเจนเป็นสปีชีส์ที่จำเป็นในกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนิน

2.4.2 การสลายโทลูอินด้วยแสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์

ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมในการสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งกลไกปฏิกิริยาการสลายโทลูอินมีรายละเอียด ดังนี้

(1) กลไกปฏิกิริยาการสลายโทลูอินด้วยแสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

การย่อยสลายสาร โทลูอินด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะมีการก่อรูปของสารมัธยันต์หลายชนิด สารมัธยันต์หลักที่เกิดขึ้นคือ Benzaldehyde (Augugliaro et al., 1999 อ้างถึงในพิสิฐพงษ์ หมั่นประเสริฐดี, 2553) นอกจากนี้ยังมีสารมัธยันต์ที่สำคัญอื่นคือ Benzoic acid, Benzyl alcohol, *p*-Cresol (Minero et al., 1997; Augugliaro et al., 1999; อ้างถึงในพิสิฐพงษ์ หมั่นประเสริฐดี, 2553) ซึ่งกลไกหลักในการสลายโทลูอินเป็นดังรูปที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กลไกปฏิกิริยาการสลายโทลูอินโดยใช้แสง

ที่มา: Negishi et al., 2006

2.4.3 กระบวนการสลายโทลูอิน

ในกระบวนการการสลายโทลูอินโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ เป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) นิยมใช้สองระบบ คือระบบแก๊ส - ของแข็ง และของเหลว - ของแข็ง โดยไททานเนียมไดออกไซด์ จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง และโทลูอินจะอยู่ในสถานะแก๊ส หรือละลายอยู่ในของเหลวซึ่งมักจะเป็นน้ำ การเร่งปฏิกิริยาจะเกิดที่ผิวหน้าระหว่าง

วิฤภาคของโทลูอิน และไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นของแข็ง โทลูอินจะเข้าสัมผัสที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ และเกิดกระบวนการออกซิเดชัน แต่การสลายโทลูอินในสถานะแก๊สจำเป็นต้องเพิ่มความชื้นเข้าไปในระบบ เพื่อให้เป็นแหล่งของอนุมูลไฮดรอกซิลในกระบวนการออกซิเดชัน และช่วยลดการสะสมของสารมัธยันต์บนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ (Einaga et al., 2002 อ้างถึงใน พิสิษฐ์พงษ์ หมั่นประเสริฐดี, 2553) สาเหตุที่มีการศึกษาการสลายโทลูอินในระบบของแก๊สมากกว่าระบบของเหลวเนื่องจากแสงเดินทางในตัวกลางที่เป็นอากาศได้ดีกว่าในน้ำ ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการฉายแสง

2.4.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของไอระเหย

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น (Initial substrate concentration) อุณหภูมิ ปริมาณ และความดันย่อยของออกซิเจน (Volume and Partial Pressure of Oxygen) ความเข้มของแสง (Light Intensity) และความชื้น (Humidity)

(1) ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น

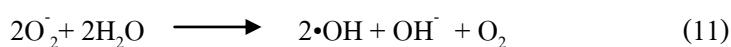
ข้อมูลวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นมีผลต่ออัตราการย่อยสลาย ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำ เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมากขึ้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นด้วย (Ince and Gonenc, 1997 อ้างถึงใน ธรรมศักดิ์ โรจนวีรวิทย์, 2549) แต่ในทางตรงกันข้ามจากการศึกษาของ Gupta (1994) ได้ทดสอบสารพีซีอี (Perchloroethylene, PCE) ผลที่ได้คือประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพีซีอีตั้งต้นสูงขึ้น

(2) อุณหภูมิ

จากข้อมูลทางจลศาสตร์อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ เนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา (Serpone and Pelizzetti, 1989 อ้างถึงใน ธรรมศักดิ์ โรจนวีรวิทย์, 2549) แต่ในกรณีของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในสถานะก๊าซมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดูดติดผิว ส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวลดลง (Satterfield, 1991 อ้างถึงใน ธรรมศักดิ์ โรจนวีรวิทย์, 2549) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลง

(3) ปริมาณและความเข้มข้นของออกซิเจน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดจับ e^-_{cb} ที่แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และด้วยเหตุนี้ ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} โดยออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังแสดงในสมการที่ (11)



(4) ความเข้มของแสง (Light intensity)

เนื่องจากความเข้มของแสง (คือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอนที่มีความถี่ ν มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวน้ำโลหะเป็น E ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \frac{\text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบพลังงานของแสง}}{1 \text{ โฟตอน}} \\ &= \frac{E}{h\nu} \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \frac{\text{ความเข้มแสง}}{h\nu}$$

ซึ่งมีสมมติฐานว่า 1 โฟตอนจะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2533) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน \sim จำนวนโฟตอน \sim ความเข้มของแสง

การที่จะกระตุ้นไททานเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e^-_{cb} และ h^+_{vb} ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จากรายงานการศึกษาของ Ollis และคณะ(1991) ได้สรุปผลของความเข้มแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไว้ว่า

- ที่ระดับความเข้มแสงต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง
- ที่ระดับความเข้มแสงปานกลางอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง

- ที่ระดับความเข้มแสงสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (quantum efficiency of degradation =

สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ และจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง และจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง

2.5 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet ray)

2.5.1 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงแสงที่ตาของมนุษย์จะมองเห็นได้ มีความยาวคลื่น อยู่ในช่วง 100-390 นาโนเมตร สามารถแบ่งชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้เป็น 4 ชนิด (รัฐพนธ์ ทาทอง, 2543) ดังนี้

(1) ช่วงคลื่นยาว หรือ UV-A อยู่ในช่วง 320- 400 นาโนเมตร เป็นรังสีช่วงที่ไม่ทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงผิวโลกเนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ ซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่สามารถดูดกลืนได้น้อยมาก

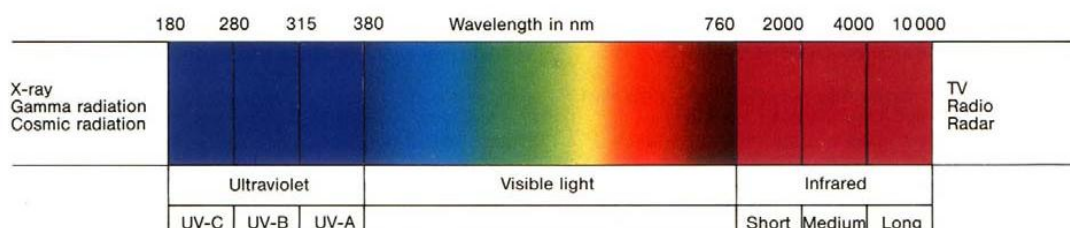
(2) ช่วงคลื่นปานกลาง หรือ UV-B อยู่ในช่วง 280-320 นาโนเมตร รังสีช่วงนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหลายประเภท มีผลต่อร่างกายและสิ่งของ ก่อให้เกิดการไหม้ของผิวหนัง ตาตำ และยังสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านลงมาถึงผิวโลกเนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสามารถดูดกลืนไว้ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

(3) ช่วงคลื่นสั้น หรือ UV-C อยู่ในช่วง 200-280 นาโนเมตร รังสีช่วงนี้เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต แต่ตามปกติจะไม่พบในแสงแดดที่ส่องผ่านมาถึงโลกจะถูกก๊าซโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ดูดกลืนไว้ทั้งหมด

(4) ช่วงคลื่นที่เรียกว่า Vacuum UV ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วงสุญญากาศ ซึ่งจะถูดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง

แสงอาทิตย์จะมีช่วงของความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงยูวี และแสงขาวที่ส่งลงมายังผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศ จากการถูกดูดกลืน และการกระเจิงของแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงผิวโลกน้อย ดังนั้นแสงยูวีที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีจำกัด

Spectrum of electromagnetic radiation



ภาพที่ 2.5 สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: อุดม สิทธิการณ, 2546: ออนไลน์

2.5.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380 – 760 นาโนเมตร (ISO 21348, 2007) เป็นหลอดไฟฟ้าที่จัดได้ว่าเป็นต้นกำเนิดแสงสว่างที่ได้รับความนิยมแพร่หลายมากที่สุด การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ อาศัยพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ไอปรอทที่บรรจุไว้ในก๊าซเฉื่อย เช่น พวการ์กอน คริปตอน หรือนีออนที่มีความดันต่ำ ได้รับการกระตุ้นจากแหล่งปลดปล่อยพลังงานให้ไอปรอทปลดปล่อยพลังงานออกมา แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เปล่งออกมานี้จะกระทบเข้ากับผิวในหลอดแก้วที่ฉาบไว้ด้วยสารเรืองแสงที่เรียกว่าฟอสฟอรัส (Phosphor) หรือ Fluorescent Material ตัวสารเรืองแสงนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ให้กลายมาเป็นแสงสว่างที่ปรากฏแก่สายตาของมนุษย์

2.5.3 หลอดแบล็คไลท์

เป็นหลอดที่เปล่งรังสี คลื่นยาว หรือยูวีเอ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315 – 400 นาโนเมตร (ISO 21348, 2007) ให้สีของแสงเป็นสีน้ำเงินเข้ม ดูดกลืนสีของแสงจากสายตาคนในรับสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นหลอดใช้งานสำหรับสร้างบรรยากาศในสถานเริงรมย์ เช่น บาร์ ไนท์คลับ ดิสโก้เทค ส่วนในทางอุตสาหกรรมและในทางการค้าใช้สำหรับตรวจหาวัตถุ ตรวจหาแร่ ใช้กับงานแผนที่ในการทำเครื่องหมายงานร่างแบบ อีกทั้งหลอดประเภทนี้จะเปล่งคลื่นความถี่ของแสงในระดับที่สายตาของแมลงสามารถรับรู้ได้ดี และชัดเจน ทำให้หลอดประเภทนี้เป็นจุดดึงดูด และต่อแมลงให้เกิดความสนใจ เหมาะกับเครื่องดักแมลง เช่น เครื่องจับยุง หรือใช้แมลงมาล่อให้ติดกับไททานเนียมไดออกไซด์มีพลังงานของแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 eV ดังนั้นในการให้พลังงานแก่ระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสงยูวีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 388 นาโนเมตร จะให้ค่า

พลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของไททานเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นจึงทำให้แสงยูวีเป็นที่น่าสนใจในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสง และเนื่องจากแสงยูวีที่ส่องลงมาถึงพื้นโลกมีปริมาณน้อยมาก จึงต้องมีการใช้หลอดไฟที่ให้แสงยูวีเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงต่อไป

2.6 กระจกกรองควอตซ์

เป็นกระจกกรองควอตซ์ (Quartz Fiber Filter) ที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 10 ไมครอนในบรรยากาศด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูง (High Volume Air Sampler) มีคุณลักษณะเฉพาะ ดังนี้

- (1) กระจกกรองทำจากวัสดุ Pure Quartz หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่า
- (2) กระจกกรองมีขนาด 8 X 10 นิ้ว
- (3) มีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอนได้ไม่น้อยกว่า 99%
- (4) มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.4 มิลลิเมตร
- (5) ไม่มีรอยฉีกขาด ไม่มีรูพรุนและไม่เป็นขุย
- (6) ใช้สำหรับงานเก็บตัวอย่างอากาศด้วยเครื่อง PM-10 High Volume Air Sampler

2.7 กระจกกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter)

เป็นกระจกกรองใยแก้วที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 100 ไมครอนในบรรยากาศด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูง (High Volume Air Sampler) มีคุณลักษณะเฉพาะ ดังนี้

- (1) กระจกกรองทำจากวัสดุ Pure Borosilicate หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่า
- (2) กระจกกรองมีขนาด 8 X 10 นิ้ว
- (3) มีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอนได้ไม่น้อยกว่า 99%
- (4) มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.3 มิลลิเมตร
- (5) ไม่มีรอยฉีกขาด ไม่มีรูพรุนและไม่เป็นขุย
- (6) ใช้สำหรับงานเก็บตัวอย่างอากาศด้วยเครื่อง TSP High Volume Air Sampler

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การเคลื่อนสารไททานเนียมไดออกไซด์

Matsuzawa และคณะ (2008) ศึกษาทดลองเคลื่อนอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนบนพื้นผิวพอลิเมอร์ โดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์

และประจุลบของพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ถูกเคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ และ โพลีไวนิลคลอไรด์ - โพลีไวนิลอะซิเตด (PVC-PVA) จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวพอลิเมอร์ พบการกระจายตัวของอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวพอลิเมอร์อย่างหนาแน่น และสม่ำเสมอ และพอลิเมอร์ดังกล่าวยังสามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้สูงอีกด้วย เนื่องจากการเคลือบด้วยเทคนิคนี้อนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์จะไม่ถูกห่อหุ้มด้วยอนุภาคใดๆ แต่จะถูกเคลือบบนพื้นผิวพอลิเมอร์โดยตรง และจุดเด่นที่สำคัญของการเคลือบด้วยเทคนิคนี้คือ ใช้ระยะเวลาสั้น และต้นทุนต่ำ

2.8.2 ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ loading)

Jo และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัดสารเบนซีน เอทิลเบนซีน และ โอ-เอ็ม-พี-ไซลีนในอากาศ ที่ระดับความเข้มข้นส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่พบในห้องโดยสารรถยนต์ ใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้หลอดไฟแบล็คไลท์กำลังไฟฟ้า 8 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง น้ำหนักไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์มอยู่ที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ศึกษาความขึ้นสัมพันธ์ที่ร้อยละ 10-20 30-40 50-60 และ 70-80 Hydraulic diameter ที่ 5 20 และ 45 มิลลิเมตร อัตราการไหลที่ 0.4 - 3.0 ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อนาที พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยไม่ขึ้นกับค่าความขึ้นสัมพันธ์ แต่ขึ้นกับค่า Hydraulic diameter และอัตราการไหล โดยค่า Hydraulic diameter ที่ 5 มิลลิเมตร และอัตราการไหล 0.4 0.7 และ 1.0 ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยสูงสุด

Taoda และคณะ (2006) ศึกษาการย่อยสลายสารโทลูอิน โดยใช้กระดาศวอลเปเปอร์ขนาด 800 ตารางเซนติเมตร ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ loading) อยู่ที่ 14 กรัมต่อตารางเมตร ทำการเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์ลงบนกระดาศวอลเปเปอร์โดยวิธี Roll Coat ทดสอบในถังปฏิกิริยาขนาด 216 ลิตร ศึกษาการย่อยสลายสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ผลการทดลองพบว่าสารโทลูอินย่อยสลายยาก ใช้เวลาในการกำจัดสารถึง 24 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ และศึกษาการย่อยสลายสารอะซิทัลดีไฮด์ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้หลอดยูวี ความเข้มแสงยูวี 1,000 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 30 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าสารอะซิทัลดีไฮด์ถูกย่อยสลายจนความเข้มข้นเป็นศูนย์ภายในเวลา 4 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ

2.8.3 การปรับปรุงการดูดกลืนแสงของไททาเนียมไดออกไซด์

Nonami และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพของสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์/ไททาเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนเซรามิกไฟเบอร์ในการกำจัดสารอะซิโตนัลดีไฮด์ความเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเซรามิกไฟเบอร์ เซรามิกไฟเบอร์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ และเซรามิกไฟเบอร์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์/เฮพาไทด์ พบว่าเซรามิกไฟเบอร์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์/เฮพาไทด์ในที่มีความสามารถดูดซับสารได้มากถึง 100 ส่วนในล้านส่วน แสดงให้เห็นว่าเฮพาไทด์สามารถดูดซับสารอะซิโตนัลดีไฮด์ได้ดี ในทางตรงกันข้ามเซรามิกไฟเบอร์และเซรามิกไฟเบอร์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์แทบจะไม่เกิดปฏิกิริยาการดูดซับเลย

Ozeki และคณะ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์/ไททาเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนแผ่นกระจกในการกำจัดสารฟอร์มัลดีไฮด์ และเชื้อแบคทีเรียอีโคไลโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ใช้ความเข้มแสงยูวี 1.7 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากหลอดแบล็คไลท์กำลังไฟฟ้า 15 วัตต์ ถึงปฏิกิริยาขนาด 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทดลองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์/ไททาเนียมไดออกไซด์ มีอัตราการย่อยสลายสารฟอร์มัลดีไฮด์สูงกว่าไททาเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์ช่วยเพิ่มการดูดซับสาร ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงข้ามสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์ไม่ส่งผลในการย่อยสลายเชื้ออีโคไล พบว่าสารไททาเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายเชื้ออีโคไลได้ดีกว่าสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์/ไททาเนียมไดออกไซด์

Liu และ คณะ (2011) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการย่อยสลายสารอะซิโตนของคะตะลิสต์ชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์ และในโตรเจนทำการทดลองภายใต้แสงที่มองเห็นได้ พบว่าความเข้มข้นของสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์ที่เหมาะสมในการทดลองอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถเกิด ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่สุทธค่าคงที่ปฏิกิริยาอยู่ที่ 0.077 นาที^{-1} ซึ่งสารไฮดรอกซีเฮพาไทด์จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารอะซิโตน และเกิดการย่อยสลายสารด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการเติมในโตรเจนลงไปส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานแคบลง ทำให้ตัวคะตะลิสต์ถูกกระตุ้นได้ง่ายเมื่อได้รับแสงที่มองเห็นได้ (Visible Light)

2.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

Ichiura และคณะ (2003) ทำการ ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นไททาเนียมไดออกไซด์ / ซีโอไลต์ ในการกำจัดสารโทลูอิน ความเข้มข้น 12.5 ส่วนในล้านส่วน และฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 40 ส่วนในล้านส่วน ใช้หลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 4 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง เวลากำจัดสารที่ 120 นาที โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นกับอัตราส่วนของไททาเนียมไดออกไซด์/ซีโอไลต์ สำหรับอัตราส่วนที่ใช้คือ 2:1 1:4 และ 1:12 จากผลการทดลองพบว่า

ในการกำจัดโกลูอิน อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์/ซีโอไลต์ ที่ 1:4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด สามารถกำจัดโกลูอินจนความเข้มข้นเป็นศูนย์ได้หลังจากเวลาผ่านไป 50 นาที ส่วนในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์/ซีโอไลต์ในทุกอัตราส่วน สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์จนความเข้มข้นเป็นศูนย์ได้ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซีโอไลต์ สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้มากกว่าโกลูอิน และแผ่นไททานเนียมไดออกไซด์ / ซีโอไลต์นี้สามารถย่อยสลายสารมลพิษได้หลายครั้งหลังจากมีการเพิ่มประจุเข้าไปใหม่

Zhao และ Yang (2003) ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหย ในสภาวะอากาศภายใน อาคาร โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ความชื้น ความเข้มแสง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อน

Ao และคณะ (2004) ศึกษาการย่อยสลายสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 200 ส่วนในพันล้านส่วน ร่วมกับสารมลพิษที่พบในสิ่งแวดล้อม โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบบนกระดาษกรองใยแก้ว โดยใช้หลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 8 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง พบว่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับระหว่างกระดาษกรองใยแก้ว และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์มีค่าต่างกันเล็กน้อยที่ 51 และ 46 ส่วนในพันล้านส่วน ตามลำดับ เมื่อฉายแสงยูวี 120 นาที ความเข้มข้นสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ที่ 52 และ 44 ส่วนในพันล้านส่วน ตามลำดับ สรุปได้ว่าไม่มีการย่อยสลายด้วยแสงบนกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์

Guan (2005) ศึกษาการเติมซิลิกอนไดออกไซด์ปริมาณต่างๆลงในไททานเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีโซล-เจล แผ่นแก้วซิลิเกตถูกนำมาใช้เป็นแผ่นรองรับไททานเนียมไดออกไซด์ ในการกำจัดกรดอะซิติกโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ใช้หลอดแบล็คไลท์กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ ความเข้มแสงยูวี 0.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ 10-20 เปอร์เซ็นต์โมล เป็นสภาวะที่เหมาะสม ทำให้การย่อยสลายกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ที่ 30-40 เปอร์เซ็นต์โมล การย่อยสลายกรดอะซิติกลดลง มีค่าการย่อยสลายสารอินทรีย์เทียบเท่ากับแผ่นแก้วซิลิเกตที่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว จากการทดลองพบว่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความเป็นกรด ทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลเพิ่มขึ้น มีผลต่อคุณสมบัติความชอบน้ำ ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวที่ช่วยในการดูดซับได้ดี และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นในระหว่างที่มีการฉายรังสียูวี ซึ่งจะช่วยให้การย่อยสลายสารอินทรีย์

Tsoukleris และคณะ (2007) ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสารเบนซิน โกลูอิน โอ-เอ็ม-พี-ซีลิน โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เคลือบบนเม็ดแก้ว โดยทำการศึกษาอัตราการ

เกิดปฏิกิริยาของความเข้มแสงที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้น โดยใช้หลอดยูวี -เอ 2 หลอดมีอัตราการกำจัดสารเบนซิน และโทลูอินอยู่ที่ 0.0429 และ 0.1960 ไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนหลอดยูวี -เอ 4 หลอด อัตราการกำจัดสารเบนซิน และโทลูอินอยู่ที่ 0.6775 และ 1.5301 ไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และจากการทดลอง พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถนำมาใช้ในการทดลองต่อเนื่องกันได้ถึง 30 ครั้งโดยไม่ทำให้ความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง

Demeestere และคณะ (2008) ศึกษา การกำจัด สาร โทลูอิน ในอากาศ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เคลือบลงบน วัสดุก่อสร้าง 2 ชนิด คือแผ่นกระเบื้องโดยแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือแผ่นกระเบื้องเซรามิก Siliconates (RT-REF) แผ่นกระเบื้องเซรามิก Siliconates เคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์ S5-300B 1 ชั้น (RT-RDS-1) แผ่นกระเบื้องเซรามิก Siliconates เคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์ S5-300B 2 ชั้น (RT-RDS-2) แผ่นกระเบื้องเซรามิก Siliconates เคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์ Micronization S5-300B 2 ชั้น (RT-MD-2) และแผ่นลูกฟูกที่เคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์ S5-300B 2 ชั้น (CS-2) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 47 ความเข้มแสงยูวี 2.34 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นโทลูอินเริ่มต้นอยู่ในช่วง 17-35 ส่วนในพันล้านส่วน พบว่า RT-RDS-2 และ RT-MD-2 มีอัตราการกำจัดสารโทลูอินสูงสุด คือ 438 ± 14 และ 512 ± 12 ไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์มากที่สุด ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการศึกษานี้คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอินต่ำลง เนื่องจากทำให้โมเลกุลน้ำ ไปแย่งพื้นที่ในการดูดซับสารโทลูอิน

Rezaee และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัดโทลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ทำการทดลองโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่ออัตราการย่อยสลายสารโทลูอิน ใช้หลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 4 และ 8 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง และระยะห่างของหลอดยูวีที่ 1 5 10 และ 20 เซนติเมตร พบว่าอัตราการย่อยสลายสารโทลูอินเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้น โดยหลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 8 วัตต์ และระยะห่างของหลอดที่ 1 เซนติเมตรสามารถกำจัดสารโทลูอินได้ถึง 98 เปอร์เซ็นต์

Sung และคณะ (2010) ทำการศึกษาดังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยทำการออกแบบถึงปฏิกิริยา รูปทรงสามเหลี่ยม มีหลอด UVA เป็นแหล่งกำเนิดแสง จากผลการทดลองพบว่าถึงปฏิกิริยาที่มีอุปกรณ์กีดขวางบริเวณตรงกลางของช่องทางเข้า-ออก ช่วยเพิ่มการหมุนเวียนของอากาศภายในถัง ทำให้แผ่นโฟโตคะตะไลซิสสัมผัสกับอากาศที่มีสารอะซิโตนไดไฮไดรด์ได้ดี ส่งผลต่อ

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอะซิโตนไฮโดรเจนไดออกไซด์ โดยถึงปฏิกิริยาที่คิดอุปกรณ์ที่คิดวางบริเวณตรงกลางสามารถกำจัดสารอะซิโตนไฮโดรเจนไดออกไซด์ได้สูงกว่าถึงปฏิกิริยาที่มีสิ่งกีดขวางบริเวณขอบถึง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และ สารประกอบอินทรีย์ระเหยในอากาศของประเทศไทย

ชวิศร์กรณย์เมธากุล (2549) ศึกษาไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปผลึกอนาเทส โดยการปรับแต่งพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี doping ด้วยอะตอมของธาตุซัลเฟอร์จากไทโอยูเรีย โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ กับไทโอยูเรีย 1:4 และเผาที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพัฒนาประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์คะตะลิสต์โดยใช้การดูดซับด้วยไอออนของโลหะทรานซิชันได้แก่ Fe^{3+} , Cr^{3+} และ V^{3+} ซึ่งไอออนเหล่านี้จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอนของไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ จากการทดลองพบว่าอะตอมของธาตุซัลเฟอร์สามารถเลื่อนแถบการดูดกลืนแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ให้เข้ามาอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่สูงขึ้นทำให้การดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลมีประสิทธิภาพมากขึ้น และคะตะลิสต์ที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการสลายเมทิลีนบลู พบว่า S-doped TiO_2 ที่ปรับแต่งผิวด้วย V^{3+} ร้อยละ 2.84 สามารถทำให้เกิดการสลายตัวของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงสุด 95.25 เปอร์เซ็นต์

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ (2549) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไอ สารโทลูอิน และอะซิโตนโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน เติระบบแบบที่ละเท ใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV Incandescent Blacklight และ UV High Pressure Mercury Vapour ช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร ความเข้มแสง 165.7 193.3 และ 1230.0 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัย 46 และ 56 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอินในกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน มีค่าน้อยกว่าอะซิโตน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของสารประกอบที่แตกต่างกัน สภาพความชื้นที่แตกต่างกัน ความสามารถในการดูดซับบนผิวดั้วเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดโทลูอิน และอะซิโตน ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส

เทียนฉาย สติรวิวงศ์ (2554) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 10 15 และ 20 ส่วนในล้านส่วน โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เติระบบการทดลองแบบที่ละเท ใช้ถึงปฏิกิริยาขนาด 0.03 ลูกบาศก์เมตร ระยะเวลาพักพักสารสูงสุด 180 นาที ใช้แผ่นฟอกอากาศขนาด

0.15 ตารางเมตร ใช้แหล่งกำเนิด แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 0 0.2 และ 2.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสง จากหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 100 และ 200 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด สารเพิ่มขึ้นตามเวลาการทดลอง โดยประสิทธิภาพการกำจัดจะ เกิดรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ ลดน้อยลงจนกระทั่งมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ พบว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ ความเข้มแสงยูวี 0.2 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นความเข้มแสงยูวีที่มีประสิทธิภาพการกำจัด สารโกลูอิน มากที่สุด สามารถกำจัดสารโกลูอิน ความเข้มข้น 5 10 15 และ 20 ส่วนในล้านส่วน คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดที่ 70.96 57.73 66.64 และ 55.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนหลอดแบล็คไลท์ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสารใกล้เคียงกันทุก ความเข้มแสง โดยความเข้มแสงยูวี 100 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กำจัดสารโกลูอินความเข้มข้น 5 10 15 และ 20 ส่วนในล้านส่วน คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดที่ 45.82 49.52 55.24 และ 46.24 % ตามลำดับ และความเข้มแสงยูวี 200 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กำจัดสารโกลูอินความเข้มข้น 5 10 15 และ 20 ส่วนในล้านส่วน คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดที่ 34.06 49.39 56.98 และ 52.10% ตามลำดับ

จากการศึกษาที่ผ่านมาดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าได้มีการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งมีข้อมูลที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้ สรุปได้ดังนี้

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส คือ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสงยูวี การหมุนเวียนของอากาศภายในถัง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อน และเทคนิคการเคลือบสาร โททานเนียมไดออกไซด์มีหลายวิธี ได้แก่ Dip Coat และ Roll Coating และปริมาณ TiO_2 loading ที่ใช้มีค่าอยู่ในช่วง 5 – 14 กรัมต่อตารางเมตร

ตารางที่ 2.6 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้ทำการวิจัย	สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษ	ความเข้มแสง	ปริมาณ TiO ₂	ชนิดตัวกลาง	เวลาดำจัดสาร (นาที)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
Ao และคณะ (2004)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	200 ppb	0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	น้ำหนักบน	- กระดาษกรองใยแก้ว	120	74.5
			750 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	กระดาษกรอง			77
			0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	หลังเคลือบ	- กระดาษกรองใยแก้ว		74
			750 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	1.64 g	เคลือบ TiO ₂		78
Taoda และคณะ (2006)	โทลูอินอะซิทิลดีไฮด์	1 ppm	-	TiO ₂ loading	- Cotton paper	1440	90
		100 ppm	30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	14 g/m ²		1200	100
			1000 mW/cm ²			240	100
Demeestere และคณะ (2008)	โทลูอิน	17 -35 ppb	2.34 mW/cm ²	12.1 mg/cm ²	- กระเบื้องเซรามิก TiO ₂ 1 ชั้น	360	28.2±2.1
				46.4 mg/cm ²	- กระเบื้องเซรามิก TiO ₂ 2 ชั้น	360	58.4±1.9
				45.4 mg/cm ²	- กระเบื้องเซรามิก TiO ₂ Micronization 2 ชั้น	360	62.9±1.5
				22.2 mg/cm ²	- แผ่นลูกฟูกเคลือบ TiO ₂	360	22.7±2.9

ตารางที่ 2.6 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้ทำการวิจัย	สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษ	ความเข้มแสง	ปริมาณ TiO ₂	ชนิดตัวกลาง	เวลาดำจัดสาร (นาที)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
เทียนฉาย (2554)	โทลูอิน	5 ppm	0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	nd.	แผ่นฟอกอากาศซิเซนแอโรกลิน	180	48.52
			0.2 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$				70.96
			2.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$				52.83
			100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$				45.82
			200 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$				34.06
			10 ppm				0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
		0.2 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	61.81				
		2.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	57.73				
		100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	49.52				
		200 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	49.39				

หมายเหตุ: nd. = no data

บทที่ 3

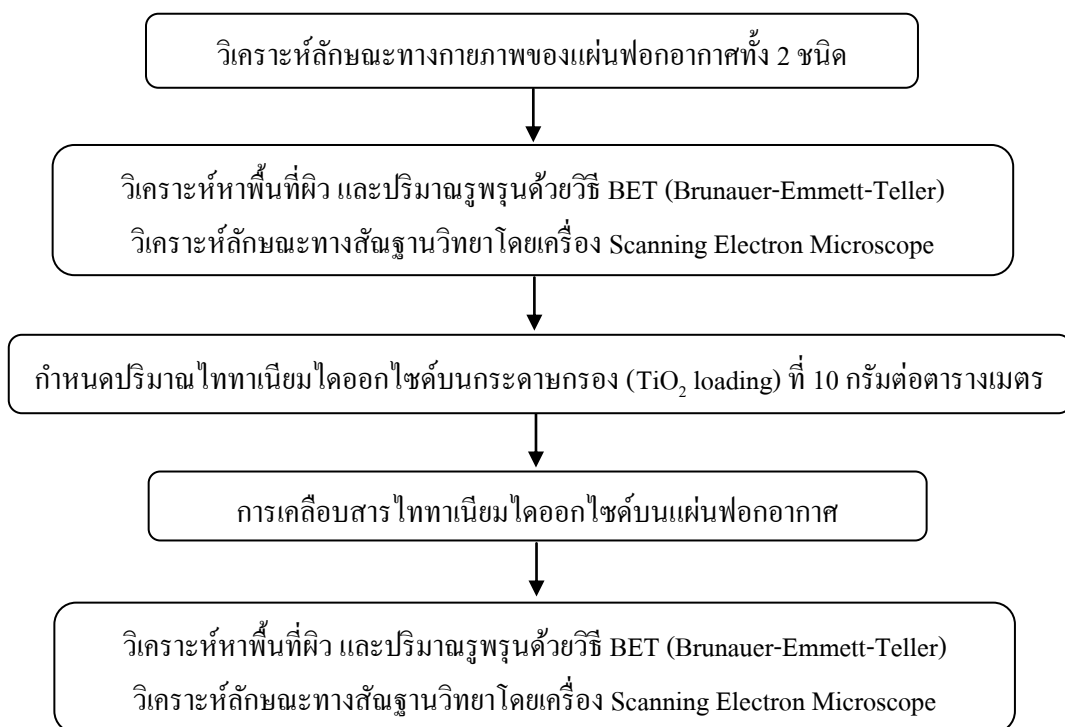
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ 2 ชนิด คือ กระจกกรองควอตซ์ (Quartz Fiber Filter) และกระจกกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) ในการกำจัดสารโพลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

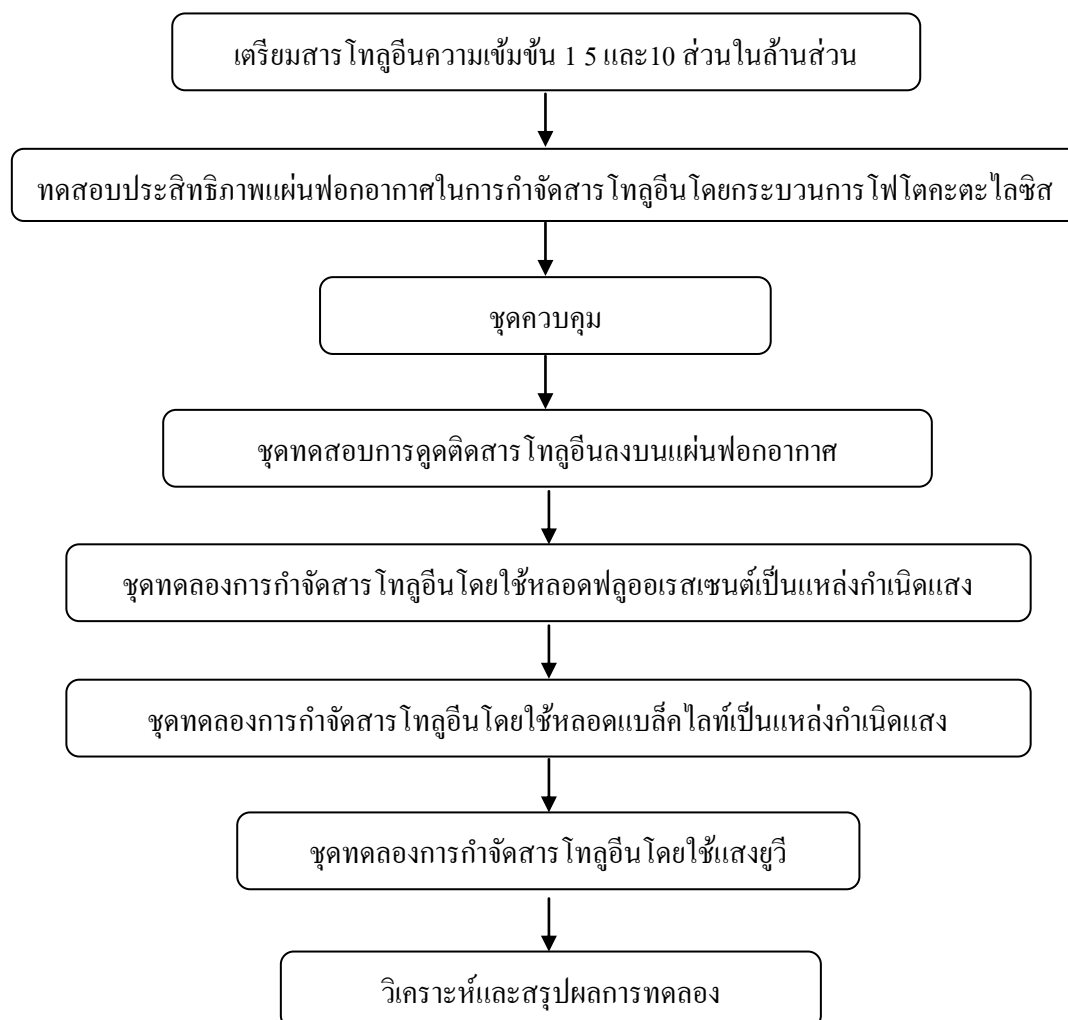
- (1) การทดลองที่ 1 เคลือบสารไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศด้วยวิธี Dip Coat
- (2) การทดลองที่ 2 ทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด ในการกำจัดสารโพลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การทดลองที่ 1



ภาพที่ 3.1 แผนการวิจัย

(2) การทดลองที่ 2

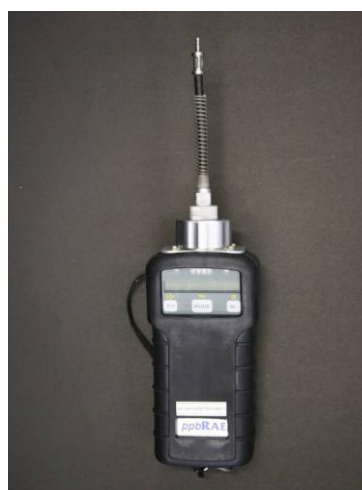


ภาพที่ 3.1 แผนการวิจัย (ต่อ)

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- (1) บั๊มลม (Vacuum Pump)
- (2) เครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยแบบพกพา ppbRAE: พิสัยการวัด 0 - 9999 ส่วนในพันล้านส่วน
- (3) เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้น Qtrak model 7556 Infrared (NDIR)/CO₂)
- (4) เครื่องวัดความเข้มแสงยูวี (Radiometer): ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พิสัยการวัด 0 - 350 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

- (5) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp): กำลังไฟฟ้า 6 วัตต์จำนวน 3 หลอด
- (6) หลอดแบล็คไลท์ (Blacklight Lamp): กำลังไฟฟ้า 6 วัตต์ จำนวน 3 หลอด
- (7) กระจายกรองควอตซ์ (Quartz Fiber; Whatman): ขนาด 8 x 10 นิ้ว
- (8) กระจายกรองใยแก้ว (Glass Fiber; Adventage): ขนาด 8 x 10 นิ้ว
- (9) เครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer)
- (10) ไมโครไซริง (Microsyringe): ขนาด 10 ไมโครลิตร
- (11) ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven; Memmert)
- (12) เครื่องซังสารเคมี
- (13) อุปกรณ์เครื่องแก้ว



ภาพที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยแบบพกพา ppbRAE



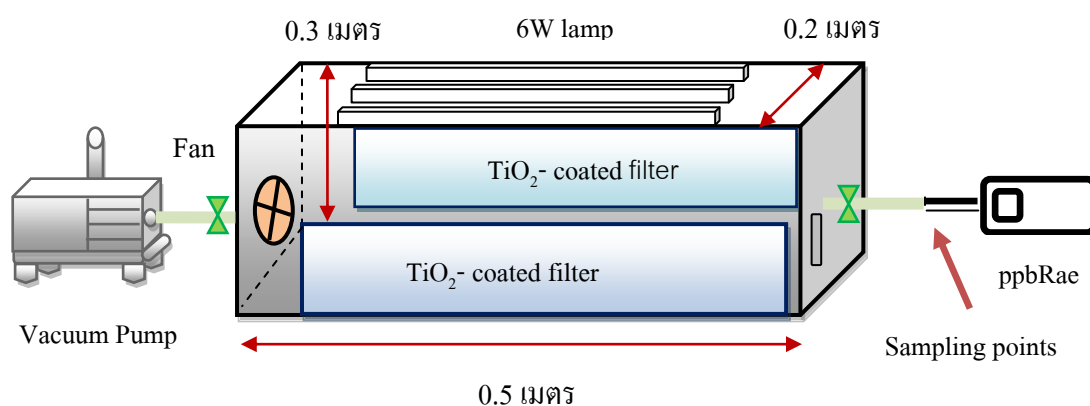
ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความเข้มแสงยูวี



ภาพที่ 3.4 เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นแบบพกพา

3.3 ถังปฏิริยา

ถังปฏิริยาทำจากแผ่นพลาสติกอะคริลิก รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.5 เมตร สูง 0.3 เมตร ปริมาตร 0.03 ลูกบาศก์เมตร (เทียบฉาย สถิรภิงศ์, 2554) ภายในถังปฏิริยาทำการติดตั้งชุดแหล่งกำเนิดแสงบริเวณด้านบนของถังปฏิริยาจำนวน 3 หลอด ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์ ติดตั้งพัดลม บริเวณด้านข้างของถังปฏิริยา เพื่อช่วยในการกวนผสมของสารโทลูอิน ติดตั้งแผ่นฟอกอากาศขนาด 0.156 ตารางเมตร บริเวณผนังด้านข้าง และด้านล่างของถังปฏิริยา บริเวณด้านซ้ายของถังปฏิริยามีปั๊มลมใช้สำหรับ ไล่ก๊าซออก จากถังปฏิริยาก่อนเริ่มทำการทดลอง และจุดเก็บตัวอย่างสาร โทลูอินจะอยู่บริเวณทางออกด้านขวาของถังปฏิริยา โดยรายละเอียดของถังปฏิริยาในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ถังปฏิริยาแบบที่ละเท



(ก) ลักษณะภายในถังปฏิกิริยา



(ข) ลักษณะภายนอกถังปฏิกิริยา

ภาพที่ 3.5 ถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท (ต่อ)

3.4 สารเคมี

- (1) สารละลายโทลูอีน (Toluene; Panreac) ความบริสุทธิ์ 99.5 %
- (2) ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) Degussa P-25
- (3) Dispersing agent Duramex D30005
- (4) สารละลายเอทานอล (Ethanol Adsolute)

3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.5.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ

วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด จาก ภาพถ่าย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ก่อนและหลังเคลือบสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ อาศัยหลักการสร้างภาพจาก แหล่งกำเนิด คลื่นซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกัน (คณัย กิจชัยบุญกุล , 2547) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศหลังเคลือบสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์

วิเคราะห์ พื้นผิว และปริมาตรรูพรุน โดยเครื่อง Surface Area Analyzer ใช้หลักการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET Method) หาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และน้ำหนักสารที่ถูกดูดซับไว้ (ชวิศร์ ทรัพย์เมธากุล, 2549)

3.5.2 วิธีเคลือบสารไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศ

จากการศึกษาของ Taoda (2006) ทดลองศึกษาการกำจัดสารแอมโมเนียในอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะไลซิส กำหนดปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 loading) ที่ 14 กรัมต่อตารางเมตร งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองหาค่าความเข้มข้นสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ 1- 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อนำมาใช้ในการทดลอง พบว่าปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์บนกระดาษกรองทั้ง 2 ชนิดหลังผ่านการอบแห้งหลุดล่อน เนื่องจากมีปริมาณสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป การทดลองนี้จึงกำหนดปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 10 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นค่า TiO_2 loading ที่เหมาะสมไม่หลุดล่อนเมื่อผ่านการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่ากระดาษกรองควอตซ์ใช้ความเข้มข้นที่ 2.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และกระดาษกรองใยแก้วใช้ความเข้มข้นที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ให้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศเท่ากับที่ 10 กรัมต่อตารางเมตร โดยมีวิธีการเตรียมสารและวิธีเคลือบสารไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศด้วยวิธี Dip Coat ดังนี้

(1) เตรียมสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิลิตร โดยนำผงไททาเนียมไดออกไซด์ 28 กรัม และสาร Dispersing agent Duramex (D30005) 0.28 กรัม ผสมกันในบีกเกอร์ ปรับปริมาตรด้วยสารละลายเอทานอลจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนผสมสารทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น 2.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรสำหรับกระดาษกรองควอตซ์

(2) นำกระดาษกรอง ควอตซ์อบไล่ความชื้นที่เตาอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดาษกรองควอตซ์ไปชั่งน้ำหนักก่อนทำการจุ่มเคลือบสารแขวนลอย ไททาเนียมไดออกไซด์

(3) นำกระดาษกรอง ควอตซ์ไปจุ่มเคลือบในสาร แขวนลอย ไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 2.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระดาษกรองขึ้นมาพักไว้ประมาณ 10 นาที ก่อนนำไปอบแห้งที่เตาอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

(4) นำกระดาษกรองควอตซ์ที่ผ่านการอบแห้งไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อคำนวณหาปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ loading) บนกระดาษกรอง จากสูตร

TiO₂ loading (กรัมต่อตารางเมตร)=

$$\frac{\text{น้ำหนักกระดาษกรองหลังเคลือบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเคลือบ (กรัม)}}{\text{พื้นที่ผิวกระดาษกรอง (ตารางเมตร)}}$$

3.5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศ

3.5.3.1 วิธีเตรียมสารโทลูอิน

จากการทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารโทลูอิน โดยใช้ไมโครไซริงในการตวงสารโทลูอิน พบว่าความเข้มข้นสารโทลูอินที่ 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ใช้ปริมาณความเข้มข้นสารโทลูอินที่ 0.3 0.8 และ 1.5 ไมโครลิตร ตามลำดับ

3.5.3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นด้วยการป้อนสารโทลูอินด้วยไมโครไซริงบริเวณกลางถึงปฏิกิริยา จากนั้นทำการเปิดพัดลมเพื่อช่วยในการกวนผสมสาร โทลูอิน รอให้สารผสมกันดีทั่วทั้งถัง ประมาณ 10 นาที จะได้ค่าความเข้มข้นสารโทลูอินที่ใช้ในการทดลอง (1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน) จากนั้นทำการเปิดหลอดไฟเพื่อเริ่มกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ทำการวัดค่าความเข้มข้นสารโทลูอินด้วยเครื่องวัดสารอินทรีย์ระเหย ppbRae บริเวณจุดเก็บตัวอย่าง ที่เวลาต่างๆกัน คือ 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 และ 180 นาที และ ทำการวัดอุณหภูมิ และความชื้นภายในถัง ปฏิกิริยาก่อน และหลังการทดลองทุกครั้งด้วยเครื่อง ตรวจวัด อุณหภูมิ และความชื้น แบบพกพา อุณหภูมิที่ใช้ ในการทดลอง อยู่ที่ 25±2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50–70 เปอร์เซ็นต์

3.5.3.3 ชุดควบคุม

ในการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์ และกระดาศกรองใยแก้วไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ โดยทำการเก็บตัวอย่างสารที่เวลาต่างๆกัน คือ 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180 นาที

3.5.3.4 ชุดทดสอบการดูดติดสารโทลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ

ในการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์ และกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ โดยทำการเก็บตัวอย่างสารที่เวลาต่างๆกัน คือ 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180 นาที

3.5.3.5 ชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

การกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์ และกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ โดยทำการเก็บตัวอย่างสารที่เวลาต่างๆกัน คือ 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180 นาที

3.5.3.6 ชุดทดสอบการกำจัดสารโทลูอินโดยใช้แสงยูวี

ในการทดลอง สารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ และมีแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ โดยทำการเก็บตัวอย่างสารที่เวลาต่างๆกัน คือ 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180 นาที

3.6 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองชุดควบคุม

แผ่นฟอกอากาศ	ความเข้มข้นสาร โทลูอิน (ppm)	แหล่งกำเนิดแสง	ความเข้มแสงยูวี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
กระดาษกรองควอตซ์ไม่ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	1.5 และ 10	-	0
กระดาษกรองใยแก้วไม่เคลือบ ไททานเนียมไดออกไซด์	1.5 และ 10	-	0

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองชุดทดสอบการดูดซับสารโทลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ

แผ่นฟอกอากาศ	ความเข้มข้นสาร โทลูอิน (ppm)	แหล่งกำเนิดแสง	ความเข้มแสงยูวี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
กระดาษกรองควอตซ์เคลือบ ไททานเนียมไดออกไซด์	1.5 และ 10	-	0
กระดาษกรองใยแก้วเคลือบ ไททานเนียมไดออกไซด์	1.5 และ 10	-	0

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

แผ่นฟอกอากาศ	ความเข้มข้นสาร โทลูอิน (ppm)	แหล่งกำเนิดแสง	ความเข้มแสงยูวี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
กระดาษกรองควอตซ์เคลือบ ไททานเนียมไดออกไซด์	1.5 และ 10	หลอดฟลูออเรสเซนต์	0.6 1.5 และ 2.1
		หลอดแบล็คไลท์	52 124 และ 187
กระดาษกรองใยแก้วเคลือบ ไททานเนียมไดออกไซด์	1.5 และ 10	หลอดฟลูออเรสเซนต์	0.6 1.5 และ 2.1
		หลอดแบล็คไลท์	52 124 และ 187

ตารางที่ 3.4 แผนการทดลองชุดทดสอบการกำจัดสารโทลูอินโดยใช้แสงยูวี

แผ่นฟอกอากาศ	ความเข้มข้นสารโทลูอิน (ppm)	แหล่งกำเนิดแสง	ความเข้มแสงยูวี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ	5	หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดแบล็คไลท์	2.1 187
กระดาษกรองควอตซ์ไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	5	หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดแบล็คไลท์	2.1 187
กระดาษกรองใยแก้วไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	5	หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดแบล็คไลท์	2.1 187

3.7 ตัวแปรในการทดลอง

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง และช่วงค่าแปรผัน

พารามิเตอร์	ช่วงค่าแปรผัน
ชนิดของแผ่นฟอกอากาศ	กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์
ความเข้มข้นสารโทลูอิน (ppm)	1 5 และ 10
แหล่งกำเนิดแสง	หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแบล็คไลท์
เวลาเก็บตัวอย่าง (min)	10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180
ความเข้มแสง ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	
- หลอดฟลูออเรสเซนต์	0.6 1.5 และ 2.1
- หลอดแบล็คไลท์	52 124 และ 187

3.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด

(1) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด จากสูตร

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอิน (\%)} = \left[1 - \left(\frac{C}{C_0} \right) \times 100 \right]$$

C_0 = ความเข้มข้นโทลูอินขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)

C = ความเข้มข้นโทลูอินขาออก (ส่วนในล้านส่วน)

ค่าคงที่ปฏิกิริยา (k : min^{-1})

$$-\ln \frac{C}{C_0} = kt \quad : \text{slope} = k$$

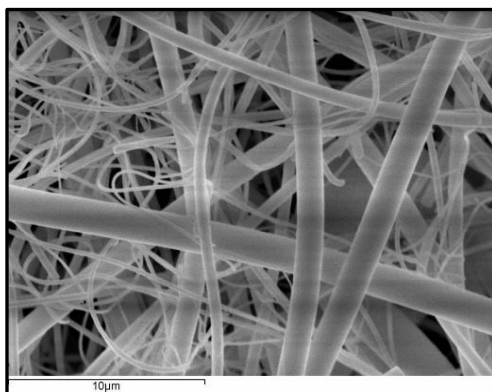
บทที่ 4

ผลการศึกษา

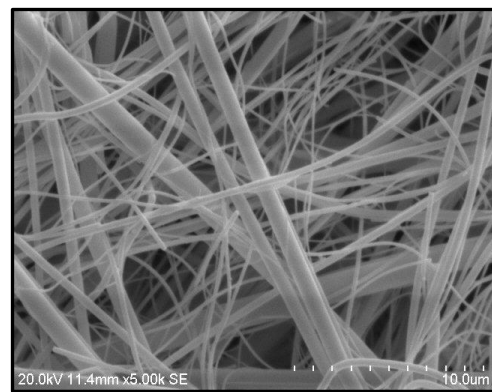
4.1 การเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศด้วยวิธี Dip Coat

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไททานเนียมไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพ ของกระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วก่อนเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของกระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วมีลักษณะทางกายภาพคล้ายกัน มีเส้นใยจำนวนมากไขว้กันไปมา ส่งผลให้เมื่อทำการเคลือบ สารไททานเนียมไดออกไซด์อนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์กระจายตัวปกคลุมเส้นใยของกระดาษกรองทั้ง 2 ชนิด อย่างหนาแน่นทั่วทั้งแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งการที่มีอนุภาคสารไททานเนียมไดออกไซด์ยึดเกาะบนผิวกระดาษกรองจำนวนมาก และกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นกระดาษกรอง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถเกิดได้ดียิ่งขึ้น ความสามารถในการกำจัดสารโพลูอินก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

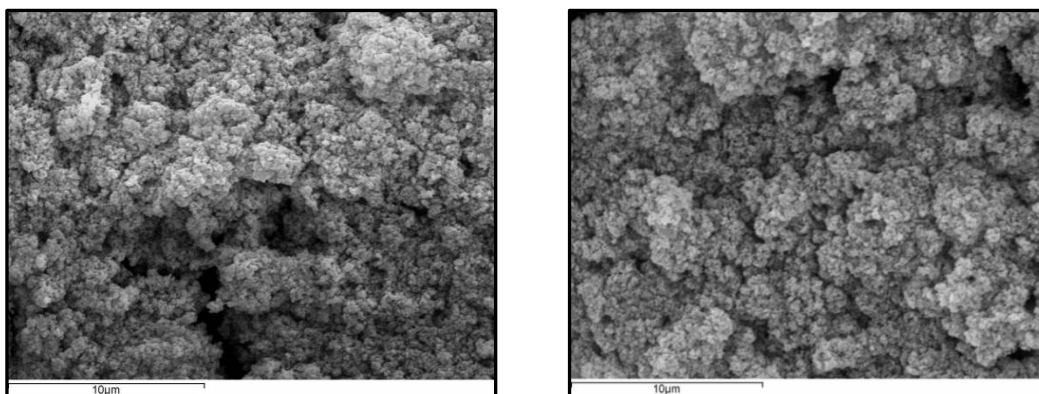


(ก) กระดาษกรองควอตซ์



(ข) กระดาษกรองใยแก้ว

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายของแผ่นฟอกอากาศก่อนเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 5,000 เท่า



(ก) ทรายกรองควอตซ์

(ข) ทรายกรองใยแก้ว

ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายของแผ่นฟอกอากาศหลังเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์
จากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 5,000 เท่า

4.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นฟอกอากาศ

พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) เป็นตัวแปรที่ชี้วัดการดูดซับสารโพลูอินในอากาศ ถ้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะส่งผลให้ไอสารโพลูอินถูกดูดซับลงบนพื้นผิวแผ่นฟอกอากาศได้มากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดได้ดียิ่งขึ้น จากตารางที่ 4.1 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นฟอกอากาศ พบว่าเมื่อเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศ มีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น เนื่องจากแผ่นฟอกอากาศมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์เข้าไปปกคลุมจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ ทรายกรองควอตซ์ และ ทรายกรองใยแก้ว ก่อนเคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 5.58 และ 6.46 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของ ทรายกรองควอตซ์ และทรายกรองใยแก้ว เคลือบสารไททานเนียมไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 17.73 และ 19.64 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ของแผ่นฟอกอากาศ

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
ทรายกรองควอตซ์	5.58
ทรายกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	17.73
ทรายกรองใยแก้ว	6.46
ทรายกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์	19.64

4.1.3 ปริมาณสารไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟอกอากาศ

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด จำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 loading) บนแผ่นฟอกอากาศให้เท่ากัน พบว่าปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 10 กรัมต่อตารางเมตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมกับแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด โดยกระดาษกรองควอตซ์และกระดาษกรองใยแก้ว ใช้ปริมาณความเข้มข้น สารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ 2.8 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า กระดาษกรองควอตซ์ ใช้ความเข้มข้น สารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ น้อยกว่ากระดาษกรองใยแก้ว เนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะของกระดาษกรองควอตซ์ที่มีความหนา ~ 0.4 มิลลิเมตร มากกว่ากระดาษกรองใยแก้วที่มีความหนา ~ 0.3 มิลลิเมตร จึงทำให้กระดาษกรอง ควอตซ์ดูดซับสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ได้มากกว่า ส่งผลให้ใช้เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์น้อยกว่ากระดาษกรองใยแก้ว แต่ให้ปริมาณ TiO_2 loading ที่เท่ากัน

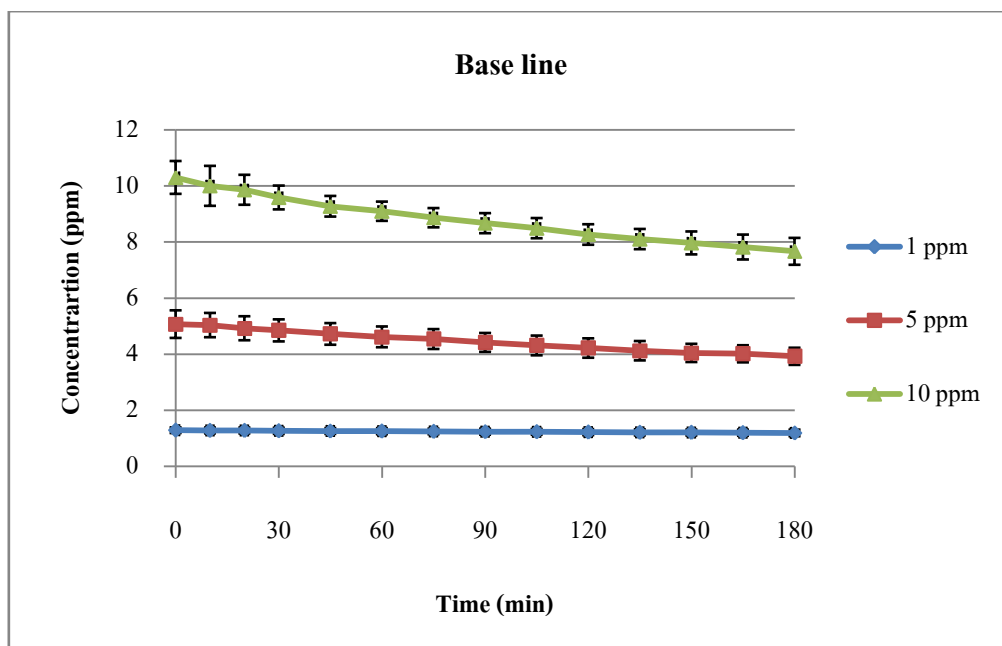
ตารางที่ 4.2 สภาวะที่เหมาะสมของสารไททาเนียมไดออกไซด์ กับแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด

ความเข้มข้น TiO_2 (% W/V)	TiO_2 loading (g/m^2)	
	กระดาษกรองควอตซ์	กระดาษกรองใยแก้ว
1	2.69	1.76
2	5.65	2.71
2.8	10.75	-
3	12.489	7.49
4	17.10	8.98
5	23.68	10.97

4.2 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศ

4.2.1 Base line

ในการทดลองสารโพลูอินความเข้มข้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะปิดไฟ และไม่มีแผ่นฟอกอากาศ



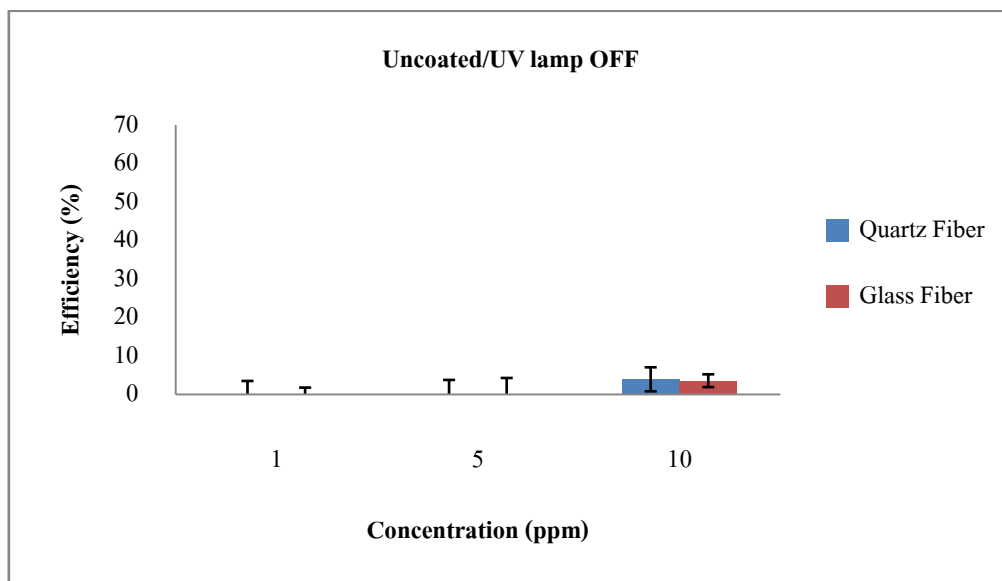
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาร โทลูอินกับเวลาในถังปฏิริยาที่ไม่มีแหล่งกำเนิดแสง และไม่มีแผ่นฟอกอากาศ

จากภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาร โทลูอินกับเวลา ในสภาวะปิดไฟ และไม่มีแผ่นฟอกอากาศ พบว่า ตลอดระยะเวลาการทดลอง 180 นาที สาร โทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้าน ค่อยๆลดลง เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นสาร โทลูอินบางส่วนถูกดึงออกจากถังปฏิริยาจากเครื่องตรวจวัดสาร อินทรีย์ ระเหย ppbRAE โดยลักษณะเฉพาะของเครื่องตรวจวัดสาร อินทรีย์ระเหย ppbRAE ที่นำมาใช้วัดสาร โทลูอินในตัวเครื่องจะมีปั๊มสำหรับดูดอากาศอัตราการไหลที่ 450 – 550 ซีซี/นาที ซึ่งจะทำให้อากาศบางส่วนถูกดึงออกไประหว่างทำการทดลอง รวมปริมาตรอากาศที่ถูกดึงออกจากถังปฏิริยาประมาณ 5.5 ลิตร คิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรอากาศทั้งหมดภายในถังปฏิริยา

ในการดำเนินการทดลองชุดทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสาร โทลูอินทั้ง 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม ชุดทดสอบการดูดซับของสาร โทลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ ชุดทำปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส และชุดทดสอบการกำจัดสาร โทลูอินโดยใช้แสงยูวี จะใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) จากผลการทดลองชุด Base line มาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดสาร โทลูอินในทุกๆชุดการทดลอง

4.2.2 ชุดควบคุม

ในการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.156 ตารางเมตร

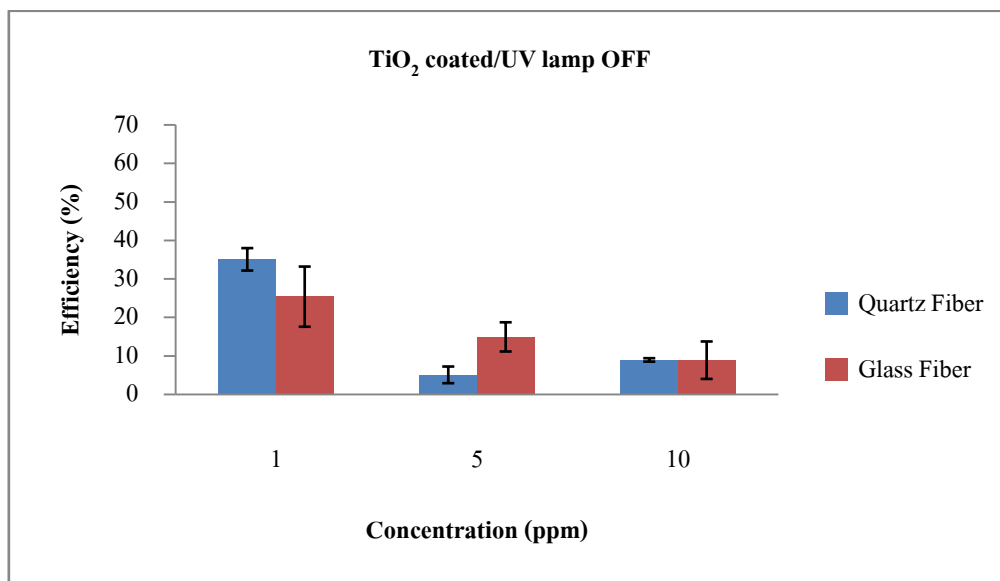


ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการดูดซับสารโทลูอินลงบนแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ในสภาวะปิดไฟ

จากภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ลงบนแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์กับเวลา ในสภาวะปิดไฟ ผลการทดลองพบว่ากระดาษกรองควอตซ์ไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วนเท่ากับ 0.00 0.00 และ 3.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกระดาษกรองใยแก้วไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโทลูอินเท่ากับ 0.00 0.00 และ 3.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถดูดซับสารโทลูอินได้

4.2.3 ชุดทดสอบการดูดซับสารโพลีอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ

ในการทดลองสารโพลีอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักสาร 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.156 ตารางเมตร



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสารโพลีอินลงบนแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ในสภาวะปิดไฟ

จากภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสารโพลีอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วนลงบนแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์กับเวลา ในสภาวะปิดไฟ ผลการทดลองพบว่ากระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโพลีอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วนเท่ากับ 35.12 5.10 และ 8.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโพลีอินเท่ากับ 25.42 14.97 และ 8.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อการดูดซับ โดยสารโพลีอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโพลีอินดีที่สุด เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงๆ แผ่นฟอกอากาศจะ อิ่มตัวไปด้วยไอสารโพลีอินที่มากเกินไปความสามารถของแผ่นฟอกอากาศ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารโพลีอินลดลง

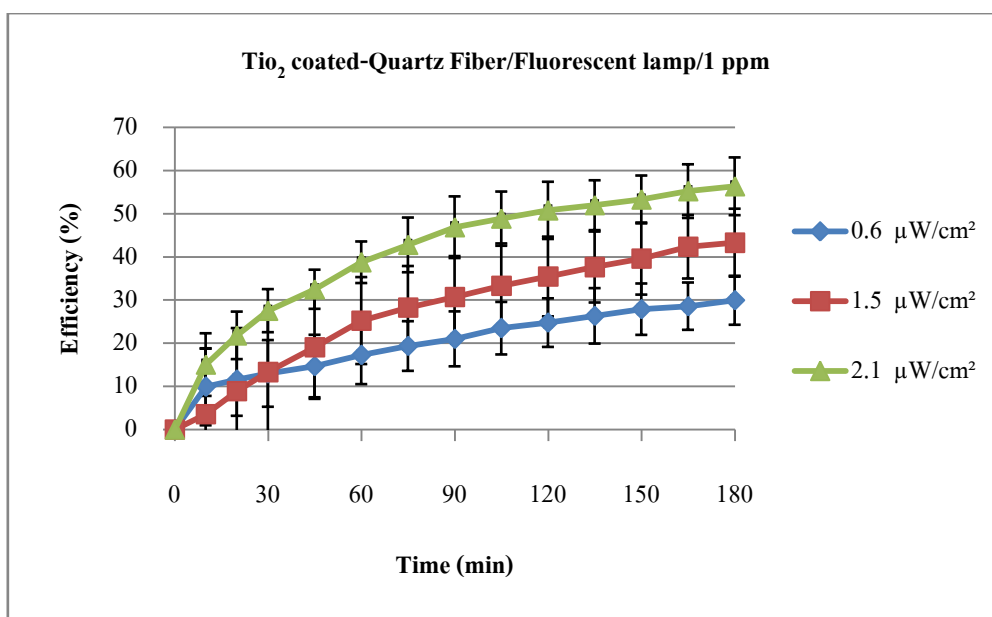
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารโพลีอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ กับชุดควบคุม (ภาพที่ 4.4) จะเห็นได้ว่าแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโพลีอินได้ดีกว่าแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ (ชุดควบคุม)

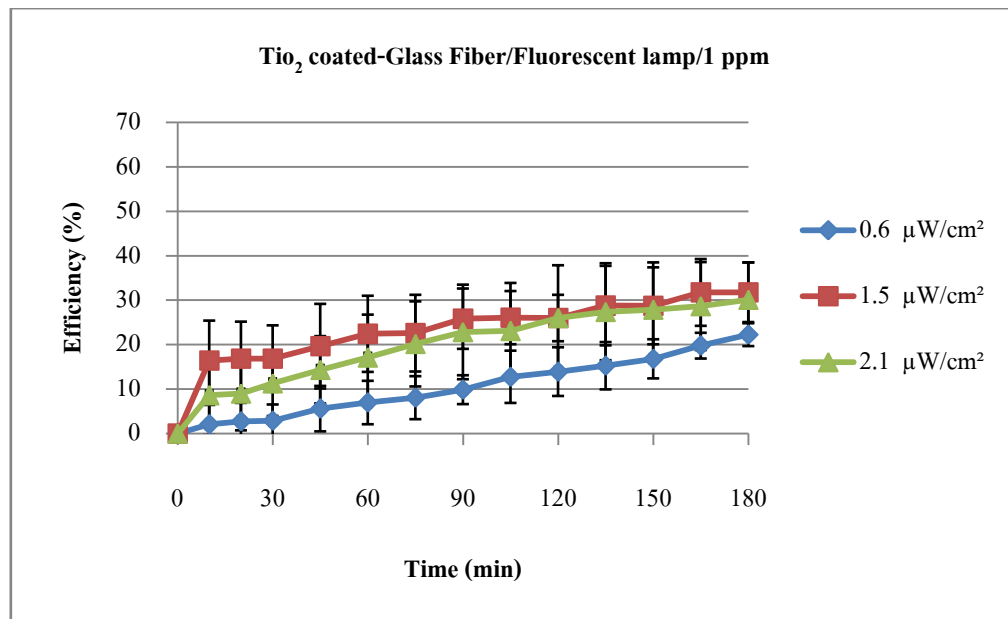
เนื่องจากเมื่อทำการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนแผ่นฟอทอคาทอลิก ทำให้แผ่นฟอทอคาทอลิกมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น (ตารางที่ 4.1) ส่งผลให้อิออนที่ถูกดูดซับบนแผ่นฟอทอคาทอลิกได้มากยิ่งขึ้น

4.2.4 ชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

4.2.4.1 แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์

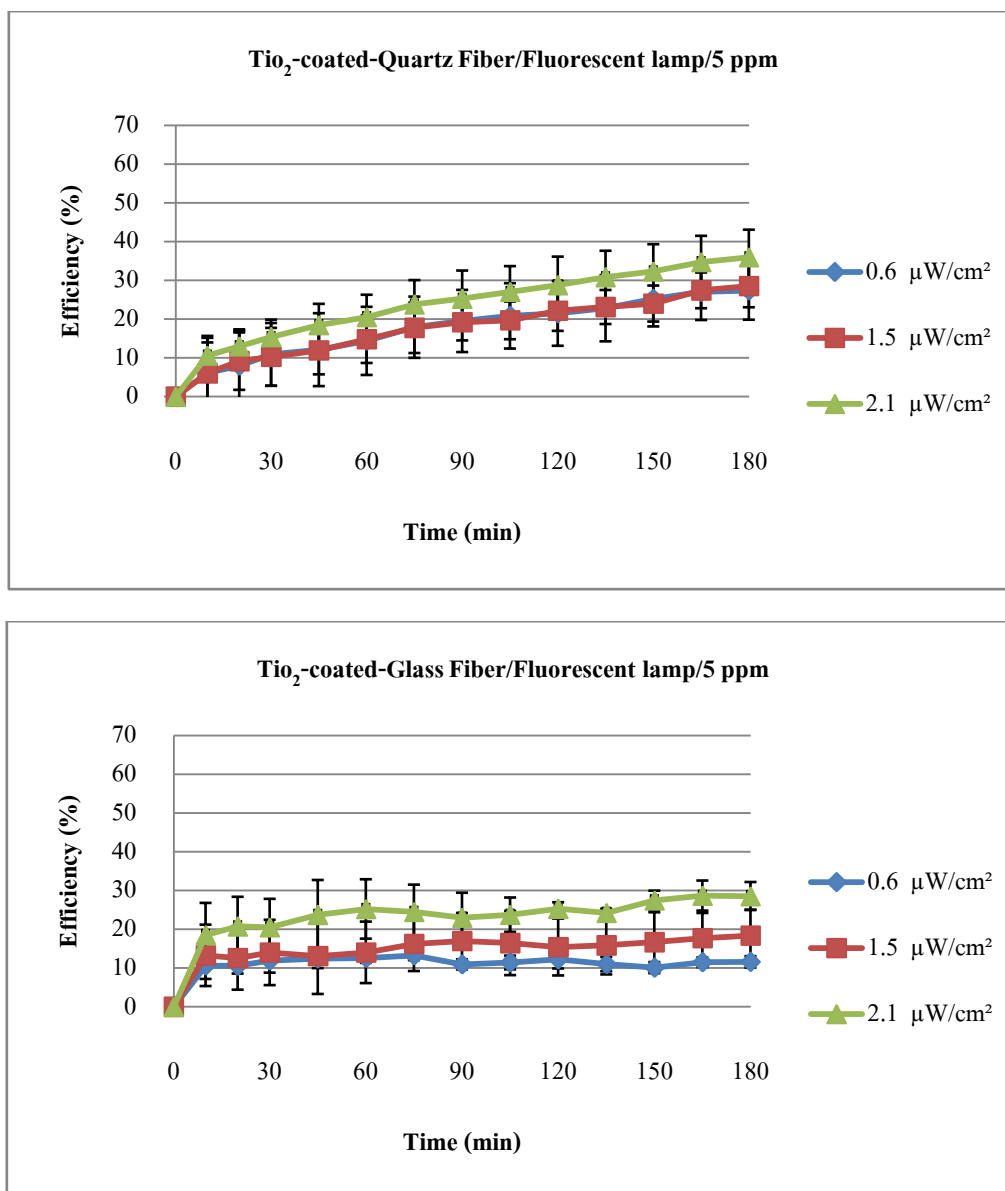
การกำจัดสารพิษอินทรีย์ความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักรวม 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับแผ่นฟอทอคาทอลิกเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 0.156 ตารางเมตร





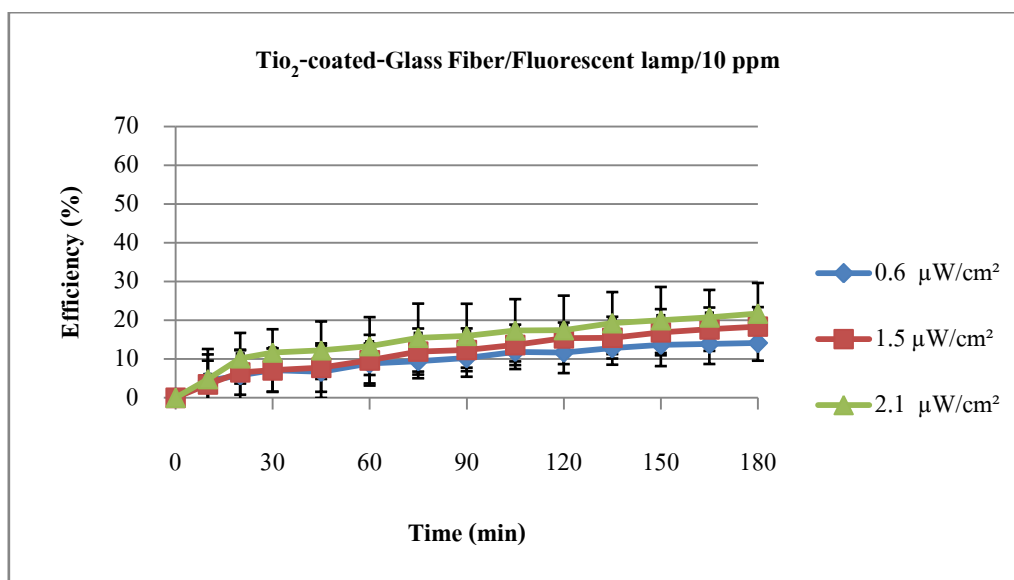
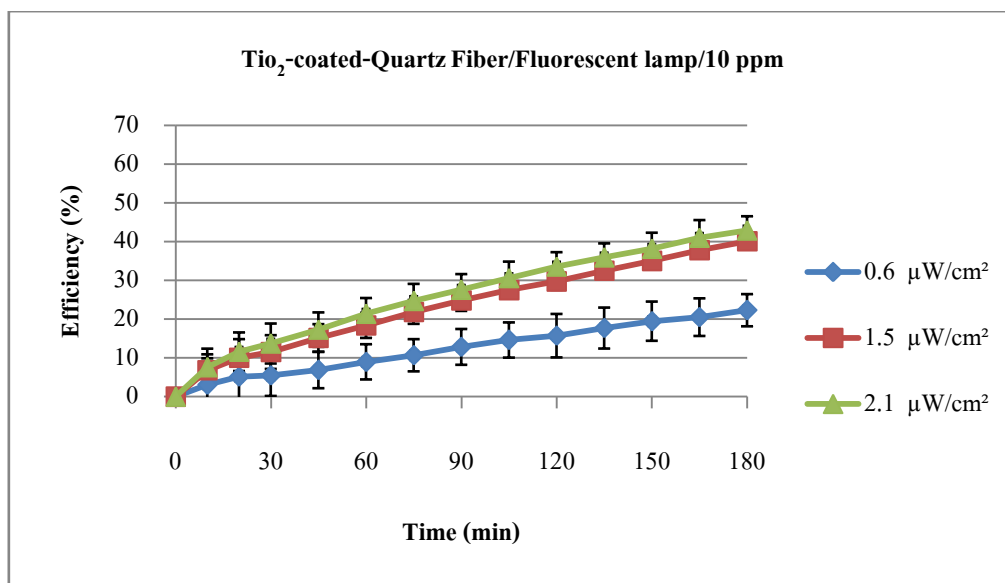
ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน
แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน กับเวลาผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลากรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลูอินเท่ากับ 29.94 43.28 และ 56.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และระยะเวลากรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลูอินเท่ากับ 22.25 31.79 และ 30.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน กับเวลา ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินเท่ากับ 27.38 28.57 และ 35.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินเท่ากับ 11.56 18.37 และ 28.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

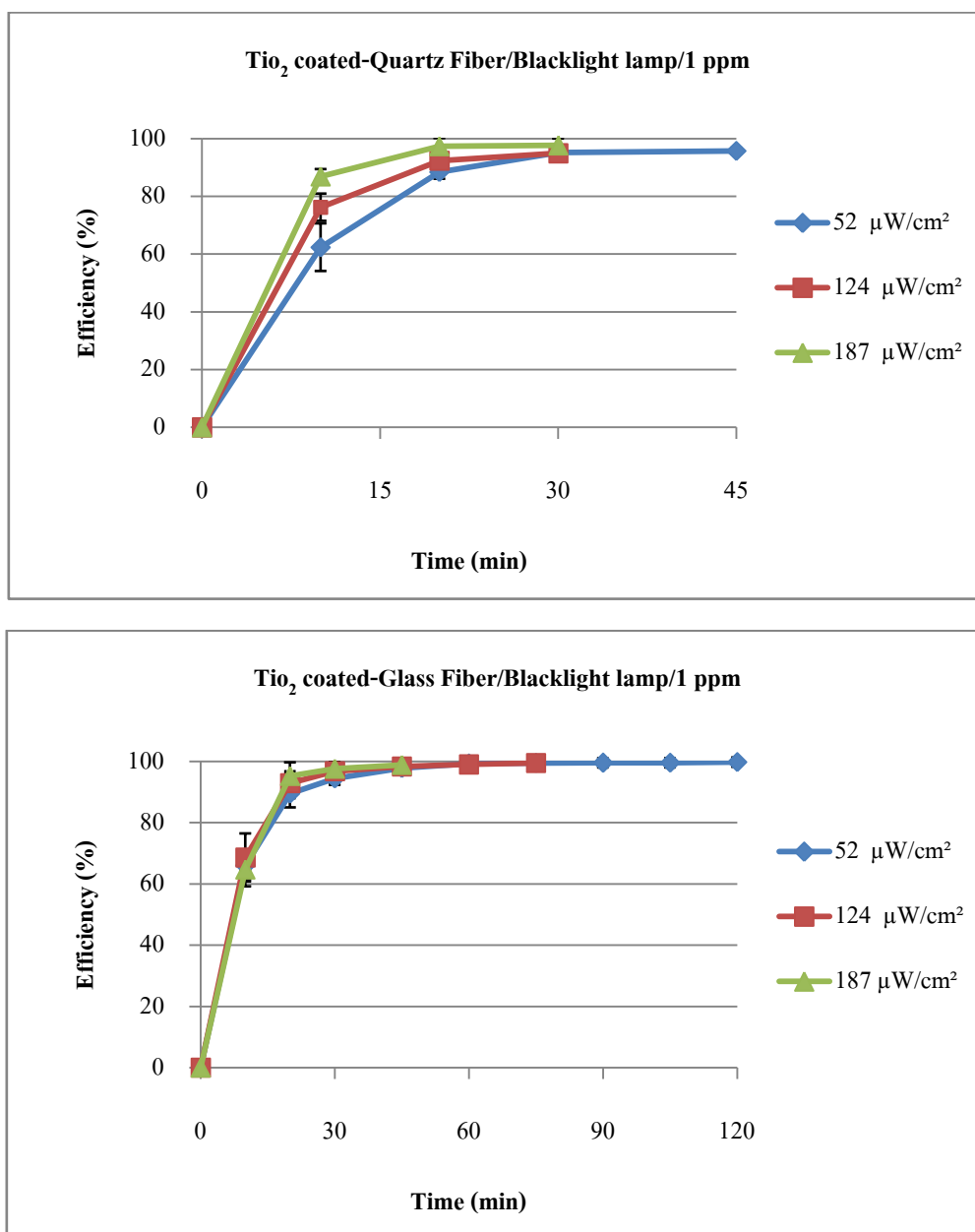


ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสารไทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารไทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน กับเวลา ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารไทลูอินเท่ากับ 22.31 40.13 และ 42.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารไทลูอินเท่ากับ 14.13 18.39 และ 21.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4.2.4.2 แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์

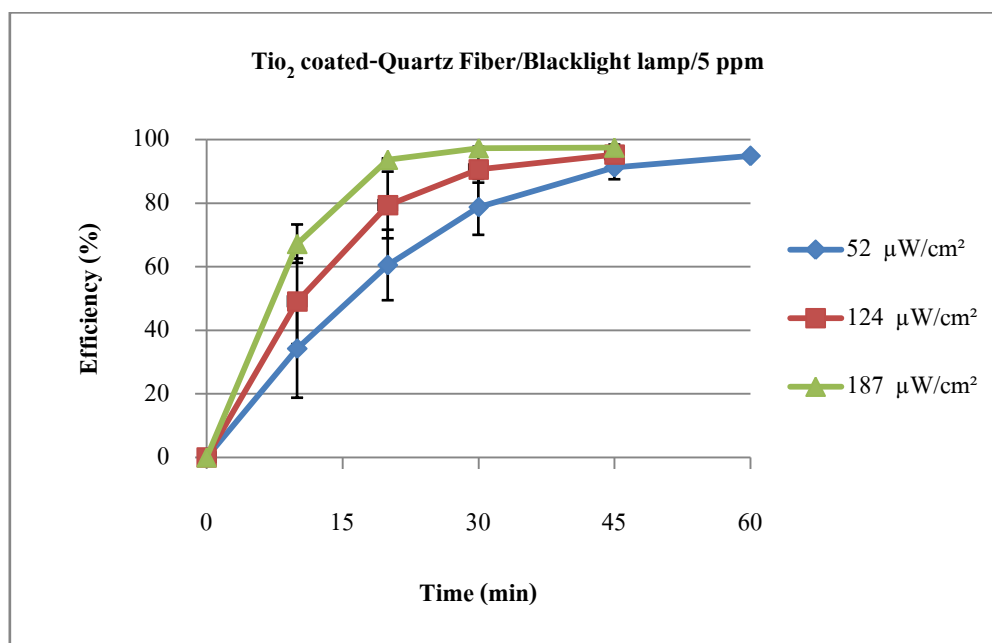
การกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 15 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพักระงสูงสุด 180 นาที ทำการทดลองในสภาวะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสงจากหลอดแบล็คไลท์ ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.156 ตารางเมตร

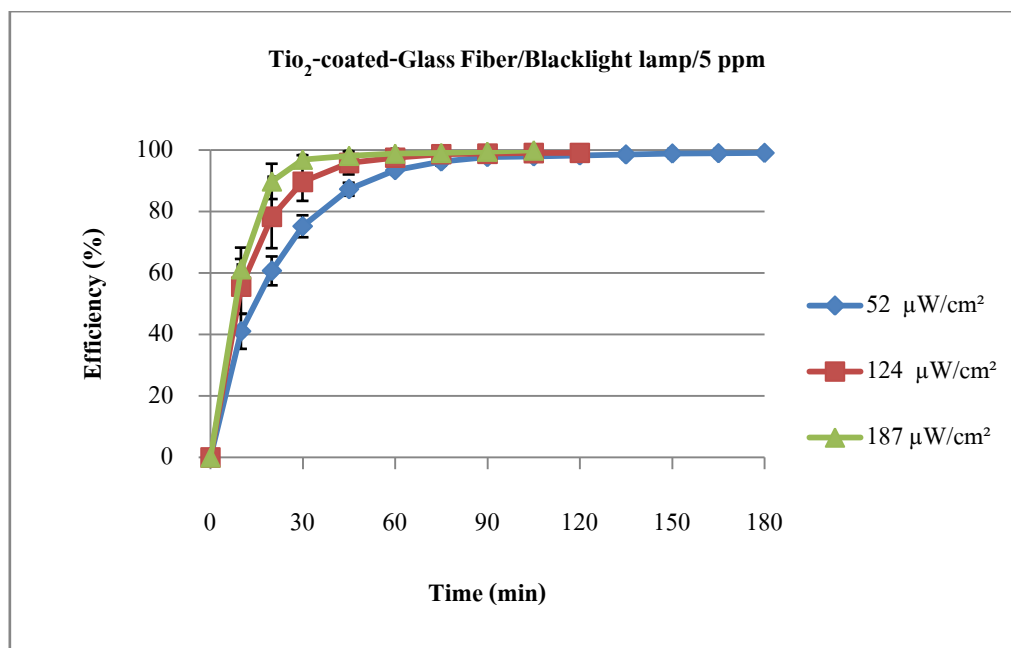


ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน กับเวลาผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์พร้อมกับกระดาศกรองควอตซ์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 95.81 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 45 นาที ที่ความเข้มแสงยูวี 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 94.99 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 30 นาที และความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 97.72 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 30 นาที

เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์พร้อมกับกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 99.81 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 120 นาที ที่ความเข้มแสงยูวี 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 99.54 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 75 นาที และความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 98.93 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 45 นาที

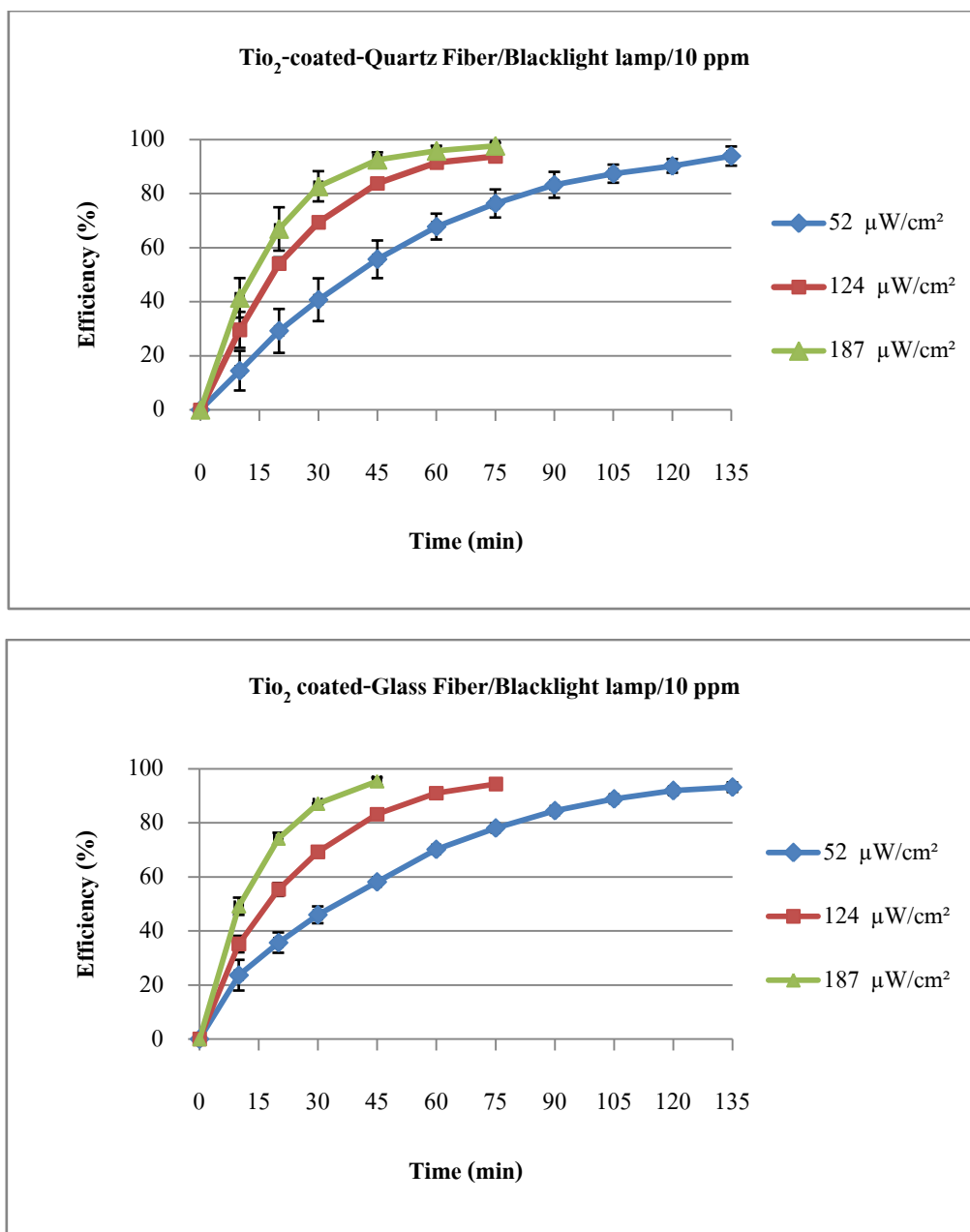




ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

จากภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน กับเวลา ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 94.87 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 60 นาที ที่ความเข้มแสงยูวี 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 95.34 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 45 นาที และความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 97.53 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 45 นาที

เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 99.15 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 180 นาที ที่ความเข้มแสงยูวี 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 99.13 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 120 นาที และความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 99.88 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 105 นาที



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

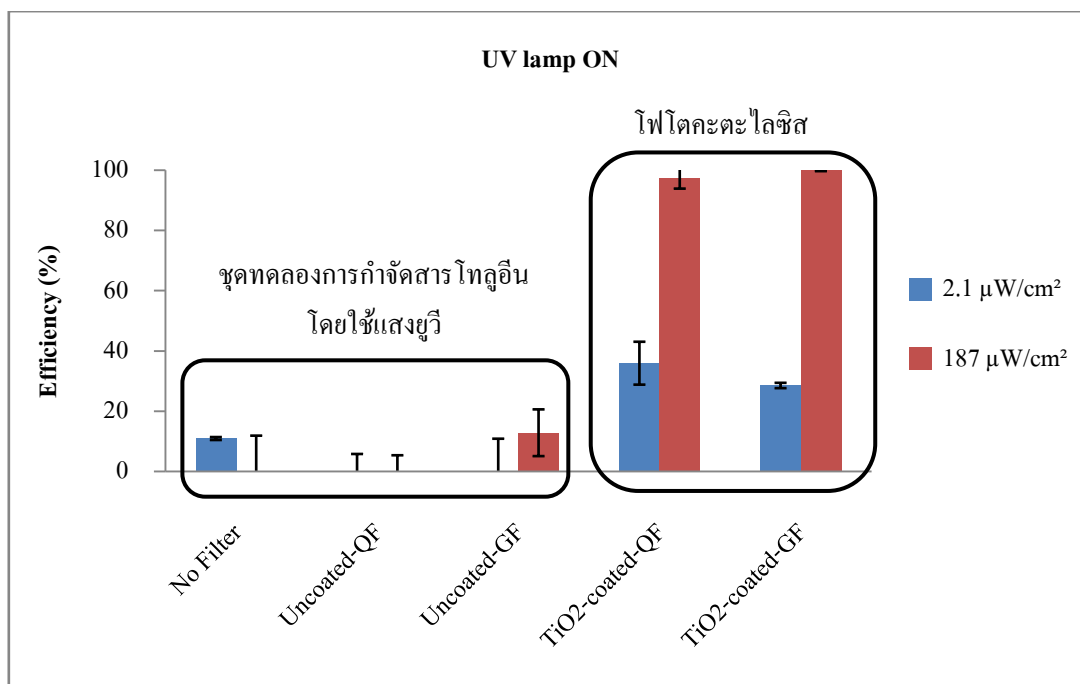
จากภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วนกับเวลา ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับกระดาศกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลูอินเท่ากับ 93.92 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 135 นาที ที่ความเข้มแสงยูวี 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพ

ในการกำจัดสารโทลูอินเท่ากับ 93.80 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 75 นาที และความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินเท่ากับ 97.74 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 75 นาที

เมื่อทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินเท่ากับ 93.21 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 135 นาที ที่ความเข้มแสงยูวี 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินเท่ากับ 94.34 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 75 นาที และความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร โทลูอินเท่ากับ 95.42 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการกำจัดสาร 45 นาที จากภาพที่ 4.6- 4.11 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแบล็คไลท์ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาร โทลูอินทุกความเข้มข้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามความเข้มแสงยูวี และระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มความเข้มแสงยูวีให้กับระบบพลังงานที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนก็จะมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของธรรมศักดิ์ โรจนวิรุฬห์ (2549) ที่ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 193 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของสารอินทรีย์ระเหยสูงกว่าความเข้มแสงยูวี 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เช่นเดียวกับงานวิจัยของเทียนฉาย สติธิวงษ์ (2554) ที่ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยแผ่นฟอกอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่า แหล่งกำเนิดแสง จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่มีความเข้มแสงยูวี 2.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัดสาร อินทรีย์ระเหย ได้ดีกว่าความเข้มแสงยูวี 1.2 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

4.2.5 ชุดการทดลองการกำจัดสารโทลูอินโดยใช้แสงยูวี

ทดลองสาร โทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ทำการทดลองในสภาวะเปิดแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการทดลองจะเปิดแหล่งกำเนิดแสงในสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ และมีแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ที่เวลากักพักสาร 180 นาที



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนโดยใช้แสงยูวี

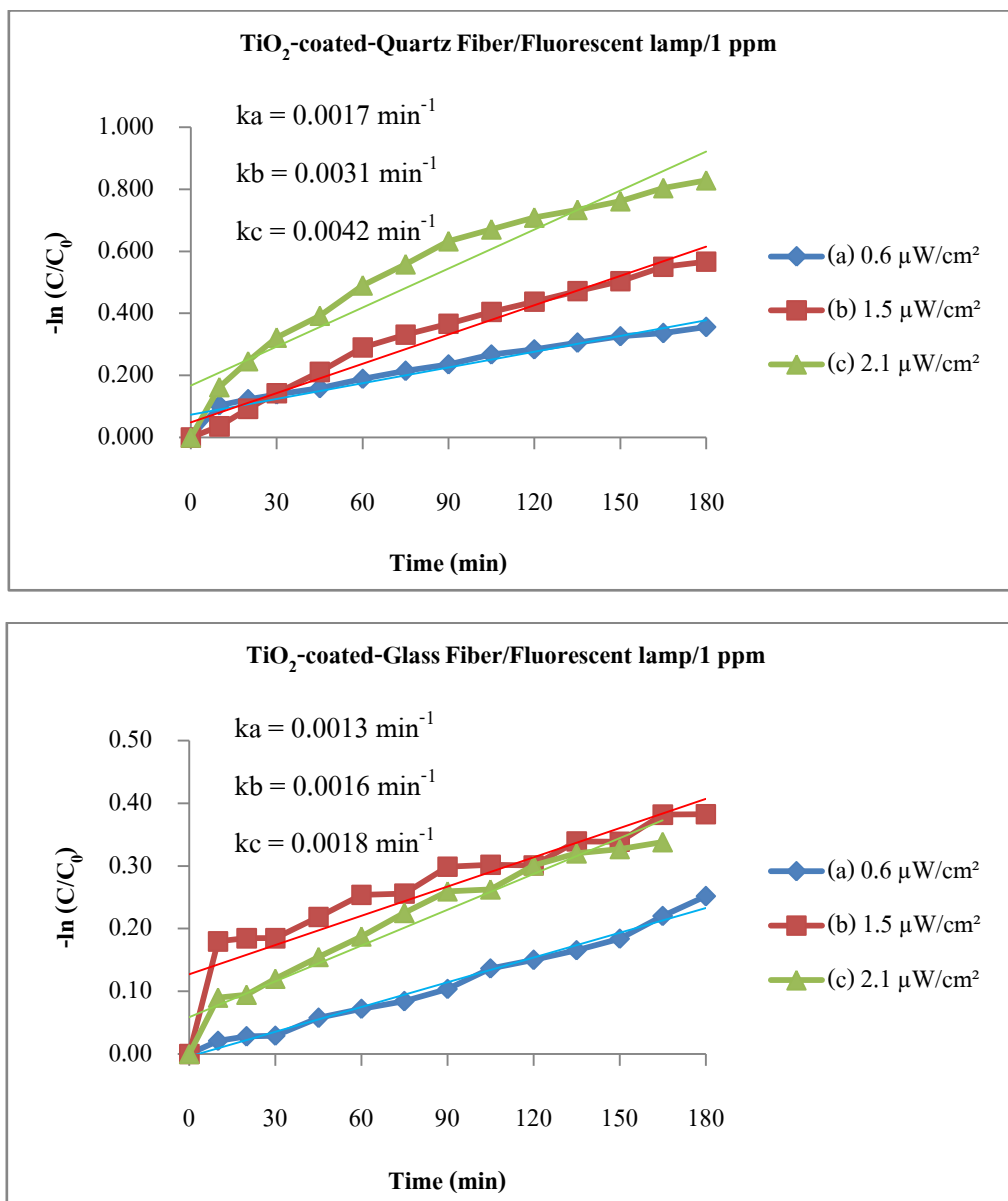
จากภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนกับเวลา ผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มแสงยูวี $2.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ในสถานะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ และมีแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินมีค่าน้อยกว่าชุดการทดลองกำจัดสารโทลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เมื่อทำการแปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี $187 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินที่ความเข้มแสงดังกล่าว ในสถานะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ และมีแผ่นฟอกอากาศไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินน้อยกว่าชุดการทดลองกำจัดสารโทลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าแสงยูวี และแผ่นฟอกอากาศที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถกำจัดสารโทลูอินได้

4.3 จลนพลศาสตร์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส สามารถนำข้อมูลมาใช้หาค่าคงที่ปฏิกิริยา จากการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ กับเวลา

4.3.1 ชุดทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

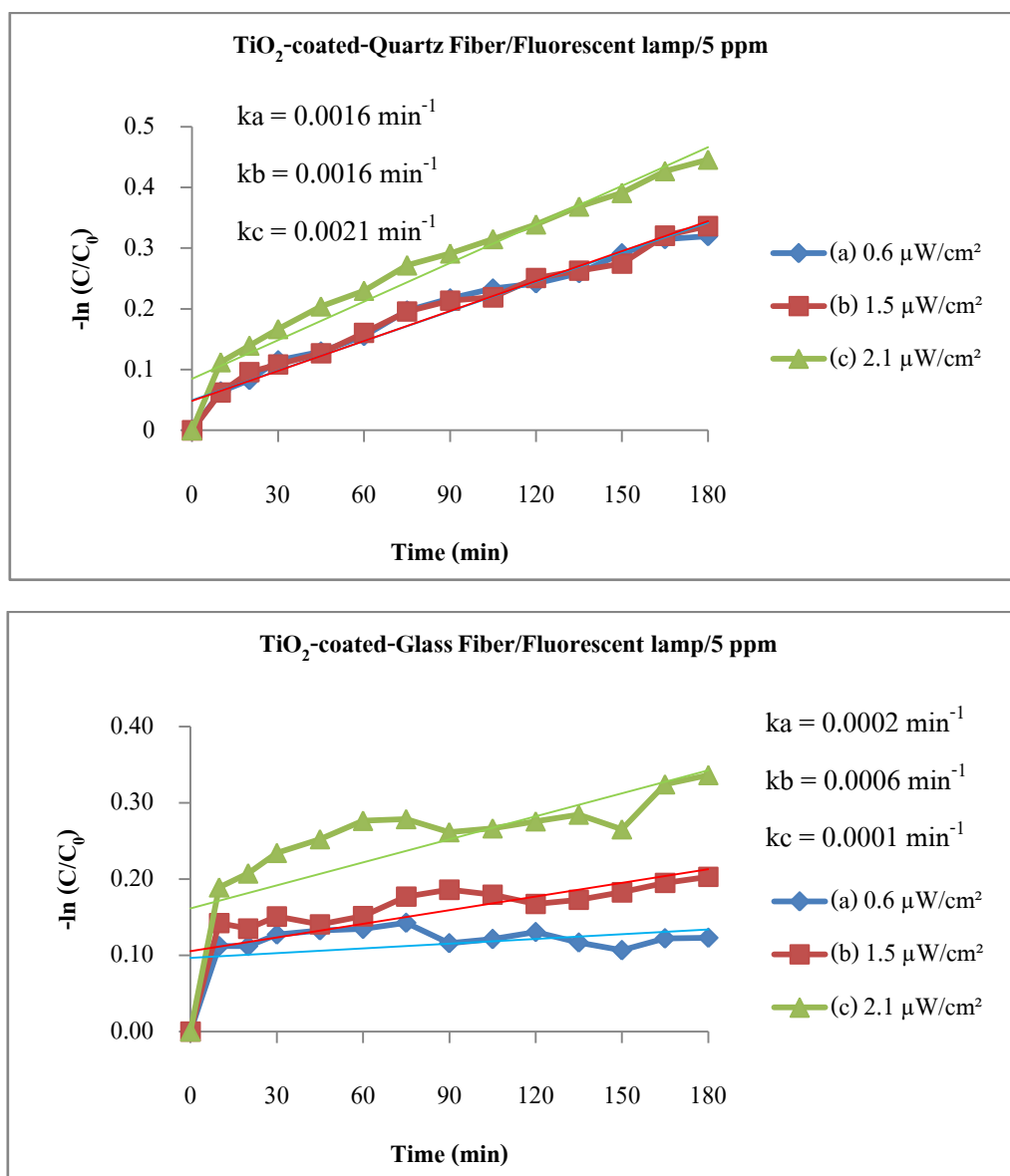
4.3.1.1 แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์



ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน ตามเวลากักพักสาร พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตลอดระยะเวลาทำการทดลองมากที่สุด โดยกระจาย

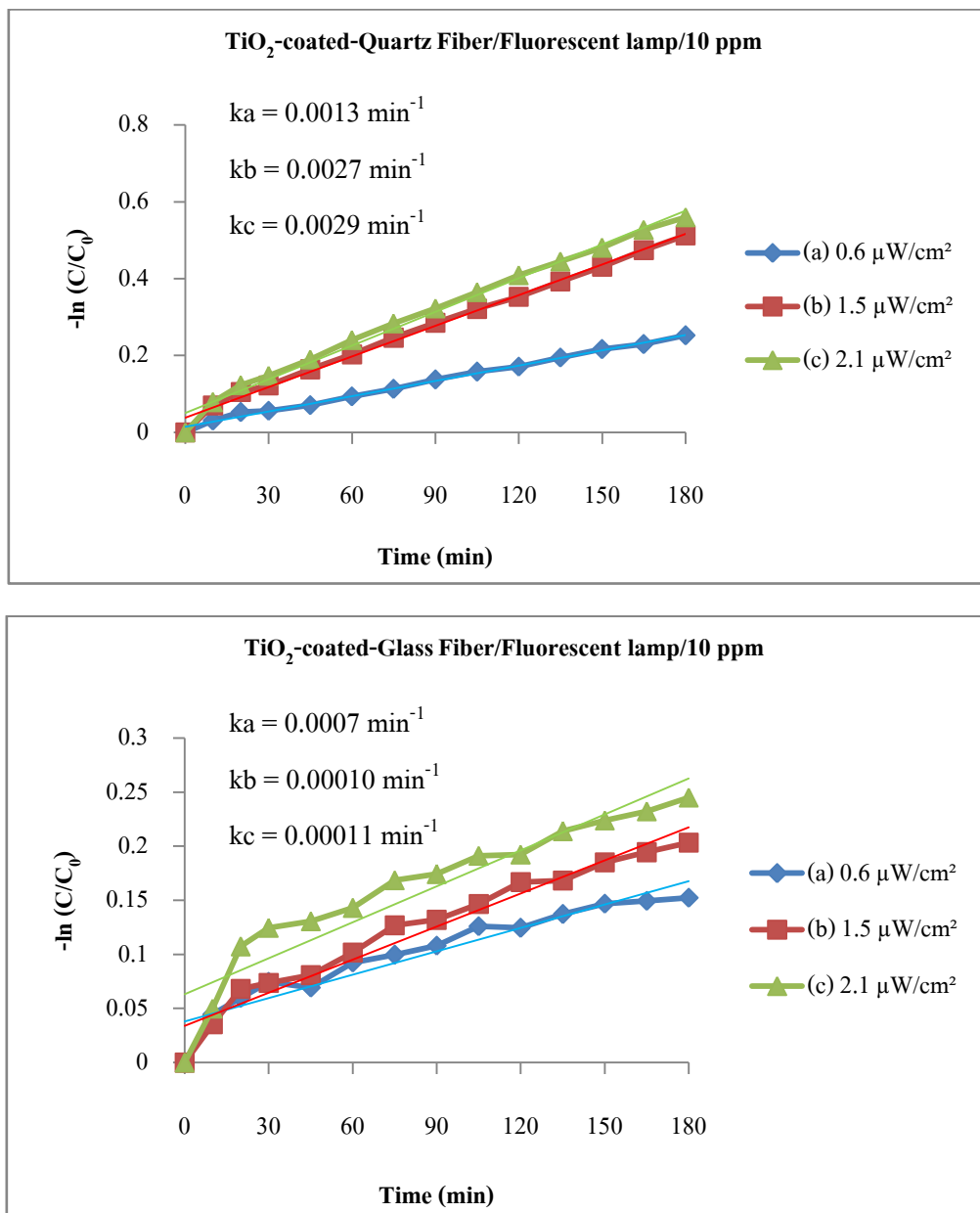
กรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0042 นาที^{-1} และ 0.0018 นาที^{-1} ตามลำดับ แสดงว่าที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วนได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ตามเวลากักพักระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตาราง

เซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตลอดระยะเวลาทำการทดลองมากที่สุด โดยกระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0021 นาที^{-1} และ 0.0001 นาที^{-1} ตามลำดับ แสดงว่าที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสารโพลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนได้ดีที่สุด

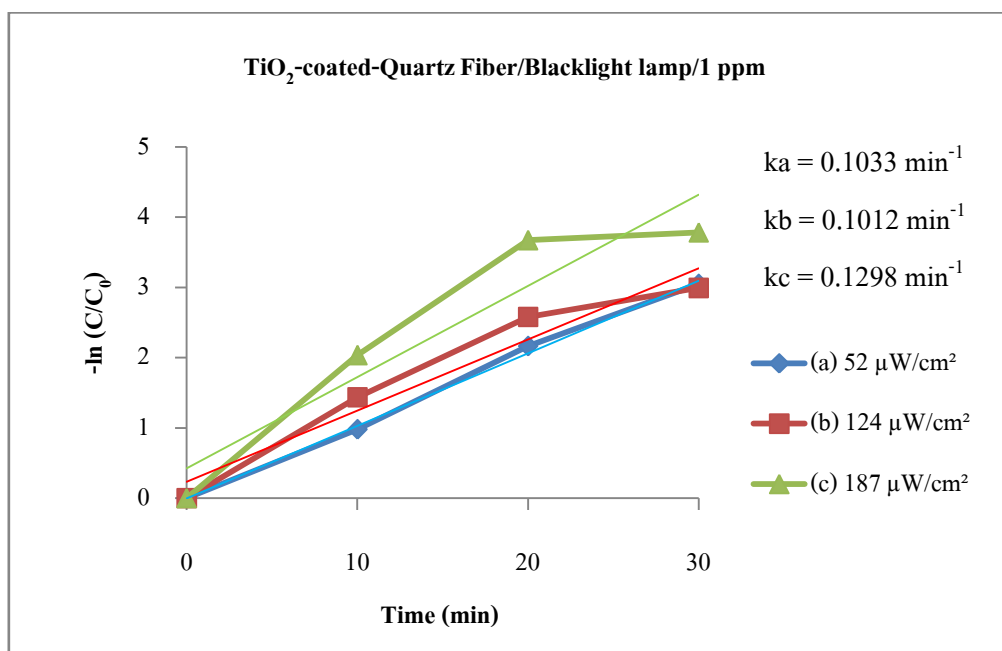


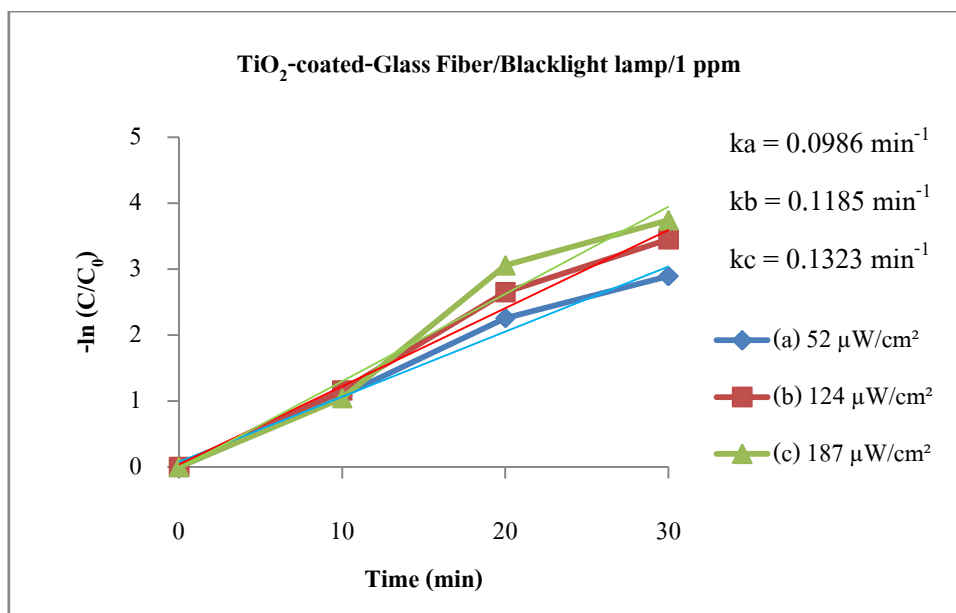
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารโพลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารโพลีอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน ตามเวลาการพักสาร พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตลอดระยะเวลาทำการทดลองมากที่สุด โดยกระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0029 นาที^{-1} และ 0.0011 นาที^{-1} ตามลำดับ แสดงว่าที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วนได้ดีที่สุด

4.3.1.2 แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

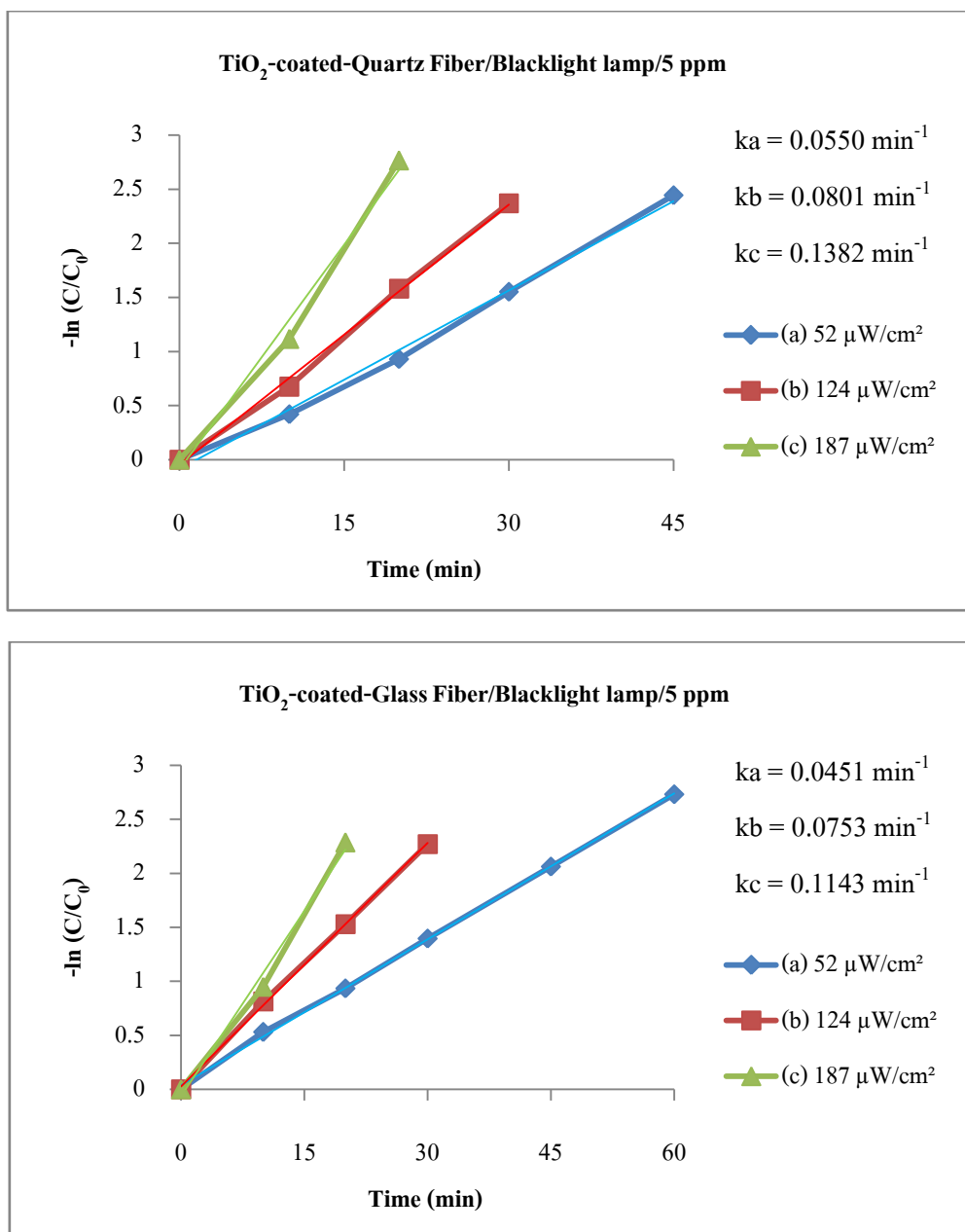
ในการกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสงจากหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงต่างกัน แผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินใกล้เคียงกัน การทดลองนี้จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิดจากค่าคงที่ปฏิกิริยา ณ เวลาการพักสารที่สามารถกำจัดสารโพลีอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานภายในอาคารที่อยู่อาศัยระยะยาว ซึ่งกำหนดไว้ว่าที่ระยะเวลาสัมผัสสาร 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารโพลีอินต้องไม่เกิน 0.6 ส่วนในล้านส่วน





ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

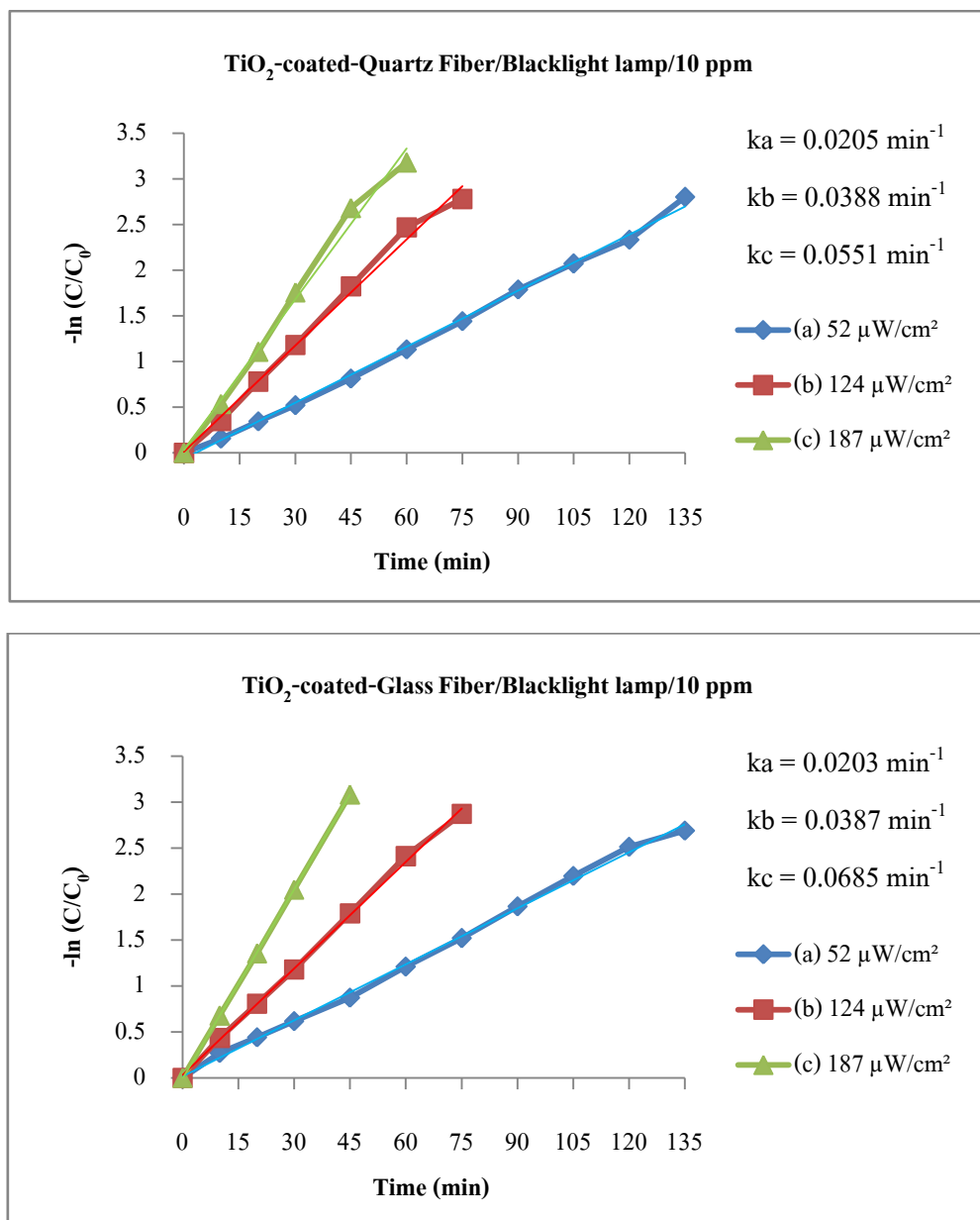
จากภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอิน 1 ส่วนในล้านส่วน ตามเวลากักพักสาร พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระจายกรองควอตซ์ และกระจายกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นสาร โทลูอินมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยกระจายกรองควอตซ์ และกระจายกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1298 นาที^{-1} และ 0.1323 นาที^{-1} ตามลำดับ แสดงว่าที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระจายกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสาร โทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วนได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

จากภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โทลูอิน 5 ส่วนในล้านส่วน ตามเวลาพักพักสาร พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นสาร โทลูอินมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยกระดาษกรองควอตซ์ และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีค่าคงที่

ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1382 นาที^{-1} และ 0.1143 นาที^{-1} ตามลำดับ แสดงว่าที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระจกกรองควอตซ์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โพลีอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์

จากภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร โพลีอิน 10 ส่วนในล้านส่วน ตามเวลากักพักสาร พบว่าที่ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระจกกรองควอตซ์ และกระจกกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ความ

เข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นสารโพลีอีนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยกระดาษกรองควอตซ์และกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0551 นาที^{-1} และ 0.0685 นาที^{-1} ตามลำดับ แสดงว่าที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสารโพลีอีนความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วนได้ดีที่สุด

4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอีนของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด

การเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ การกำจัดสารโพลีอีน ของแผ่นฟอกอากาศ ทั้ง 2 ชนิด พิจารณาจากค่าคงที่ปฏิกิริยาเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าคงที่ปฏิกิริยาชุดทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ความเข้มแสงยูวี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	ค่าคงที่ปฏิกิริยา k (min^{-1})					
	กระดาษกรองควอตซ์เคลือบ TiO_2			กระดาษกรองใยแก้วเคลือบ TiO_2		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm	1 ppm	5 ppm	10 ppm
0.6	0.0017	0.0016	0.0013	0.0013	0.0002	0.0007
1.5	0.0031	0.0016	0.0027	0.0016	0.0006	0.0010
2.1	0.0042	0.0021	0.0029	0.0018	0.0001	0.0011
52	0.1033	0.0550	0.0205	0.0986	0.0451	0.0203
124	0.1012	0.0801	0.0388	0.1185	0.0753	0.0387
187	0.1298	0.1382	0.0551	0.1323	0.1143	0.0685

จากตารางที่ 4.3 พบว่าแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันจะมีค่าคงที่ปฏิกิริยาต่างกัน เมื่อใช้หลอดแบล็คไลท์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ค่าคงที่ปฏิกิริยาจะมีค่าสูงกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากหลอดแบล็คไลท์มีพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนมากกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้สารโพลีอีนถูกกำจัดได้มากกว่า

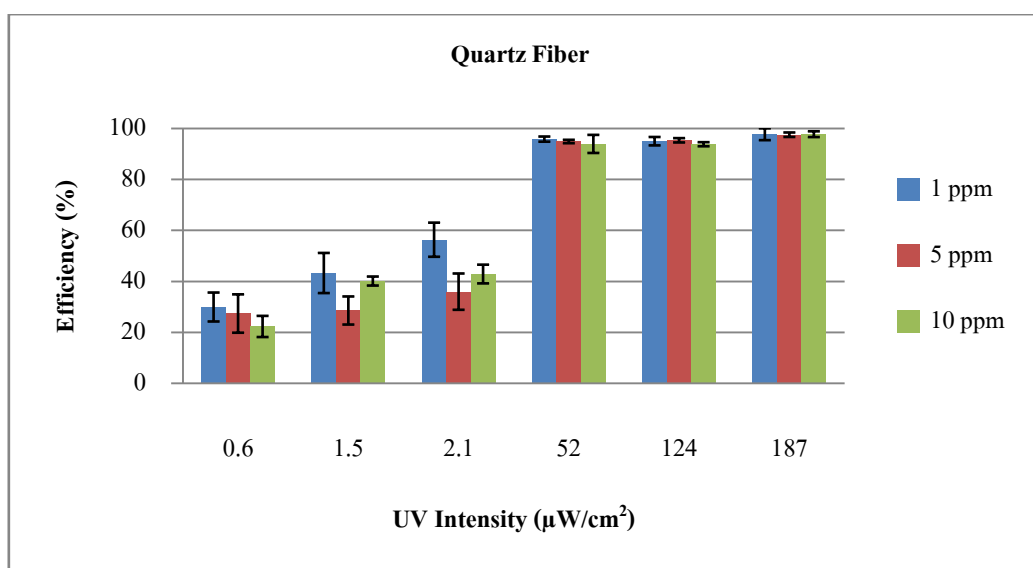
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกทั้ง 2 ชนิดในการกำจัดสารโพลีอีนโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่ากระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัด และค่าคงที่ปฏิกิริยา สูงกว่ากระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์เกือบทุกความเข้มข้น และความเข้มแสงยูวี จึงสามารถสรุปได้ว่ากระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอีนดีกว่า เนื่องจากกระดาษกรองควอตซ์มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบถึง 99.95 เปอร์เซ็นต์ (Composites plastic, 2013)

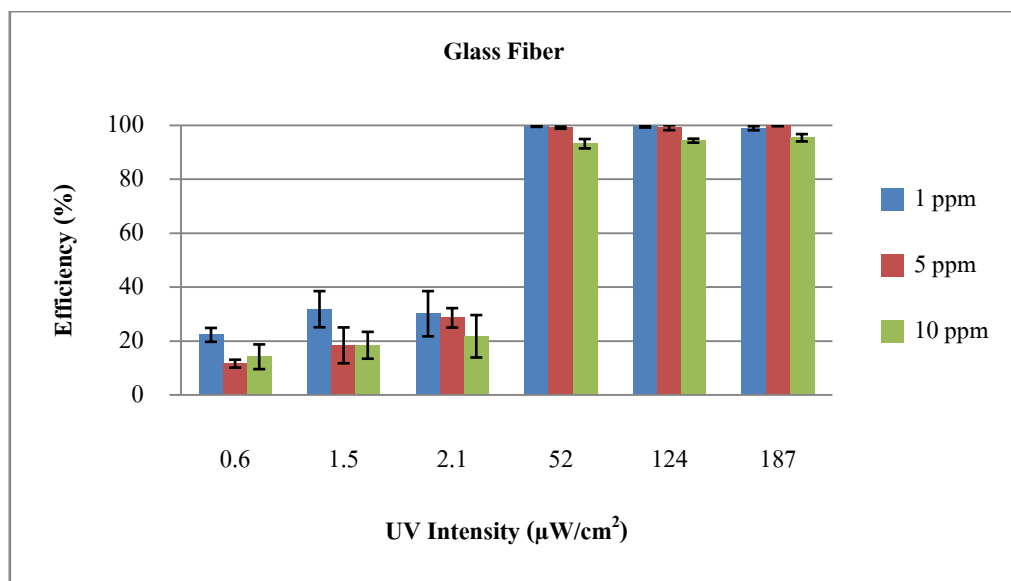
ส่วนกระดาษกรองใยแก้วมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบเพียง 68.8 เปอร์เซ็นต์ (The Quartz Corporation, 2012) ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์ มีผลทำให้การย่อยสลายสารโพลีอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูงขึ้น ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวที่ช่วยในการดูดซับได้ดี เมื่อมีการฉายแสงยูวีความเป็นโพโตคะตะลิสต์ก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับการศึกษาของ Guan (2005) ที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาโพโตคะตะไลซิส และคุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของกระจกเคลือบด้วยฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าคุณสมบัติความชอบน้ำจะสัมพันธ์กับปฏิกิริยาโพโตคะตะไลซิส โดยพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติความชอบน้ำสูงขึ้นเมื่อเติมซิลิกาเข้าไป และส่งผลให้ความเป็นโพโตคะตะลิสต์เพิ่มขึ้นในระหว่างที่มีการฉายรังสียูวี

4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินทรีย์ตามค่ามาตรฐานสารโพลีอินทรีย์ในอาคารที่อยู่อาศัย

จากค่ามาตรฐานสารโพลีอินทรีย์ในอาคารที่อยู่อาศัย ระยะยาว (ตารางที่ 2.1) กำหนดไว้ว่าที่ระยะเวลาสัมผัสสาร 24 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นสารโพลีอินทรีย์จะไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.6 ส่วนในล้านส่วน (Health Canada, 2011) ในการทดลองนี้จึงได้เลือกค่าความเข้มข้นดังกล่าว มาเป็นความเข้มข้นเป้าหมายที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินทรีย์ของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด

การกำจัดสารโพลีอินทรีย์ความเข้มข้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วนให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้นั้น แผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิดต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินทรีย์ ≥ 40 และ ≥ 94 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้น 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ





ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินตามค่ามาตรฐานสารโพลีอินภายในอาคารที่อยู่อาศัย

จากภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินที่ความเข้มแสงยูวีต่างๆ พบว่าการกำจัดสารโพลีอินในสภาวะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิดที่ความเข้มข้น และความเข้มแสงเดียวกัน ประสิทธิภาพการกำจัดสารส่วนใหญ่ไม่สามารถกำจัดสารโพลีอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนไม่เพียงพอ จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นน้อย โดย กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ได้เพียงสภาวะเดียว คือ ความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน (ประสิทธิภาพในการกำจัดสาร ≥ 40 เปอร์เซ็นต์) ที่ความเข้มแสงยูวี 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินเท่ากับ 43.28 และ 56.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดแผ่นฟอกอากาศเป็นกระดาษกรองใยแก้ว พบว่าไม่สามารถกำจัดสารโพลีอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ในทุกความเข้มข้น และความเข้มแสงยูวี

เมื่อทำการเปลี่ยนแหล่งพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น อิเล็กตรอนด้วยแสง เป็นหลอดแบล็คไลท์ พบว่าแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้เกือบทุกสภาวะ คือความเข้มข้น 1 และ 5 ส่วนในล้านส่วน ทุกความเข้มแสงยูวี ส่วนความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน ที่ความเข้มข้นแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินต้องใช้ระยะเวลาในการกำจัดสารเพิ่มมากขึ้นจึงจะสามารถ

กำจัดสารโกลูอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโกลูอินก็จะมากขึ้น และระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดสารน้อยลง

4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยในอากาศโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นจำนวนมาก การศึกษาของคณะผู้วิจัยแต่ละ คนล้วนแต่ใช้เทคนิคการเคลื่อน และสภาวะของการทดลอง ตลอดจนรูปแบบของการศึกษาที่แตกต่างกันไป จนยากที่จะนำผลของการศึกษามาเปรียบเทียบ หรือหาข้อสรุปว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารของตัวกลางแต่ละชนิด ตัวกลางชนิดใดให้ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสาร ดีที่สุด หรือเหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งการเปรียบเทียบจำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรให้อยู่ในเงื่อนไข หรือสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ในชุดการศึกษาเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารโกลูอินกับงานวิจัยของเทียนฉาย (2554) เนื่องจากสภาวะการทดลองที่ใช้อยู่ในสภาวะเดียวกันคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารโกลูอินที่ใช้ เวลาพักพักสาร แหล่งกำเนิดแสง ความเข้มแสงยูวี และถังปฏิกริยาแตกต่างกันที่ตัวชนิดแผ่นฟอกอากาศ

จากการศึกษาของเทียนฉาย (2554) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาร โกลูอิน โดยใช้แผ่นฟอกอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ประสิทธิภาพการกำจัดสารดีที่สุดเมื่อใช้แหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มแสง 0.2 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของพลอย (2555) ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสารโกลูอินดีที่สุดเมื่อใช้แหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวีสูงสุด 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากในงานวิจัยของพลอยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาไททานเนียมไดออกไซด์ P-25 ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส 70 เปอร์เซ็นต์ และแบบรูไทล์ 30 เปอร์เซ็นต์ (Zhao and Yang, 2003) โดยอนาเทสมีสมบัติในการหักเห และสะท้อนแสงน้อยกว่ารูปผลึกแบบรูไทล์ แต่จะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกริยามากกว่ารูปผลึกแบบรูไทล์ (อภิชาติ ไชยชนตรดี , 2549) ซึ่งโดยทั่วไปไททานเนียมไดออกไซด์ชนิดนี้จะให้ photoactivity สูงกว่าไททานเนียมไดออกไซด์ชนิดอื่นๆ แตกต่างจากแผ่นฟอกอากาศของเทียนฉาย โครงสร้างผลึก ของตัวเร่งปฏิกริยาไททานเนียมไดออกไซด์ที่พบมากที่สุดในพื้นที่ฟอกอากาศ คือ โครงสร้างแบบรูไทล์ รองลงมา คืออนาเทส ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารที่ความเข้มแสงยูวีสูงๆเกิดได้ไม่ดี

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษา ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.156 ตารางเซนติเมตร ในการกำจัดสารโพลูอินโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ควบคุมอุณหภูมิการทดลองที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50 - 70 เปอร์เซ็นต์ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิดโดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นสารโพลูอิน 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 0.6 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 52 124 และ 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาพักสาร 180 นาที จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงชนิดแผ่นฟอกอากาศ

กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลูอินมากกว่ากระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากกระดาษกรองควอตซ์มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบมากกว่ากระดาษกรองใยแก้ว ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์นี้ทำให้ความเป็นโฟโตคะตะลิสต์สูงขึ้น

5.1.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารโพลูอิน

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารโพลูอิน 1.5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ทำให้ทราบว่าเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ แผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพการกำจัดสารและค่าคงที่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสารโพลูอินน้อยลง เนื่องจาก หลอดแบล็คไลท์ ให้พลังงานแสงในรูปของความเข้มแสงยูวีที่สูง ทำให้สารโพลูอินความเข้มข้นน้อยถูกกำจัดได้รวดเร็วกว่าความเข้มข้นสูงๆ เช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสาร และค่าคงที่ปฏิกิริยาสูงสุด ที่ความเข้มข้นสารโพลูอินน้อยๆ

5.1.3 การเปลี่ยนแปลงแหล่งกำเนิดแสง และความเข้มแสงยูวี

แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันจะให้ความเข้มแสงยูวีที่ต่างกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มแสงยูวีให้กับระบบ จะส่งผลให้มีพลังงานในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์เพิ่ม มากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสารจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ แผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด สามารถกำจัดสารโทลูอินได้ดีที่สุดที่ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยกระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 56.35 35.97 และ 42.88 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยา 0.0042 0.0021 และ 0.0029 นาที⁻¹ ตามลำดับ ส่วนกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 30.11 28.57 และ 21.74 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยา 0.0018 0.00010 และ 0.0011 นาที⁻¹ ตามลำดับ

เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ แผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด สามารถกำจัดสารโทลูอินได้ดีที่สุดที่ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่ากระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 97.72 97.53 และ 97.74 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยา 0.1298 0.1382 และ 0.0551 นาที⁻¹ ตามลำดับ ส่วนกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 99.01 99.88 และ 94.84 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยา 0.1323 0.1143 และ 0.0685 นาที⁻¹ ตามลำดับ

จะเห็นว่าแสงยูวีจากหลอดแบล็คไลท์ที่มีพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนทำให้เกิดการกำจัดสารโทลูอินได้อย่างรวดเร็วกว่าแสงในช่วงวิสิเบิลจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารโทลูอินของแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด กับค่ามาตรฐานสารโทลูอิน

5.2.1 แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์

การกำจัดสารโทลูอินในสภาวะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด พบว่ากระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วนให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ที่ความเข้มแสงยูวี 1.5 และ 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 43.28 และ 56.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อทำการแปรเปลี่ยนชนิดแผ่นฟอก

อากาศ พบว่ากระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ไม่สามารถกำจัดสารโพลูอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ในทุกความเข้มข้น และความเข้มแสงยูวี

5.2.2 แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์

การกำจัดสารโพลูอินในสถานะกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสงจากหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศทั้ง 2 ชนิด พบว่ากระดาศกรองควอตซ์ และกระดาศกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วนให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ในทุกความเข้มแสงยูวี ยกเว้นสารโพลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน ที่ความเข้มแสงยูวี 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลูอินต้องใช้ระยะเวลาในการกำจัดสารเพิ่มมากขึ้นจึงจะสามารถกำจัดสารโพลูอินให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่องประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดสารโพลูอิน โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดสารโพลูอิน โดยใช้แหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแสงในช่วงวิสิเบิล เช่น
 - 1.1 เพิ่มพื้นที่ผิวให้กับแผ่นฟอกอากาศ เพื่อให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยสามารถเกาะติดผิวได้มากขึ้นโดยการเติมสารไฮดรอกซีเฮกซาโพต ซีโอไลต์ หรือซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นต้น
 - 1.2 ปรับปรุงการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีให้มาดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล โดยการเติมอะตอมของธาตุซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน เป็นต้น
 - 1.3 ปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์โดยการนำไททานเนียมไดออกไซด์มาดูดซับด้วยไอออนของโลหะทรานสิชัน เช่น Fe^{3+} หรือ Cr^{3+} เป็นต้น ซึ่งไอออนเหล่านี้จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอนของไททานเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2. ศึกษาการเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุอื่นๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ภายในอาคารบ้านเรือนได้จริง เช่น ฝ้าม่าน วอลเปเปอร์ แผ่นกระจก เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กาญจนา ลือพงษ์ และนางนุช ศศิธร . 2553. การบำบัดน้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตาไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับ. งานวิจัย. คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- ควบคุมมลพิษ , กรม . 2544. ปัญหาสารพิษในสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.
- ควบคุมมลพิษ. กรม. 2541. โทลูอิน (Toluene). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- นัทรชัย เอกปัญญาสกุล. 2548. กลุ่มอาการป่วยเหตุอาคาร. จุฬาลงกรณ์เวชสาร 49, 2: 91-100.
- ชวิศรี รัชนีเมธากุล. 2549. การปรับแต่งผิวหน้าของไททานเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- คนัย กิจชัยนุกูล. 2547. เรื่อนำร่องของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>. [2556, มกราคม 27]
- ชนวัฒน์ บุญประดิษฐ์. สารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile organic compound) ในอุตสาหกรรมยานยนต์. วารสารอุตสาหกรรมยานยนต์. 5, 3 (กรกฎาคม – กันยายน 2551): 40.
- ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประสงค์ คุณานุวัฒน์ชัยเดช และไมตรี สุทธิจิตต์. 2545. สารอินทรีย์ระเหยและสุขภาพ. พิษวิทยา สาร. 11: 1-4.
- พิมพ์สิรินทร์ แดงสระน้อย. 2548. ออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำแสงของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต . ภาควิชาเคมีเทคนิค. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- พิสิษฐ์พงษ์ หมั่นประเสริฐดี. 2553. การใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์สลายของเสียโทลูอินในน้ำทิ้งระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร. ภาควิชาเคมีประยุกต์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เพลินพิศ พงษ์ประยูร. 2553. สาร VOCs ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายในบ้าน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.deqp.go.th/website/20/images/stories/ct/air-SOUND/voc.pdf>. [2554, มีนาคม 4]
- มลิวรรณ บุณแสนอ. 2549. พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 4. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.
- วรวิชญ์ สิงหนาท. 2553. การจัดการคุณภาพอากาศภายในอาคารพักอาศัย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.airbornefilter.com/images/sub_1257393988/Indoor%20Air%20Quality.pdf. [2554, มิถุนายน 1]
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยาลัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข . 2553. การประเมินการสัมผัสสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน โทลูอิน เอธิลเบนซีน และไซลีน) ของประชาชนในชุมชนแออัดในกรุงเทพมหานคร: กรณีศึกษาชุมชนแออัดคลองเตย: โครงการ.
- สาวิตรี พูลมา. 2548. การรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยจากสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เทียนฉาย สติรภิวังศ์. 2554. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหย ด้วยแผ่นฟอกอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทบวงมหาวิทยาลัย. 2533. เคมีเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 6, กรุงเทพมหานคร: อักษรเจริญทัศน์.
- รัฐพนธ์ ทาทอง. 2543. การใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดความดันต่ำในการบำบัดน้ำดิบที่ปนเปื้อนโคลิฟาจ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัฐเขต มุลินตะ. 2552. แหล่งกำเนิดและความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยในอาคารสำนักงานในกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา สินธุภัก. วิไล ชินเวชกิจวานิชย์ และอรุณ ลีลาพฤทธิ. 2537. การศึกษาภูมิคุ้มกันในผู้ที่เสพยาโคลูอิน. รายงานผลการวิจัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุดม สิทธิการณ. หลอดไฟพิเศษในการฆ่าเชื้อโรค. [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา:

http://www.sathitavl.com/savlknowledge_file/uv.Germicidal%20lamp.pdf [2554,

มิถุนายน 14]

อภิชาติ ไชยชนนตรี. 2549. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้นาโนไททาเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Amethyst Galleries, Inc. The Mineral Anatase. [Online]. 1996. Available from :

<http://mineral.galleries.com/minerals/oxides/anatase/anatase.htm>. [2010, June 18]

Ao, C.H., Lee, S.C. Zou, S.C. and Mak, C.L. 2004. Inhibition effect of SiO₂ on NO_x and VOCs during the photodegradation of synchronous indoor air pollutants at parts per billion (ppb) level by TiO₂. Applied Catalysis B: Environmental 49: 187-193.

Baek, S.O., Goldstone, M.E., Kirk, P.W.W., Lester, J.N. and Perry, R. 1991b. Methodological aspects of measuring polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere. Environ.Technol 12: 107-129.

Blount, M. C. and Falconer, J. L. 2002. Steady-state surface species during toluene photocatalysis. Applied Catalysis B: Environmental: 39: 39-53.

Carp, O., Huisman, C.L. and Reller, A. 2005. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. Prog Solid State Chem 32: 33-177.

Composites / Plastics. Quartz Fibers. [Online]. 1989. Available from:

<http://composite.about.com/library/glossary/q/bldef-q4372.htm>. [2013, March 1]

Degussa. 2002. Titanium Dioxide P25 as Photocatalyst. JJ-Degussa chemical Ltd.

Demeestere, K., Dewulf, J., Witte, B.D., Beeldens, A. and Langenhove, H.V. 2008. Heterogenous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with TiO₂. Building and Environment 43: 406-414.

Fox, M.A. and Dulay, M.T. 1993. Heterogeneous photocatalysis. Chem Rev 93:341-357.

Guan, K., 2005. Relationship between photocatalytic activity, hydrophilicity and self-cleaning effect of TiO₂/SiO₂. Surface & Coatings Technology 191:155-160.

Gupta, H. 1994. Photocatalytic Degradation of Chlorinated Hydrocarbons and Its Combination with Anaerobic Digestion. AIT Dissertation. AIT, Bangkok.

- Health Canada. Residential Indoor Air Quality Guideline: Toluene. [Online]. 2011. Available from: <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/toluene/index-eng.php>. [2011, July 11]
- Hedge, A. 1989. Work-related illness in offices: A proposed model of the “Sick Building Syndrome”. Environmental International 15: 143-158.
- Ichiura, H., Kitaoka, T. and Tanaka, H. 2003. Removal of indoor pollutants under UV irradiation by a composite TiO₂-zeolite sheet prepared using a papermaking technique. Chemosphere 50: 79-83.
- ISO 21348. International Standard [Online]. 2007. Available from: http://www.spacewx.com/Docs/ISO_PRF_21348_e.pdf. [2013, April 5]
- Jeong, J., Sekiguchi, K. and Sakamoto, K. 2004. Photochemical and photocatalytic degradation of gaseous toluene using short-wavelength UV irradiation with TiO₂ catalyst: comparison of there UV sources. Chemosphere 57: 663-671.
- Jo, W.K., Park, J.H. and Chun, H.D. 2002. Photocatalytic destruction of VOCs for in-vehicle air cleaning. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 148: 109-119.
- Lee, S.C., Lam, S. and Fai, H.K. 2001. Characterization of VOCs, ozone, and PM10 emission from office equipment in an environmental chamber. Building and Environment 36: 837-842.
- Liang, W., and Zhao, J. 2009. Photocatalytic degradation of toluene over titanium dioxide thin film. bioinformatics and Biomedical Engineering 3:1-4.
- Liu, Y., Yang, Q., Wei, J.H., Xiong, R., Pan, C.X. and Shi, J. 2011. Synthesis and photocatalytic activity of hydroxyapatite modified nitrogen-doped TiO₂. Materials chemistry and Physics 129: 654 – 659.
- Marcí, G., Addamo, M., Augugliaro, V., Coluccia, S., García, L.E., Loddo, V., Martra, G., Palmisano, L. and Schiavello, M. 2003. Photocatalytic oxidation of toluene on irradiated TiO₂: Comparison of degradation performance in humidified air, in water and in water containing a Zwitterionic surfactant. Photochemistry and Photobiology A 160: 105-114.
- Matsusawa, S., Maneerat, C., Hayata, Y., Hirakawa, T., Negishi, N. and sano, T. 2008. Immobilization of TiO₂ nanoparticles on polymeric substrates by using electrostatic interaction in the aqueous phase. Applied Catalysis B: Environmental 83: 39-45.

- Molhave, L. 1990. Volatile organic compounds, indoor air quality and health. In Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Toronto.
- Negishi, N., He, F., Matsuzawa, S., Takeuchi, K. and Ohno, K. 2006. Wave-guide type photoreactor for water purification. Czech Republic Chemie 9: 822-828.
- Nonami, T., Hase, H. and Funakoshi. 2004. Apatite-coated titanium dioxide photocatalyst for air purification. Catalysis Today 96: 113-118.
- Ollis, D.F., Pelizzetti, E. And Serpone, N. (1991). Destruction of water contaminants. Envir. Sci. Technol 25: 1523 – 1529.
- Ozeki, K., Janurudin, J.M., Aoki, H. and Fukui, Y. 2007. Photocatalytic hydroxyapatite/titanium dioxide multilayer thin film deposited onto glass using an rf magnetron sputtering technique. Applied Surface Science 253: 3397 – 3401.
- Rezaee, A., Pourtaghi, Gh.H., Khavanin, A., Sarraf Mamoori, R., Ghaneian, M.T. and Godini, H. 2008. Photocatalytic decomposition of gaseous toluene by TiO₂ nanoparticles coated on activated carbon. Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng 4:305-310.
- Smyth, J. 2009. Mineral Structure and Property Data TiO₂ Group. [Online]. (n.d.). Available from: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>.: [2011 June 1]
- Sung, M., Kato, S., Kawanami, F. and Sudo, M. 2010. Evaluation of an air-cleaning unit having photocatalytic sheets to remove acetaldehyde from indoor air. Building and Environment 45: 2002-2007.
- Taoda, H., Fukaya, M., Watanabe, E. and Tanaka, K. 2006. VOC Decomposition by Photocatalytic Wall Paper. Materials Science Forum 510-511: 22-25.
- The Quartz Corporation. Glass Fiber. [Online]. 2012. Available from: <http://www.thequartzcorp.com/en/applications/glass-fiber.html>. [2013, March 1]
- Tsoukleris, D.S., Maggos, T., Vassilakos, C. and Falaras, P. 2007. Photocatalytic degradation of volatile organics on TiO₂ embedded glass spherules. Catalysis Today 129: 96 – 101..
- TiPE. 2008. Mechanism of Photocatalysis. [Online]. Available from: <http://www.tipe.com.cn/library/kb2502.htm>. [2011, March 13]
- Zhao, J., and Yang, X. 2003. Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. Building and Environment 38: 645-654.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง Base line

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองสารโพลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศ และปิดไฟ

Time (min)	1 ppm		5 ppm		10 ppm	
	Concentration (ppm)	Efficiency (%)	Concentration (ppm)	Efficiency (%)	Concentration (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285	0.00	5.068	0.00	10.300	0.00
10	1.277	0.62	5.034	0.67	10.000	2.91
20	1.275	0.74	4.921	2.90	9.860	4.27
30	1.263	1.67	4.845	4.40	9.585	6.94
45	1.257	2.14	4.719	6.89	9.272	9.98
60	1.251	2.65	4.614	8.96	9.095	11.70
75	1.240	3.47	4.536	10.49	8.864	13.94
90	1.232	4.13	4.416	12.87	8.669	15.83
105	1.227	4.52	4.308	14.99	8.491	17.56
120	1.216	5.33	4.216	16.81	8.265	19.76
135	1.208	5.99	4.12	18.71	8.102	21.34
150	1.202	6.42	4.041	20.26	7.964	22.68
165	1.197	6.85	4.01	20.88	7.818	24.10
180	1.188	7.55	3.92	22.65	7.664	25.59

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองชุดควบคุม

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับกระดาษกรองควอตซ์ไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์

Time (min)	Concentration (ppm)		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm
0	1.782 ± 0.171	5.599 ± 0.035	10.067 ± 0.895
10	1.689 ± 0.154	5.333 ± 0.126	9.519 ± 0.680
20	1.657 ± 0.154	5.194 ± 0.098	9.202 ± 0.572
30	1.614 ± 0.161	5.106 ± 0.029	8.966 ± 0.664
45	1.576 ± 0.161	4.966 ± 0.004	8.782 ± 0.537
60	1.545 ± 0.153	4.482 ± 0.013	8.533 ± 0.535
75	1.537 ± 0.143	4.793 ± 0.012	8.257 ± 0.472
90	1.514 ± 0.156	4.677 ± 0.059	8.088 ± 0.425
105	1.475 ± 0.150	4.601 ± 0.060	7.978 ± 0.421
120	1.455 ± 0.142	4.521 ± 0.127	7.829 ± 0.482
135	1.426 ± 0.134	4.494 ± 0.148	7.712 ± 0.517
150	1.402 ± 0.141	4.437 ± 0.143	7.609 ± 0.511
165	1.383 ± 0.126	4.390 ± 0.129	7.482 ± 0.477
180	1.362 ± 0.127	4.325 ± 0.148	7.362 ± 0.469

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับกระดาษกรองใยแก้วไม่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์

Time (min)	Concentration (ppm)		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm
0	1.976 ± 0.013	5.217 ± 1.228	10.550 ± 0.354
10	1.914 ± 0.028	4.968 ± 1.168	9.903 ± 0.138
20	1.806 ± 0.035	4.891 ± 1.151	9.683 ± 0.112
30	1.771 ± 0.035	4.763 ± 1.054	9.424 ± 0.093
45	1.752 ± 0.04	4.667 ± 1.068	9.064 ± 0.029
60	1.739 ± 0.049	4.597 ± 1.094	8.844 ± 0.156

Time (min)	Concentration (ppm)		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm
75	1.691 ± 0.038	4.551 ± 1.108	8.638 ± 0.107
90	1.652 ± 0.037	4.480 ± 1.088	8.453 ± 0.067
105	1.613 ± 0.03	4.383 ± 1.082	8.253 ± 0.141
120	1.579 ± 0.027	4.332 ± 1.088	7.970 ± 0.025
135	1.551 ± 0.018	4.270 ± 1.10	7.796 ± 0.019
150	1.527 ± 0.018	4.215 ± 1.107	7.604 ± 0.076
165	1.501 ± 0.02	4.155 ± 1.072	7.466 ± 0.076
180	1.483 ± 0.021	4.107 ± 1.07	7.390 ± 0.127

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองชุดทดสอบการดูดติดผิวของสารโพลีอินลงบนแผ่นฟอกอากาศ

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับกระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์

Time (min)	Concentration (ppm)		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm
0	1.063±0.004	4.920±0.226	10.273±0.462
10	0.988±0.016	4.835±0.177	9.599±0.236
20	0.964±0.013	4.735±0.163	9.337±0.222
30	0.940±0.021	4.635±0.148	9.061±0.192
45	0.912±0.030	4.515±0.134	8.806±0.149
60	0.891±0.028	4.410±0.156	8.551±0.055
75	0.870±0.035	4.285±0.148	8.330±0.018
90	0.850±0.030	4.215±0.177	8.092±0.007
105	0.834±0.032	4.115±0.163	7.865±0.016
120	0.818±0.032	4.050±0.141	7.650±0.002
135	0.807±0.033	3.965±0.163	7.443±0.033
150	0.791±0.039	3.865±0.134	7.282±0.025
165	0.784±0.037	3.795±0.120	7.100±0.031
180	0.771±0.035	3.720±0.170	6.976±0.035

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 1 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะปิดไฟ ร่วมกับกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์

Time (min)	Concentration (ppm)		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm
0	1.260±0.153	4.900±0.529	10.53±1.089
10	1.199±0.158	4.700±0.529	9.841±0.791
20	1.142±0.147	4.500±0.529	9.387±0.868
30	1.119±0.170	4.367±0.569	8.981±0.734
45	1.088±0.157	4.100±0.265	8.669±0.654
60	1.052±0.153	4.000±0.300	8.477±0.740

Time (min)	Concentration (ppm)		
	1 ppm	5 ppm	10 ppm
75	1.019±0.158	3.900±0.300	8.205±0.749
90	0.996±0.161	3.733±0.252	8.070±0.814
105	0.976±0.155	3.700±0.300	7.793±0.606
120	0.951±0.149	3.633±0.252	7.587±0.659
135	0.944±0.146	3.567 ±0.351	7.453±0.747
150	0.924±0.146	3.500±0.300	7.299±0.809
165	0.907±0.145	3.433±0.306	7.158±0.789
180	0.896±0.140	3.333±0.306	6.982±0.756

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองการกำจัดสารโทลูอีนโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ ง-1 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์
เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.219±0.166	0.00
10	1.277±0.104	1.150±0.165	9.88
20	1.275±0.106	1.128±0.158	11.56
30	1.263±0.110	1.099±0.148	12.98
45	1.257±0.103	1.072±0.154	14.69
60	1.251±0.108	1.035±0.134	17.23
75	1.240±0.100	1.000±0.121	19.33
90	1.232±0.107	0.973±0.128	20.99
105	1.227±0.104	0.939±0.124	23.47
120	1.216±0.109	0.915±0.117	24.75
135	1.208±0.110	0.890±0.114	26.32
150	1.202±0.106	0.867±0.108	27.87
165	1.197±0.110	0.855±0.101	28.57
180	1.188±0.118	0.832±0.103	29.94

ตารางที่ ง-1(1) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใย
แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.323±0.025	0.00
10	1.277±0.104	1.250±0.056	2.08
20	1.275±0.106	1.240±0.053	2.75
30	1.263±0.110	1.227±0.046	2.88
45	1.257±0.103	1.187±0.064	5.60
60	1.251±0.108	1.163±0.061	6.97
75	1.240±0.100	1.140±0.060	8.06
90	1.232±0.107	1.110±0.040	9.87

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
105	1.227±0.104	1.070±0.072	12.76
120	1.216±0.109	1.047±0.067	13.93
135	1.208±0.110	1.023±0.064	15.25
150	1.202±0.106	1.000±0.053	16.81
165	1.197±0.110	0.960±0.035	19.77
180	1.188±0.118	0.923±0.031	22.25

ตารางที่ ง-1(2) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้ กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 1.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.341±0.332	0.00
10	1.277±0.104	1.231±0.296	3.56
20	1.275±0.106	1.162±0.288	8.86
30	1.263±0.110	1.095±0.276	13.30
45	1.257±0.103	1.018±0.251	19.05
60	1.251±0.108	0.935±0.214	25.23
75	1.240±0.100	0.890±0.206	28.23
90	1.232±0.107	0.854±0.203	30.69
105	1.227±0.104	0.818±0.194	33.31
120	1.216±0.109	0.785±0.185	35.44
135	1.208±0.110	0.753±0.184	37.64
150	1.202±0.106	0.726±0.173	39.60
165	1.197±0.110	0.690±0.160	42.33
180	1.188±0.118	0.674±0.165	43.28

ตารางที่ ง-1(3) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 1.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.167 ± 0.153	0.00
10	1.277±0.104	1.067 ± 0.153	16.44
20	1.275±0.106	1.060 ± 0.144	16.86
30	1.263±0.110	1.050 ± 0.132	16.86
45	1.257±0.103	1.010 ± 0.182	19.65
60	1.251±0.108	0.970 ± 0.157	22.43
75	1.240±0.100	0.960 ± 0.144	22.58
90	1.232±0.107	0.913 ± 0.121	25.84
105	1.227±0.104	0.907 ± 0.110	26.08
120	1.216±0.109	0.900 ± 0.100	25.99
135	1.208±0.110	0.860 ± 0.144	28.78
150	1.202±0.106	0.857 ± 0.140	28.73
165	1.197±0.110	0.817 ± 0.126	31.75
180	1.188±0.118	0.810 ± 0.115	31.79

ตารางที่ ง-1(4) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.159±0.095	0.00
10	1.277±0.104	1.085±0.093	15.03
20	1.275±0.106	0.997±0.070	21.80
30	1.263±0.110	0.915±0.063	27.53
45	1.257±0.103	0.849±0.057	32.48
60	1.251±0.108	0.766±0.060	38.74
75	1.240±0.100	0.710±0.079	42.77
90	1.232±0.107	0.654±0.088	46.87

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
105	1.227±0.104	0.627±0.077	48.85
120	1.216±0.109	0.599±0.081	50.77
135	1.208±0.110	0.580±0.070	51.97
150	1.202±0.106	0.561±0.067	53.30
165	1.197±0.110	0.536±0.074	55.25
180	1.188±0.118	0.518±0.079	56.35

ตารางที่ ง-1(5) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.267±0.153	0.00
10	1.277±0.104	1.167±0.153	8.60
20	1.275±0.106	1.160±0.144	9.02
30	1.263±0.110	1.120±0.131	11.32
45	1.257±0.103	1.077±0.133	14.35
60	1.251±0.108	1.037±0.158	17.10
75	1.240±0.100	0.990±0.156	20.16
90	1.232±0.107	0.950±0.180	22.86
105	1.227±0.104	0.943±0.169	23.09
120	1.216±0.109	0.900±0.205	25.99
135	1.208±0.110	0.877±0.180	27.40
150	1.202±0.106	0.867±0.169	27.90
165	1.197±0.110	0.853±0.205	28.68
180	1.188±0.118	0.830±0.180	30.11

ตารางที่ ง-2 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	5.117±0.707	0.00
10	5.034±0.433	4.723±0.730	6.17
20	4.921±0.428	4.530±0.690	7.95
30	4.845±0.393	4.317±0.635	10.90
45	4.719±0.386	4.147±0.680	12.13
60	4.614±0.371	3.950±0.636	14.39
75	4.536±0.354	3.723±0.585	17.92
90	4.416±0.337	3.553±0.575	19.54
105	4.308±0.351	3.410±0.536	20.84
120	4.216±0.346	3.310±0.521	21.49
135	4.120±0.345	3.180±0.517	22.82
150	4.041±0.324	3.020±0.450	25.27
165	4.010±0.305	2.927±0.451	27.02
180	3.920±0.305	2.847±0.452	27.38

ตารางที่ ง-2(1) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วนโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	5.000±0.100	0.00
10	5.034±0.433	4.500±0.173	10.61
20	4.921±0.428	4.400±0.100	10.59
30	4.845±0.393	4.267±0.153	11.94
45	4.719±0.386	4.133±0.115	12.41
60	4.614±0.371	4.033±0.058	12.58
75	4.536±0.354	3.933±0.058	13.29

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
90	4.416±0.337	3.933±0.058	10.93
105	4.308±0.351	3.817±0.076	11.41
120	4.216±0.346	3.700±0.100	12.24
135	4.120±0.345	3.667±0.076	11.00
150	4.041±0.324	3.633±0.058	10.09
165	4.010±0.305	3.550±0.050	11.47
180	3.920±0.305	3.467±0.058	11.56

ตารางที่ ง-2(2) ผลการกำจัดสารโพลีอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 1.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	5.057±0.516	0.00
10	5.034±0.433	4.730±0.501	6.04
20	4.921±0.428	4.470±0.463	9.16
30	4.845±0.393	4.347±0.458	10.29
45	4.719±0.386	4.157±0.385	11.92
60	4.614±0.371	3.930±0.375	14.82
75	4.536±0.354	3.730±0.386	17.77
90	4.416±0.337	3.567±0.297	19.23
105	4.308±0.351	3.460±0.295	19.68
120	4.216±0.346	3.280±0.304	22.20
135	4.120±0.345	3.167±0.264	23.14
150	4.041±0.324	3.070±0.269	24.03
165	4.010±0.305	2.910±0.225	27.43
180	3.920±0.305	2.800±0.225	28.57

ตารางที่ ง-2(3) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 1.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.833±0.651	0.00
10	5.034±0.433	4.367±0.651	13.26
20	4.921±0.428	4.300±0.700	12.62
30	4.845±0.393	4.167±0.651	14.00
45	4.719±0.386	4.100±0.700	13.12
60	4.614±0.371	3.967±0.551	14.03
75	4.536±0.354	3.800±0.500	16.23
90	4.416±0.337	3.667 ± 0.451	16.97
105	4.308±0.351	3.600 ± 0.400	16.43
120	4.216±0.346	3.567 ± 0.351	15.40
135	4.120±0.345	3.467 ± 0.351	15.86
150	4.041±0.324	3.367 ± 0.351	16.69
165	4.010±0.305	3.300 ± 0.300	17.71
180	3.920±0.305	3.200 ± 0.300	18.37

ตารางที่ ง-2(4) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.820±0.351	0.00
10	5.034±0.433	4.500±0.331	10.61
20	4.921±0.428	4.280±0.312	13.03
30	4.845±0.393	4.100±0.315	15.38
45	4.719±0.386	3.847±0.352	18.49
60	4.614±0.371	3.667±0.358	20.53
75	4.536±0.354	3.457±0.376	23.79

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
90	4.416±0.337	3.300±0.410	25.27
105	4.308±0.351	3.143±0.373	27.03
120	4.216±0.346	3.003±0.395	28.76
135	4.120±0.345	2.850±0.364	30.83
150	4.041±0.324	2.733±0.363	32.36
165	4.010±0.305	2.617±0.351	34.75
180	3.920±0.305	2.510±0.358	35.97

ตารางที่ ง-2(5) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.600±0.424	0.00
10	5.034±0.433	4.100±0.566	18.55
20	4.921±0.428	3.900±0.424	20.75
30	4.845±0.393	3.850±0.354	20.54
45	4.719±0.386	3.600±0.424	23.71
60	4.614±0.371	3.450±0.354	25.23
75	4.536±0.354	3.425±0.318	24.49
90	4.416±0.337	3.400±0.283	23.01
105	4.308±0.351	3.285±0.191	23.75
120	4.216±0.346	3.150±0.071	25.28
135	4.120±0.345	3.120±0.042	24.27
150	4.041±0.324	2.930±0.099	27.49
165	4.010±0.305	2.860±0.156	28.68
180	3.920±0.305	2.800±0.141	28.57

ตารางที่ ง-3 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.482±0.995	0.00
10	10.000±0.713	9.696±0.885	3.04
20	9.860±0.534	9.353±0.769	5.14
30	9.585±0.424	9.060±0.699	5.47
45	9.272±0.368	8.636±0.620	6.86
60	9.095±0.343	8.278±0.595	8.98
75	8.864±0.344	7.917±0.546	10.68
90	8.669±0.358	7.556±0.487	12.84
105	8.491±0.360	7.250±0.471	14.62
120	8.265±0.366	6.964±0.464	15.74
135	8.102±0.360	6.668±0.428	17.70
150	7.964±0.409	6.413±0.403	19.48
165	7.818±0.444	6.214±0.380	20.52
180	7.664±0.480	5.954±0.318	22.31

ตารางที่ ง-3(1) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใย
แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 0.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.27±0.920	0.00
10	10.000±0.713	9.563±0.881	4.37
20	9.860±0.534	9.288±0.832	5.80
30	9.585±0.424	8.898±0.728	7.16
45	9.272±0.368	8.651±0.813	6.70
60	9.095±0.343	8.291±0.650	8.84
75	8.864±0.344	8.024±7.781	9.48

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
90	8.669±0.358	7.781±0.592	10.24
105	8.491±0.360	7.485±0.548	11.84
120	8.265±0.366	7.298±0.608	11.70
135	8.102±0.360	7.063±0.511	12.82
150	7.964±0.409	6.876±0.518	13.66
165	7.818±0.444	6.733±0.484	13.88
180	7.664±0.480	6.581±0.482	14.13

ตารางที่ ง-3(2) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 1.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.176±0.596	0.00
10	10.000±0.713	9.320±0.413	6.80
20	9.860±0.534	8.872±0.476	10.02
30	9.585±0.424	8.482±0.417	11.51
45	9.272±0.368	7.867±0.330	15.15
60	9.095±0.343	7.422±0.295	18.39
75	8.864±0.344	6.925±0.273	21.87
90	8.669±0.358	6.516±0.234	24.83
105	8.491±0.360	6.156±0.187	27.50
120	8.265±0.366	5.806±0.180	29.75
135	8.102±0.360	5.469±0.136	32.49
150	7.964±0.409	5.174±0.123	35.03
165	7.818±0.444	4.864±0.108	37.79
180	7.664±0.480	4.589±0.135	40.13

ตารางที่ ง-3(3) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 1.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.517±0.927	0.00
10	10.000±0.713	9.652±0.807	3.48
20	9.860±0.534	9.211±0.671	6.58
30	9.585±0.424	8.905±0.634	7.10
45	9.272±0.368	8.552±0.765	7.77
60	9.095±0.343	8.215±0.777	9.68
75	8.864±0.344	7.808±0.616	11.92
90	8.669±0.358	7.597±0.565	12.37
105	8.491±0.360	7.333±0.613	13.63
120	8.265±0.366	6.995±0.498	15.37
135	8.102±0.360	6.846±0.518	15.50
150	7.964±0.409	6.618±0.554	16.90
165	7.818±0.444	6.436±0.516	17.67
180	7.664±0.480	6.254±0.459	18.39

ตารางที่ ง-3(4) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.011±0.416	0.00
10	10.000±0.713	9.240±0.479	7.60
20	9.860±0.534	8.717±0.491	11.59
30	9.585±0.424	8.270±0.494	13.72
45	9.272±0.368	7.668±0.412	17.30
60	9.095±0.343	7.149±0.369	21.40
75	8.864±0.344	6.675±0.391	24.69

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
90	8.669±0.358	6.277±0.350	27.59
105	8.491±0.360	5.893±0.361	30.60
120	8.265±0.366	5.489±0.305	33.59
135	8.102±0.360	5.191±0.294	35.93
150	7.964±0.409	4.925±0.330	38.16
165	7.818±0.444	4.613±0.358	41.00
180	7.664±0.480	4.378±0.282	42.88

ตารางที่ ง-3(5) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.907±1.829	0.00
10	10.000±0.713	9.514±0.970	4.86
20	9.860±0.534	8.856±0.841	10.18
30	9.585±0.424	8.462±0.762	11.72
45	9.272±0.368	8.136±0.874	12.25
60	9.095±0.343	7.883±0.861	13.33
75	8.864±0.344	7.489±0.955	15.51
90	8.669±0.358	7.283±0.975	15.99
105	8.491±0.360	7.014±0.852	17.40
120	8.265±0.366	6.819±0.896	17.50
135	8.102±0.360	6.542±0.892	19.26
150	7.964±0.409	6.367±0.838	20.06
165	7.818±0.444	6.198±0.711	20.73
180	7.664±0.480	5.998±0.757	21.74

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองการกำจัดสารโพลีอินทรีย์ใช้หลอดแบคทีไลท์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ จ-1 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์ เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.227±0.136	0.00
10	1.277±0.104	0.480±0.105	62.40
20	1.275±0.106	0.147±0.031	88.50
30	1.263±0.110	0.060±0.000	95.25
45	1.257±0.103	0.053±0.013	95.81

ตารางที่ จ-1(1) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.233±0.153	0.00
10	1.277±0.104	0.433±0.058	66.05
20	1.275±0.106	0.133±0.026	89.54
30	1.263±0.110	0.070±0.006	94.46
45	1.257±0.103	0.027±0.001	97.88
60	1.251±0.108	0.009 ± 0.001	99.25
75	1.240±0.100	0.006 ± 0.004	99.52
90	1.232±0.107	0.005 ± 0.004	99.58
105	1.227±0.104	0.005 ± 0.005	99.58
120	1.216±0.109	0.002 ± 0.005	99.81

ตารางที่ จ-1(2) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.313±0.101	0.00
10	1.277±0.104	0.303±0.060	76.24
20	1.275±0.106	0.097±0.025	92.42
30	1.263±0.110	0.063±0.021	94.99

ตารางที่ จ-1(3) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.400±0.265	0.00
10	1.277±0.104	0.400±0.100	68.66
20	1.275±0.106	0.090±0.017	92.94
30	1.263±0.110	0.040±0.010	96.83
45	1.257±0.103	0.020±0.010	98.41
60	1.251±0.108	0.012 ± 0.007	99.04
75	1.240±0.100	0.006 ± 0.004	99.54

ตารางที่ จ -1(4) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.227±0.071	0.00
10	1.277±0.104	0.167±0.032	86.94
20	1.275±0.106	0.032±0.035	97.46
30	1.263±0.110	0.029±0.029	97.72

ตารางที่ จ-1(5) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	1.285±0.101	1.400 ± 0.00	0.00
10	1.277±0.104	0.450 ± 0.283	64.75
20	1.275±0.106	0.060 ± 0.057	95.29
30	1.263±0.110	0.030 ± 0.028	97.62
45	1.257±0.103	0.014 ± 0.009	98.93

ตารางที่ จ-2 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองควอตซ์
 แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	5.547±0.791	0.00
10	5.034±0.433	3.310±0.782	34.25
20	4.921±0.428	1.943±0.546	60.51
30	4.845±0.393	1.027±0.427	78.81
45	4.719±0.386	0.410±0.180	91.31
60	4.614±0.371	0.237±0.031	94.87

ตารางที่ จ-2(1) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใย
 แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.533±0.208	0.00
10	5.034±0.433	2.967±0.289	41.07
20	4.921±0.428	1.933±0.231	60.71
30	4.845±0.393	1.200±0.173	75.23
45	4.719±0.386	0.600±0.100	87.29
60	4.614±0.371	0.300±0.000	93.50
75	4.536±0.354	0.167 ± 0.058	96.33
90	4.416±0.337	0.100 ± 0.003	97.74
105	4.308±0.351	0.087 ± 0.006	97.99
120	4.216±0.346	0.073 ± 0.012	98.26
135	4.120±0.345	0.057 ± 0.012	98.62
150	4.041±0.324	0.043 ± 0.015	98.93
165	4.010±0.305	0.040 ± 0.020	99.00
180	3.920±0.305	0.033 ± 0.015	99.15

ตารางที่ จ-2(2) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.980±1.73	0.00
10	5.034±0.433	2.563±1.01	49.08
20	4.921±0.428	1.013±0.52	79.41
30	4.845±0.393	0.453±0.20	90.64
45	4.719±0.386	0.220±0.04	95.34

ตารางที่ จ-2(3) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใย
แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.500±0.346	0.00
10	5.034±0.433	2.233±1.067	55.64
20	4.921±0.428	1.067±0.503	78.32
30	4.845±0.393	0.500±0.300	89.68
45	4.719±0.386	0.197±0.176	95.83
60	4.614±0.371	0.113 ± 0.078	97.54
75	4.536±0.354	0.060 ± 0.035	98.68
90	4.416±0.337	0.050 ± 0.044	98.87
105	4.308±0.351	0.040 ± 0.044	99.07
120	4.216±0.346	0.037 ± 0.038	99.13

ตารางที่ จ-2(4) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	5.433±0.987	0.00
10	5.034±0.433	1.650±0.304	67.22
20	4.921±0.428	0.310±0.017	93.70
30	4.845±0.393	0.130±0.020	97.32
45	4.719±0.386	0.117±0.042	97.53

ตารางที่ จ-2(5) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใย
แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	5.068±0.492	4.950 ± 0.495	0.00
10	5.034±0.433	1.950 ± 0.354	61.26
20	4.921±0.428	0.500 ± 0.283	89.84
30	4.845±0.393	0.150 ± 0.071	96.90
45	4.719±0.386	0.085 ± 0.021	98.20
60	4.614±0.371	0.050 ± 0.014	98.92
75	4.536±0.354	0.040 ± 0.014	99.12
90	4.416±0.337	0.020 ± 0.028	99.55
105	4.308±0.351	0.005 ± 0.007	99.88

ตารางที่ จ-3 ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.330 ± 0.868	0.00
10	10.000±0.713	8.556 ± 0.734	14.44
20	9.860±0.534	6.984 ± 0.802	29.17

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
30	9.585±0.424	5.682 ± 0.759	40.72
45	9.272±0.368	4.109 ± 0.646	55.69
60	9.095±0.343	2.928 ± 0.436	67.80
75	8.864±0.344	2.095 ± 0.461	76.36
90	8.669±0.358	1.450 ± 0.416	83.27
105	8.491±0.360	1.070 ± 0.284	87.40
120	8.265±0.366	0.802 ± 0.210	90.30
135	8.102±0.360	0.493 ± 0.060	93.92

ตารางที่ จ-3(1) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 52 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	9.377 ± 0.730	0.00
10	10.000±0.713	7.632 ± 0.568	23.69
20	9.860±0.534	6.337 ± 0.371	35.73
30	9.585±0.424	5.175 ± 0.298	46.01
45	9.272±0.368	3.881 ± 0.035	58.15
60	9.095±0.343	2.709 ± 0.000	70.21
75	8.864±0.344	1.941 ± 0.029	78.11
90	8.669±0.358	1.342 ± 0.045	84.52
105	8.491±0.360	0.943 ± 0.106	88.89
120	8.265±0.366	0.670 ± 0.112	91.90
135	8.102±0.360	0.550 ± 0.100	93.21

ตารางที่ จ-3(2) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.657±1.193	0.00
10	10.000±0.713	7.044±0.666	29.56
20	9.860±0.534	4.521±0.223	54.15
30	9.585±0.424	2.940±0.144	69.33
45	9.272±0.368	1.497±0.062	83.86
60	9.095±0.343	0.770±0.058	91.53
75	8.864±0.344	0.550±0.071	93.80

ตารางที่ จ-3(3) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใย
แก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 124 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	9.505±0.701	0.00
10	10.000±0.713	6.482±0.350	35.19
20	9.860±0.534	4.400±0.238	55.38
30	9.585±0.424	2.950±0.157	69.22
45	9.272±0.368	1.550±0.105	83.29
60	9.095±0.343	0.815±0.091	91.04
75	8.864±0.344	0.502±0.066	94.34

ตารางที่ จ-3(4) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรอง
ควอตซ์เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	10.614 ± 0.795	0.00
10	10.000±0.713	5.858 ± 0.732	41.42
20	9.860±0.534	3.261 ± 0.791	66.93
30	9.585±0.424	1.655 ± 0.536	82.73

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
45	9.272±0.368	0.687 ± 0.252	92.59
60	9.095±0.343	0.379 ± 0.172	95.84
75	8.864±0.344	0.200 ± 0.100	97.74

ตารางที่ จ-3(5) ผลการกำจัดสารโทลูอินความเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Time (min)	concentration in (ppm)	concentration out (ppm)	Efficiency (%)
0	10.300±0.586	9.149±0.569	0.00
10	10.000±0.713	5.083±0.319	49.18
20	9.860±0.534	2.542±0.211	74.22
30	9.585±0.424	1.235±0.011	87.12
45	9.272±0.368	0.425±0.126	95.42

ภาคผนวก จ
ผลการทดลองการกำจัดสารโพลีอินโดยใช้แสงยูวี

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะเปิดไฟ จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ ความเข้มแสงยูวี 2.1 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับกระดาษกรองควอตซ์ไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์

Time (min)	Concentration (ppm)		
	No filter	Uncoated-Quartz Fiber	Uncoated-Glass Fiber
0	5.14 ± 0.170	5.420 ± 0.879	5.276 ± 0.303
10	4.929 ± 0.280	5.088 ± 0.960	5.020 ± 0.338
20	4.731 ± 0.251	4.920 ± 0.862	4.868 ± 0.307
30	4.573 ± 0.206	4.796 ± 0.798	4.773 ± 0.327
45	4.400 ± 0.173	4.665 ± 0.793	4.663 ± 0.341
60	4.252 ± 0.149	4.522 ± 0.738	4.600 ± 0.384
75	4.105 ± 0.139	4.428 ± 0.669	4.501 ± 0.361
90	3.969 ± 0.075	4.335 ± 0.602	4.439 ± 0.376
105	3.862 ± 0.084	4.266 ± 0.571	4.379 ± 0.355
120	3.794 ± 0.081	4.187 ± 0.552	4.339 ± 0.389
135	3.713 ± 0.049	4.125 ± 0.523	4.293 ± 0.402
150	3.637 ± 0.040	4.057 ± 0.480	4.267 ± 0.414
165	3.568 ± 0.018	3.980 ± 0.457	4.228 ± 0.410
180	3.491 ± 0.019	3.933 ± 0.470	4.202 ± 0.427

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองสารโทลูอินความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ทดลองในสภาวะเปิดไฟ จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ ความเข้มแสงยูวี 187 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับกระดาษกรองใยแก้วไม่เคลือบไททานเนียมไดออกไซด์

Time (min)	Concentration (ppm)		
	No filter	Uncoated-Quartz Fiber	Uncoated-Glass Fiber
0	5.451 ± 0.363	5.398 ± 0.363	4.605 ± 0.497
10	5.102 ± 0.390	5.200 ± 0.282	4.331 ± 0.482
20	4.930 ± 0.436	5.038 ± 0.211	4.189 ± 0.508
30	4.787 ± 0.483	4.912 ± 0.220	4.144 ± 0.515

45	4.622 ± 0.464	4.795 ± 0.173	4.009 ± 0.528
60	4.507 ± 0.462	4.695 ± 0.205	3.853 ± 0.559
75	4.410 ± 0.429	4.603 ± 0.211	3.782 ± 0.548
90	4.313 ± 0.415	4.529 ± 0.206	3.700 ± 0.565
105	4.233 ± 0.376	4.456 ± 0.221	3.646 ± 0.583
120	4.168 ± 0.346	4.398 ± 0.226	3.589 ± 0.597
135	4.119 ± 0.352	4.334 ± 0.232	3.522 ± 0.619
150	4.051 ± 0.298	4.288 ± 0.226	3.472 ± 0.611
165	3.995 ± 0.257	4.222 ± 0.233	3.454 ± 0.573
180	3.955 ± 0.250	4.150 ± 0.212	3.415 ± 0.565

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพลอย สุจริตธรรม เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

ผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ เรื่อง Efficiency of Titanium Dioxide Coated Glass Fiber Filter for Toluene Removal by Photocatalysis Process ในการประชุมวิชาการแห่งชาติครั้งที่ 9 จัดที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 6-7 ธันวาคม 2555