การกำจัดแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก

นางสาวพรรณิกา วนะรมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
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.

REMOVAL OF AIRBORNE BACTERIA
USING PHOTOCATALYTIC AIR PURIFIER SHEET

Miss Punnika Wanarom

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	การกำจัดแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก
โดย	นางสาวพรรณิกา วนะรมย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยะวงค์)

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

พรรณิกา วนะรมย์ : การกำจัดแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก (REMOVAL OF AIRBORNE BACTERIA USING PHOTOCATALYTIC AIR PURIFIER SHEET) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศ โดยทำการทดลองในห้องทดลองจำลองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร (1,000 ลิตร) ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5 ด้วยเชื้อแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ คือ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ในการทดลองใช้แผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกขนาด 0.23 ตารางเมตร ช่วงเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที และใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 ประเภทที่มีความเข้มแสงแตกต่างกัน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสง 1.0 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสง 70 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสง 270 ไมโครวัตต์สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศได้ดีที่สุด และมีค่าคงที่อัตราการกำจัดสูงสุดเช่นกัน โดยประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 45.93 และ 81.92 ตามลำดับ และค่าคงที่อัตราการกำจัดเท่ากับ 0.0053 นาที$^{-1}$ และ 0.0258 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองในแต่ละความเข้มแสงยูวีของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองชนิด พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p=0.000) และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด พบว่าสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p=0.000-0.004)

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5370298921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : PHOTOCATALYTIC PROCESS / INDOOR AIR / *BACILLUS SUBTILIS* / *STAPHYLOCOCCUS EPIDERMIDIS* / TITANIUM DIOXIDE

PUNNIKA WANAROM : REMOVAL OF AIRBORNE BACTERIA USING PHOTOCATALYTIC AIR PURIFIER SHEET. ADVISOR: ASSOC. PROF. WONGPUN LIMPASENI, CO-ADVISOR: ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., 134 pp.

The research aim to study the efficiency of photocatalytic air purifier sheet to remove bacteria in the indoor air. The experiment used 1 m^3 chamber (1,000 Liter), temperature was controlled at 25±2 °c and relative humidity was at 60 ±5 %. The experiment employed two strains of bacterial, which were *Bacillus subtilis* and *Staphylococcus epidermidis*. The area of air purifier sheet was 0.23 m^2. The reaction time was 120 minutes. The experiment used UV light from two light sources, which were Fluorescent lamp at intensity of 1.0, 3.0, and 3.7 μW/cm^2 and Blacklight lamp at intensity of 70, 220, and 270 μW/cm^2. The results showed that Blacklight lamp at 270 μW/cm^2 of UV intensity had the best removal of both bacteria as well as the maximum removal rate constant. The removal efficiency for *Bacillus subtilis* and *Staphylococcus epidermidis* was 45.93 and 81.92 %, respectively, while the removal rate constant was 0.0053 $min^{-1}$and 0.0258 min^{-1}, respectively. The statistical analysis of removal efficiency of different UV light intensity from two light sources showed significant difference at 95% confidence limit (p=0.000). The removal efficiency of *Staphylococcus epidermidis* was higher than *Bacillus subtilis* having significant difference at 95% confidence limit (p=0.000-0.004).

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยพระคุณของรองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้กำลังใจและสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยะวงค์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี ช่วยบำรุง ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และได้สละเวลาให้คำปรึกษา รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี ช่วยบำรุง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมทั้งอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ “ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย” ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ “บริษัท ไอเคเอส จำกัด” ในการเอื้อเฟื้อแผ่นฟอกอากาศ ชิเซ็น แอร์คลีน เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง และนายพิทวัส กัลยา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกด้าน ให้กำลังใจ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 คุณภาพอากาศภายในอาคาร 4
2.2 จุลินทรีย์ในอากาศ 5
2.2.1 แหล่งกำเนิดของจุลินทรีย์ในอากาศ 6
2.2.2 การแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในอากาศ 7
2.3 แบคทีเรีย 7
2.3.1 สัณฐานวิทยา 7
2.3.2 การเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ 8
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย 10
2.3.4 แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค 11
2.4 รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet ray) 13
2.4.1 หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต 14
2.4.1.1 การป้องกันจากรังสีอัลตราไวโอเลต 15
2.4.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) 15
2.4.3 หลอดแบล็คไลท์ (Blacklight lamp) 16

หน้า

2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส (Photocatalysis Process) 17
2.5.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส (Fundamental of Photocatalysis Reaction) 17
2.5.2 องค์ประกอบของกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส 18
2.5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส 18
2.5.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ในสถานะก๊าซ 20
2.6 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) 21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 29
3.1 แผนการทดลอง 29
3.2 ตัวแปรในการทดลอง 31
3.3 อุปกรณ์ในงานวิจัย 31
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง 31
3.3.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย 34
3.4 อาหารเลี้ยงเชื้อและชนิดของแบคเรีย 34
3.5 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 35
3.5.1 สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง 35
3.5.2 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดแบคทีเรีย 35
3.6 วิธีดำเนินงานวิจัย 35
3.7 การวิเคราะห์ผลการศึกษา 40
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 41
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย 42
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ 42
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) 42
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟอกอากาศโดยใช้วิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) 43
4.1.3 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 44

หน้า

4.1.4 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) 45
4.2 ลักษณะการเจริญและรูปร่างของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* 45
4.3 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* 47
4.3.1 การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคเรีย *Bacillus subtilis* ในอากาศ (Baseline) หรือชุดควบคุม 47
4.3.2 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน 48
4.3.3 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน 50
4.4 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* 52
4.4.1 การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศ (Baseline) หรือชุดควบคุม 52
4.4.2 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน 53
4.4.3 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน 55
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่างสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศของแต่ละแหล่งกำเนิดแสง 57
4.5.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ระหว่างไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ 57
4.5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้หลอดแบล็คไลท์ ระหว่างไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ 59
4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* 62
4.7 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส 64

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 67
5.1 สรุปผลการวิจัย 67
5.2 ข้อเสนอแนะ 69
5.3 ความสำคัญเชิงวิศวกรรม 69
รายการอ้างอิง 70
ภาคผนวก 76
ภาคผนวก ก ผลการทดลองประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* 77
ภาคผนวก ข ผลการทดลองประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* 88
ภาคผนวก ค ค่าคงที่อัตราการกำจัดของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* 99
ภาคผนวก ง ค่าคงที่อัตราการกำจัดของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* 105
ภาคผนวก จ วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศซิเซน แอร์คลีน 111
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 123
ภาคผนวก ช การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ 131
ภาคผนวก ซ การทดสอบความเที่ยงตรงของปั๊มดูดอากาศ 133
ภาคผนวก ฌ การเทียบความขุ่นด้วยวิธี McFarland Standard 135
ภาคผนวก ญ การย้อมสีแกรม (Gram stain) 137
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 139

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 เกณฑ์แนะนำปริมาณจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคาร 4

2.2 ชนิดและขนาดของจุลินทรีย์ในอากาศทั่วไป....5

3.1 แผนการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก 30

4.1 ชนิดและปริมาณธาตุที่พบในแผ่นฟอกอากาศจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectromete (XRF) 43

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* กับเวลาที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน....51

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* กับเวลาที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน 56

ก-1 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองควบคุม....78

ก-2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 $\mu W/cm^2$)....79

ก-3 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 $\mu W/cm^2$) 80

ก-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 $\mu W/cm^2$)....83

ก-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$)....86

ก-6 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$) 87

ข-1 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองควบคุม (Baseline) 89

ข-2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ Staphylococcus epidermidis ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 μW/cm2) 90

ข-3 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 $\mu W/cm^2$)....91

หน้า

ข-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 μW/cm^2) 94

ข-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 μW/cm^2).....97

ข-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 270 μW/cm^2).....98

ค-1 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดควบคุม (Baseline) 100

ค-2 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 μW/cm^2) 100

ค-3 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 μW/cm^2).....101

ค-4 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 μW/cm^2).....102

ค-5 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 μW/cm^2).....104

ค-6 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว(ความเข้มแสงยูวี 270 μW/cm^2).....104

ง-1 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองควบคุม (Baseline) 106

ง-2 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 μW/cm^2).....106

ง-3 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (โดยใช้ความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 μW/cm^2) 107

ง-4 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (โดยใช้ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 μW/cm^2) 108

ง-5 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 μW/cm^2).....110

หน้า

ง-6 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดแบล็คไลท์อย่างเดียว ((ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$).....110

ฉ-1 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่มีความเข้มแสงแตกต่างกัน.....124

ฉ-2 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่มีความเข้มแสงแตกต่างกัน 124

ฉ-3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ.....125

ฉ-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ.....126

ฉ-5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยใช้หลอดแบล็คไลท์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ.....127

ฉ-6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* โดยใช้หลอดแบล็คไลท์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ...128

ฉ-7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* 129

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สเปคตรัมรังสีอัลตราไวโอเลต	14
2.2	โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์	16
2.3	กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสบนสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์	17
2.4	โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์	22
3.1	ขั้นตอนการศึกษา	29
3.2	เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น	32
3.3	เครื่องวัดความเข้มแสง (Radiometer)	32
3.4	เครื่องเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ Bio Impactor แบบชั้นเดียว	33
3.5	เครื่องพ่นจุลินทรีย์ (Nebulizer)	33
3.6	แผ่นฟอกอากาศชิเซน แอร์คลีน	34
3.7	ห้องทดลองแบบทีละเท	37
4.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	43
4.2	ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	44
4.3	ลักษณะทางกายภาพของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*	46
4.4	ลักษณะทางกายภาพของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*	46
4.5	การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคเรีย *Bacillus subtilis* ในอากาศ (Baseline)	47
4.6	ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน	49
4.7	อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน	50
4.8	ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน	51
4.9	การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศ (Baseline)	52

หน้า

4.10 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน.....53
4.11 อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน.....55
4.12 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน.....56
4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ในสภาวะที่มีและไม่มีแผ่นฟอกอากาศด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์.....57
4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ในสภาวะที่มีและไม่มีแผ่นฟอกอากาศด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์.....61
4.15 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่าง เชื้อ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน.....62
4.16 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน.....64
4.17 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์.....65
ซ-1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดสอบความเที่ยงตรงของปั๊มดูดอากาศ.....134

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษอากาศภายในอาคารมีความสำคัญต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยจากการศึกษาขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) พบว่ามลพิษอากาศภายในอาคารมีความเสี่ยงต่อผลกระทบด้านสุขภาพของมนุษย์มากขึ้น เมื่อเทียบกับมลพิษภายนอกอาคาร (U.S.EPA, 1987 อ้างถึงใน Vohra และคณะ, 2006) เนื่องจากปัจจุบันมนุษย์ส่วนใหญ่จะใช้เวลาอยู่ในอาคารไม่ว่าจะเป็นสถานที่ทำงาน บ้าน และโรงเรียน ถึงร้อยละ 80- 90 จึงอาจจะส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งทางร่างกายและจิตใจด้วย

แหล่งมลพิษทางอากาศที่ก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร ได้แก่ สิ่งของเครื่องใช้อุปกรณ์ต่างๆ กิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงมลพิษอากาศจากภายนอกอาคารที่ปนเปื้อนเข้าสู่อาคาร ซึ่งมลพิษที่สำคัญในอากาศจะประกอบไปด้วย อนุภาคแขวนลอยในอากาศ ฝุ่นละออง และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น ไรฝุ่น รา แบคทีเรีย และไวรัส เป็นต้น โดยราจะมีขนาดอนุภาคระหว่าง 10 ถึง 30 ไมโครเมตร แบคทีเรียมีขนาดระหว่าง 0.4 ถึง 5 ไมโครเมตร ส่วนไวรัสจะมีขนาดระหว่าง 0.003 ถึง 0.06 ไมโครเมตร ซึ่งโดยทั่วไปมักเกาะตัวอยู่กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าในอากาศ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของมลพิษทางอากาศภายในอาคาร ถึงแม้จะพบโดยปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจ ผู้ที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่อง ระบบทางเดินอาหาร โรคที่เกิดจากการติดเชื้อต่างๆ และผู้ที่ร่างกายอยู่ในสภาวะอ่อนแอ เป็นต้น ดังนั้นการลดปริมาณจุลินทรีย์ที่มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดภายในอาคาร จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อสุขภาพของมนุษย์เป็นอย่างมาก ในปัจจุบันจึงมีผู้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการควบคุมจุลินทรีย์ในอากาศและทำการศึกษาวิจัยเพิ่มมากขึ้น

ตัวอย่างงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมจุลินทรีย์ในอากาศ เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต (Nicas และ Miller, 1999; Noakes, Fletcher, Beggs, Sleigh และ Kerr, 2004) การใช้พลังงานความร้อน (Lee และ Lee, 2006; Mullican, Buchanan และ Hoffman, 1971) และการกรอง เป็นต้น แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่โดยมีการนำเอากระบวนการโฟโต-คะตะไลซีส ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตมาใช้กำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) (สรรค์ จิตรใคร่ครวญ, 2552) กระบวนการดังกล่าวสามารถทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งอัตราการ

ทำลายจะแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ เนื่องจากมีโครงสร้างและความหนาของผนังเซลล์ต่างกัน (Huang และคณะ, 2000) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากมีความเสถียร ราคาถูก และสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศของแผ่นฟอกอากาศที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะกระตุ้นด้วยแสงจากแหล่งกำเนิดแสงต่างชนิดกัน และมีความเข้มแสงยูวีที่แตกต่างกันโดยเชื้อแบคทีเรียที่นำมาทดสอบ คือ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ซึ่งเป็นตัวแทนของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกที่มีสปอร์และไม่มีสปอร์ที่พบได้ทั่วไปในอากาศ ซึ่งสามารถทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินอาหารและระบบทางเดินหายใจ นอกจากนี้ในงานวิจัยยังจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นฟอกอากาศ ได้แก่ ชนิดของแบคทีเรีย ความเข้มแสง และเวลาทำปฏิกิริยาอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก

2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ ชนิดของแบคทีเรีย ความเข้มแสง และเวลาทำปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการคุณภาพอากาศ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ห้องทดลองจำลองที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบทีละเท (Batch Chamber) ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร (1,000 ลิตร) มีการควบคุมอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5

3. ใช้แผ่นฟอกอากาศที่เคลือบสารไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งในการทดลองใช้แผ่นฟอกอากาศ ชิเซน แอร์คลีน จากประเทศญี่ปุ่น นำเข้าโดย บริษัท ไอเคเอส จำกัด โดยติดแผ่นฟอกอากาศที่ผนังห้องทดลองจำลอง ซึ่งเลียนแบบรูปแบบการใช้งานของแผ่นฟอกอากาศในการใช้งานจริง

4. เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบคือ *Bacillus subtilis* (TISTR 008) และ *Staphylococcus epidermidis* (TISTR 518) โดยเป็นเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์บริสุทธิ์ (Pure culture) ที่ได้จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

5. ใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่มีความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

6. เก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศด้วยเครื่องไบโออิมแพคเตอร์แบบชั้นเดียว (Single-stage viable cascade impactor) ชนิด 400 รู โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) ที่อัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามวิธีการเก็บตัวอย่างมาตรฐานของ NIOSH Method 0800 และ0801

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการติดตั้งแผ่นฟอกอากาศเพื่อควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในสถานที่ที่มีปริมาณจุลินทรีย์ในอากาศเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด เช่น โรงพยาบาล อาคารสำนักงาน และโรงเรียน เป็นต้น ซึ่งทำให้คุณภาพอากาศภายในอาคารดีขึ้น และนำผลงานวิจัยไปใช้ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศชนิดอื่นต่อไป

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณภาพอากาศภายในอาคาร

คุณภาพอากาศภายในอาคาร หมายถึง อากาศภายในอาคารซึ่งอาจมีสิ่งเจือปนอยู่รอบๆ ตัวของมนุษย์ ถ้ามีสิ่งเจือปนในปริมาณที่ไม่มากก็จะถือว่าเป็นคุณภาพอากาศที่ดี แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สิ่งมีชีวิตอื่นๆ หรือต่อสิ่งแวดล้อมภายในอาคารก็จะถือว่าเป็นมลพิษอากาศ ซึ่งจากการศึกษาขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) พบว่ามลพิษอากาศภายในอาคารสูงกว่าภายนอกอาคาร 2-5 เท่า (U.S.EPA, 1995) และมลพิษอากาศภายในอาคารมีความเสี่ยงต่อผลกระทบด้านสุขภาพของมนุษย์มากขึ้น เมื่อเทียบกับมลพิษภายนอกอาคาร (U.S.EPA, 1987 อ้างถึงใน Vohra และคณะ, 2006) เนื่องจากในปัจจุบันคนส่วนใหญ่ใช้เวลาอยู่ภายในอาคารประมาณร้อยละ 80 - 90 ของเวลาทั้งวัน ดังนั้นอาจส่งผลเสียซึ่งก่อให้อันตรายต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารได้

มลพิษอากาศภายในอาคารที่สำคัญ ได้แก่ ฝุ่นละออง สารเคมี ก๊าซต่างๆ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไนโตรเจน เป็นต้น รวมถึงจุลชีพที่แขวนลอยในอากาศไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส (วันทนี พันธุ์ประสิทธิ์, 2549) โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์ถือว่าเป็นมลพิษอากาศที่สำคัญภายในอาคาร สามารถแพร่กระจายในอากาศได้ดี เช่น แบคทีเรีย ไวรัส และรา จึงก่อให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารและอาจทำให้เกิดโรคติดต่อต่างๆ ต่อผู้ที่สัมผัสมลพิษอยู่เป็นประจำ ดังนั้นการหาแนวทางที่เหมาะสมในการควบคุมและป้องการแพร่กระจายในอากาศของจุลินทรีย์จึงเป็นสิ่งสำคัญ ในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณแบคทีเรียในอากาศภายในอาคาร แต่มีข้อแนะนำค่าที่ยอมรับได้ของปริมาณแบคทีเรียในอากาศขององค์การอนามัยโลก (WHO) และประเทศเกาหลีใต้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์แนะนำปริมาณจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคาร

มาตรฐาน	ค่าที่ยอมรับได้ของปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (CFU/m^3)
องค์การอนามัยโลก (WHO)	100 (WHO, 1988 อ้างถึงใน Ross และคณะ)
ประเทศเกาหลีใต้	800 (Lee และคณะ, 2012)

2.2 จุลินทรีย์ในอากาศ

จุลินทรีย์ที่พบในอากาศจะมีชนิดและปริมาณที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม รวมถึงการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งเป็นกลไกสำคัญของการแพร่กระจาย โดยทั่วไปจะสามารถพบอนุภาคที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต เช่น เกสรดอกไม้ตัวผู้ที่ปลิวไปสู่เกสรตัวเมียในพืชชนิดเดียวกัน สปอร์ของรา เป็นต้น จุลินทรีย์ในอากาศจะอยู่ในลักษณะเกาะกับอนุภาคในอากาศ โดยชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของจุลินทรีย์ในอากาศ ซึ่งจุลินทรีย์ในอากาศนั้นมีทั้งแบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส โปรโตซัว และมีที่มาต่างกัน เช่น จากคน สัตว์ พืช และธรรมชาติ เป็นต้น โดยตารางที่ 2.1 จะแสดงตัวอย่างของชนิดและขนาดของจุลินทรีย์ที่พบได้ในอากาศทั่วไป

ตารางที่ 2.2 ชนิดและขนาดของจุลินทรีย์ในอากาศทั่วไป

จุลินทรีย์	ขนาด (ไมโครเมตร)
1. Fungal spores	
Aspergillus flavus	3.6
Aspergillus fumigatus	2.0, 2.1
Aspergillus versicolor	2.4
Cladosporium cladosporoides	1.8, 2.4
Paecilomyces variotii	2.6
Penicillium brevicompactum	2.1, 2.3
Penicillium chrysogenum	2.8
Penicillium melinii	2.7, 3.1
Penicillium minioluteum	1.7
Scopulariopsis brevicaulis	5.3
2. Bacterial spores	
Bacillus subtilis var.niger	0.9
Faenia rectivirgula	1.1
Saccharomonospora viridis	1.3
Streptomyces albus	0.8, 0.9, 1.2
Thermoactinomyces vulgaris	0.6

จุลินทรีย์	ขนาด (ไมโครเมตร)
3. Bacterial vegetative cells	
Pseudomonas fluorescens	0.8
Micrococcus subtilis	1.0
Bacillus subtilis	0.8
Mycobacterium smegmatis	1.2
Mycobacterium bovis	0.9, 0.8-1.0

ที่มา: Baron และWilleke, 2001: 764

2.2.1 แหล่งกำเนิดของจุลินทรีย์ในอากาศ (วีรนุช หลาง, 2551: 48-49)

แหล่งกำเนิดของจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในอากาศ สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1) แหล่งกำเนิดจากสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor Environment)

โดยส่วนใหญ่จะมาจากบ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน โรงเรียน โรงภาพยนตร์ โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีแหล่งกำเนิดของจุลินทรีย์ในอากาศที่สำคัญ ได้แก่

- วัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ ได้แก่ พรม และพื้นผิววัสดุต่างๆ ในห้อง เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

- กิจกรรมต่างๆ ภายในอาคาร เช่น การทำความสะอาดภายในอาคาร และกระบวนการผลิตสินค้าของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

- กิจกรรมของมนุษย์ที่อาศัยอยู่ในอาคาร เช่น การจาม ไอ และพูดคุยกันของมนุษย์ เป็นต้น

2) แหล่งกำเนิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคาร (Outdoor Environment)

- จากระบบบำบัดของเสีย เช่น ถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการเติมอากาศที่ผิวน้ำ บ่อหมักตะกอน ลานตากตะกอน ถังเติมอากาศของระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย และการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ เป็นต้น

- การเกษตรกรรม เช่น การเพาะปลูก เลี้ยงสัตว์ การหมักปุ๋ย และมาจากการเน่าเสียของผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น

- จากธรรมชาติ ซึ่งมักเกิดจากการกระทำของลมเหนือพื้นผิวดิน น้ำหรือทะเล โดยพื้นดินจัดเป็นแหล่งที่พบแบคทีเรียในอากาศมากที่สุด ส่วนแหล่งน้ำนั้นเมื่อละอองน้ำจากผิวน้ำได้กระเด็นขึ้นมาเหนือผิวน้ำจะถูกกระแสลมพัดพาไป ทำให้เป็นการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในอากาศได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.2.2 การแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในอากาศ (วีรนุช หลาง, 2551: 49)

จุลินทรีย์ในอากาศสามารถพบได้ในบรรยากาศทั่วไป โดยจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่พบมากได้แก่เชื้อรา แบคทีเรีย และไวรัส ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะมีชนิดและปริมาณแตกต่างกันไปขึ้นกับสภาพแวดล้อม โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในอากาศมีอยู่ 2 ประการ ได้แก่

1) สภาพแวดล้อมของอากาศ ได้แก่ ความชื้น แสงแดด ความเร็วลม ฝน และอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งความเร็วลมนั้นส่งผลอย่างมากต่อการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในอากาศและการตกลงสู่พื้นผิว ทำให้สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณพื้นผิวต่างๆ ส่วนแสงแดดนั้นมีรังสียูวีซึ่งสามารถทำลายแบคทีเรียได้และส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศด้วย ในขณะที่ความชื้นและอุณหภูมิของอากาศนั้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในอากาศ

2) ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่น และรูปร่างของจุลินทรีย์ โดยถ้าจุลินทรีย์มีขนาดอนุภาคเล็กและเบาจะสามารถแขวนลอยในอากาศได้นานกว่าและสามารถแพร่กระจายไปได้ไกลกว่าจุลินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า นอกจากนั้นชนิดของแบคทีเรียก็มีผลต่อการแพร่กระจายซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

2.3 แบคทีเรีย

2.3.1 สัณฐานวิทยา

ลักษณะของแบคทีเรียที่ควรคำนึงถึง คือ ขนาด รูปร่าง และโครงสร้างการเรียงตัวของเซลล์ ซึ่งรวมเรียกว่า สัณฐานวิทยาของเซลล์ โดยทั่วไปเซลล์จะไม่อยู่เดี่ยวๆ บางชนิดมีการรวมกลุ่มของเซลล์เป็นคู่ กลุ่ม และสาย แต่ส่วนใหญ่มักจะอยู่เป็นกลุ่มเรียกว่า โคโลนี ซึ่งรูปร่างเซลล์แบคทีเรีย มีความหลากหลาย เช่น ทรงกลม ทรงกระบอกหรือรูปท่อน และรูปเกลียว โดยมีการเรียงตัวที่แตกต่างกัน จากลักษณะรูปร่างและการเรียงตัวที่แตกต่างกันทำให้สามารถจัดแบคทีเรีย

ออกเป็นหมวดหมู่ได้ 3 ลักษณะ คือ (คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล, 2536 อ้างถึงในกฤตกรณ์ ประทุมวงษ์, 2540)

1) ทรงกลม (Spherical) เป็นพวกที่มีลักษณะเซลล์เป็นลักษณะทรงกลม หรืออาจจะมีรูปร่างผิดแปลกไปบ้าง เช่น กลมรี หรือคล้ายเม็ดถั่ว ซึ่งพบได้ในแบคทีเรียบางสายพันธุ์ แบคทีเรียทรงกลมเหล่านี้เรียกว่า Coccus และสามารถแบ่งตามการเรียงตัวของเซลล์ เช่น Micrococcus คือ มีลักษณะเซลล์อยู่เป็นเดี่ยวๆ Diplococcus คือ เซลล์เรียงตัวเป็นคู่กันแบ่งตัวเป็นแนวเดียว Staphylococcus คือ พวกที่มีการเรียงตัวเป็นกลุ่มๆ มีการแบ่งตัวไม่สม่ำเสมอกัน และ Streptococcus คือ พวกที่มีการเรียงตัวเป็นสายยาวคล้ายโซ่ (Chain) เป็นต้น

2) รูปแท่ง (Bacilli) มีรูปร่างเป็นท่อน ซึ่งมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของแบคทีเรีย เช่น บางชนิดผอมบาง บางชนิดเป็นท่อนสั้น เป็นต้น ตัวอย่างแบคทีเรียรูปแท่ง เช่น *Bacillus* spp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียจำพวกแกรมบวกที่ใช้อากาศ (Aerobe) ในการดำรงชีวิต มีรูปร่างเป็นแท่งยาวเรียงตัวติดต่อกัน ส่วนแบคทีเรียรูปท่อนสายพันธุ์อื่น เช่น เชื้อ *B.subtilis, B.cereus* จะพบได้ทั่วไปในบรรยากาศในสิ่งแวดล้อมต่างๆ กัน

3) ทรงเกลียว (Spirals) มีรูปร่างเป็นเกลียว โดยความโค้งงอของเซลล์มีหลายระดับ เช่น Vibrios มีรูปร่างโค้งงอคล้ายเครื่องหมายจุลภาค (comma) เป็นต้น บางครั้งเซลล์จะเรียงตัวต่อกันทำให้มีรูปร่างเหมือนตัว S หลายตัวต่อกัน พวกที่เป็นทรงเกลียวจะมีลักษณะเป็นเกลียวแข็งตัว ได้แก่ แบคทีเรียในสกุล Spirillum และทรงเกลียวที่ยืดหยุ่น ซึ่งแบ่งแยกออกได้หลายสกุลตามลักษณะบางอย่าง เช่น ความแน่นของเกลียว การมีปลอกหุ้มรอบนอก แบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นเกลียวยืดหยุ่นเรียกว่า Spirochetes เป็นต้น (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ, 2548)

2.3.2 การเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ (จุฑามาศ เทพชัยศรี, 2542)

การเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ หมายถึง การเพิ่มจำนวนโดยการแบ่งตัวเองจาก 1 เซลล์เป็น 2 เซลล์ ซึ่งทำให้จำนวนของจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่สภาพแวดล้อมและอาหารยังอยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์นั้น จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนไม่เท่ากัน ถ้าเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อและสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

การเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ของจุลินทรีย์ทุกชนิดต้องการแหล่งสารอาหารเหล่านี้เพื่อใช้ในการสร้างส่วนประกอบของเซลล์หรือให้พลังงานแก่เซลล์ ได้แก่

1) แหล่งของไนโตรเจน หมายถึง สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน เกลือของแอมโมเนียมต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์มีความต้องการและสามารถนำไปใช้ได้ในรูปต่างๆ กัน แล้วแต่ชนิดของจุลินทรีย์

2) แหล่งคาร์บอน หมายถึง สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ความต้องการคาร์บอนของจุลินทรีย์จะอยู่ในรูปต่างๆ กันแล้วแต่ชนิดของจุลินทรีย์

3) แหล่งพลังงาน เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่จำเป็นเพื่อนำมาสังเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ โดยจุลินทรีย์อาจได้พลังงานจากแหล่งต่างๆ เช่น แสงสว่าง การออกซิไดซ์สารประกอบบางชนิด และกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์โดยเฉพาะพวกแป้งและน้ำตาล

4) แหล่งเกลือแร่ ซึ่งจุลินทรีย์ต้องการในปริมาณที่น้อยมาก แต่ไม่สามารถขาดได้ เพราะเกลือแร่บางชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวเคมีหลายอย่าง และเป็นส่วนประกอบของเซลล์ เช่น P, K, Mg, Na, Fe, Mn, Ca, Cu, Zn, CO เป็นต้น

5) วิตามิน มีความสำคัญต่อจุลินทรีย์โดยจะนำไปใช้เป็นโคเอนไซม์ของเอนไซม์ต่างๆ มีวิตามินบางชนิดที่แบคทีเรียสามารถสังเคราะห์ได้เอง แต่บางชนิดต้องใส่ลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ

ความสามารถในการสังเคราะห์สารอาหารแบคทีเรียแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) Autotrophic microorganisms หมายถึง จุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์อาหารขึ้นได้โดยใช้อนินทรียสารเป็นวัตถุดิบ ส่วนพลังงานที่ใช้อาจมาจากแสงสว่างหรือพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการ Oxidation -Reduction

2) Heterotrophic microorganisms หมายถึง จุลินทรีย์ที่ไม่สามารถสังเคราะห์อาหารขึ้นเองได้ ต้องใช้อาหารจากการสร้างของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ และพลังงานที่ใช้อาจมาจากแสงสว่างหรือพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการ Oxidation –Reduction เช่นกัน

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

1) อุณหภูมิ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตแตกต่างกันสามารถแบ่งจุลินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ไซโครไฟล์ (Psychrophile) เจริญเติบโตได้ดี ที่ 0 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า มีโซไฟล์(Mesophile) เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลางระหว่าง 25-40 องศาเซลเซียส และเทอร์โมไฟล์ (Thermophile) เจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 45-70 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะมีผลทำให้โปรตีนเสียสภาพและเซลล์แห้งได้ ถ้าอุณหภูมิต่ำจะทำให้จุลินทรีย์สามารถการดำรงชีวิตอยู่ได้นานยิ่งขึ้น แต่หากอุณหภูมิเข้าใกล้เยือกแข็งทำให้จุลินทรีย์จะไม่สามารถดำรงชีวิตได้เพราะที่ผิวของจุลินทรีย์จะกลายเป็นเกล็ดน้ำแข็ง (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ, 2548)

2) ความชื้นสัมพัทธ์ สามารถส่งเสริมหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำในเซลล์ของแบคทีเรียแตกต่างกัน และจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในเซลล์ เช่น แบคทีเรียแกรมลบที่อยู่ในละอองอากาศ จะดำรงชีวิตได้นานขึ้น ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ในทางตรงข้าม ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง แบคทีเรียแกรมบวกจะดำรงชีวิตได้นานยิ่งขึ้น

3) สภาพความเป็นกรด-ด่าง ในช่วง pH 6.5-7.5 จะเป็นช่วงที่แบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ดีและเหมาะสมที่สุด แต่มีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถเจริญได้ดีที่ pH ช่วงอื่น

4) รังสี (Radiation) แบคทีเรียส่วนใหญ่จะไม่ต้องการแสง แต่จำเป็นสำหรับแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้บางชนิด เช่น กรีนซัลเฟอร์แบคทีเรีย (Green sulfur bacteria) และเพอเพิลซัลเฟอร์แบคทีเรีย (Purple sulfur bacteria) และยังพบว่ารังสีอัลตราไวโอเลตมีผลในการทำลายแบคทีเรียได้

5) ออกซิเจนและไอออนในอากาศ มีผลต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ โดยออกซิเจนที่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radicals) ไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์เรดิคัล (Hydroxide Radicals) และไอออนต่างๆ เช่น คลอรีน ไนโตรเจน ที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมิคัลออกซิเดชัน รังสีอัลตราไวโอเลต ภาวะมลพิษและกระบวนการต่างๆ ทำให้สามารถทำลายดีเอ็นเอของจุลินทรีย์ได้ (Dowd และ Maier, 2000 อ้างถึงในฆริกา คุ้มไทย, 2545)

2.3.4 แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

1) กลุ่มแบคทีเรียแกรมบวกทรงกลม (Gram positive cocci) แบคทีเรียแกรมบวกที่พบได้บ่อย ได้แก่ Streptococcus พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ บางกลุ่มเป็นเชื้อประจำถิ่นในคน อาจทำให้เกิดโรคคออักเสบ ผิวหนังเป็นหนอง โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ รวมถึงปอดบวม ไซนัสอักเสบ หลอดลมอักเสบ หูชั้นกลางอักเสบ เป็นต้น และอีกชนิดที่สำคัญคือ Staphylococcus เป็นสาเหตุสำคัญของโรคฝีหนอง โรคปอดบวม และโรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพอง เป็นต้น ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปตามร่างกายของคน (จุฑามาศ เทพชัยศรี, 2542)

2) กลุ่มแบคทีเรียแกรมลบทรงกลม (Gram negative cocci) ได้แก่ Neisseria จัดอยู่ในตระกูลไนซีเรียซี (Neissriaceae) รูปทรงกลม มีสองสปีชีส์ที่ทำให้เกิดโรคที่สำคัญ คือ *Neisseria meningitidis* ทำให้เกิดโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ และเชื้อ *Neisseria gonorrhoeae* จะทำให้เกิดโรคหนองใน ซึ่งโรคนี้จะเกิดขึ้นกับคนเท่านั้น เป็นต้น

3) กลุ่มแบคทีเรียแกรมลบทรงแท่ง (Gram negative bacilli) เช่น แบคทีเรียในกลุ่ม Enterobacteriaceae เป็นตระกูลที่ใหญ่ที่สุดที่รวมแบคทีเรียที่สำคัญทางการแพทย์ เป็นแบคทีเรียแกรมลบ มีรูปร่างเป็นแท่งสั้น ไม่สร้างสปอร์ เป็นสาเหตุสำคัญของการติดเชื้อในกระแสเลือด (Bacteremia) และการติดเชื้อในท่อปัสสาวะ นอกจากนี้ยังเกิดการติดเชื้อที่บาดแผล การเกิดปอดบวม เยื่อหุ้มสมองอักเสบ และโรคในทางเดินอาหาร แบคทีเรียในกลุ่มนี้เกือบทุกชนิดพบในลำไส้คนและสัตว์ ซึ่งปัจจุบันพบว่ามีความสำคัญในการก่อโรคในคน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดเชื้อในโรงพยาบาล ได้แก่ *E.coli, Y.enterocolytica* และ *K.pneumoniae* เป็นต้น (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2552)

4) กลุ่มแบคทีเรียแกรมบวกทรงแท่ง (Gram positive bacilli) ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม Bacillus มีรูปร่างเป็นท่อนขนาดใหญ่ จะพบอยู่ตามธรรมชาติทั่วไป ซึ่งแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค เช่น *B.cereus* ทำให้เกิดอาหารเป็นพิษ และ *B.anthracis* เป็นสาเหตุของโรคแอนแทรกซ์ เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่ม Corynebacterium มีรูปทรงแท่งคล้ายกระบอง ไม่มีสปอร์ โดยเชื้อที่ก่อโรคคือ เชื้อ *Corynebacterium diphtheriae* ทำให้เกิดโรคคอตีบและโรคติดเชื้อที่ผิวหนัง รวมทั้งแบคทีเรียในกลุ่ม Actinomycetes ด้วย (คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล, 2536 อ้างถึงใน กฤตกรณ์ ประทุมวงษ์, 2540)

5) กลุ่มแบคทีเรียแกรมลบทรงแท่งไม่หมักย่อยกลูโคส (Nonfermentative gram negative bacilli) พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ไม่ก่อให้เกิดโรคในคนปกติ แต่สามารถติดเชื้อได้ในคนที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่องหรือร่างกายอ่อนแอ ในปัจจุบันพบว่าเชื้อกลุ่มนี้ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการติดเชื้อในโรงพยาบาล และมีปัญหาในการดื้อยาต้านจุลินทรีย์หลายชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ Psudomonas, Flavobacterium, Kingella เป็นต้น

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคมีหลายชนิด โดยแบคทีเรียที่สำคัญและพบได้ทั่วไปในอากาศ เช่น *Bacillus* และ *Staphylococcus* เป็นต้น

Bacillus เป็นแบคทีเรียรูปร่างท่อน ปลายตัดตรง สปอร์อยู่ตรงกลางเซลล์ แต่เมื่ออยู่ในร่างกายคนและสัตว์ไม่เคลื่อนที่เนื่องจากไม่มีแฟลกเจลลา ไม่สร้างสปอร์ ใช้อากาศสำหรับการหายใจ เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อธรรมดา ไม่สลายในเม็ดเลือดแดง โคโลนีมีสีขาว ขนาดค่อนข้างโต สกุล *Bacillus* มีอยู่มากมายทั่วไปทุกหนทุกแห่งในโลก ส่วนมากดำรงชีวิตแบบอิสระ ไม่ต้องพึ่งพาอาศัยสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ต้องการใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต แต่สารอาหารมีความต้องการแตกต่างกันไปในแต่ละเชื้อสาย ถิ่นที่อยู่อาศัยอยู่ตามธรรมชาติ คือ ในดิน สปอร์ถูกสร้างขึ้นในดินมักไปปนกับฝุ่นละออง และฟุ้งกระจายอยู่ทั่วไป ติดตามร่างกายคนและสัตว์หรือปน-เปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ (จุฑามาศ เทพชัยศรี, 2542) เชื้อที่ทำให้เกิดโรคคือ *B.anthracis* ทำให้เกิดโรคแอนแทรกซ์ โดยทำให้เกิดโรคในคน และสัตว์กินพืชเป็นอาหาร ส่วน *B.cereus* ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ และ *B. subtilis* ในบางครั้งอาจจะทำให้เกิดโรคเยื่อบุตาอักเสบ

Staphylococcus เป็นแบคทีเรียแกรมบวกรูปกลม จะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-2.0 ไมครอนมักอยู่เป็นกลุ่ม ไม่เคลื่อนที่ อยู่ในวงศ์ Micrococcaceae ตระกูล *Staphylococcus* เป็นเชื้อที่มีความสำคัญทางการแพทย์ สามารถก่อให้เกิดโรคติดเชื้อได้ตั้งแต่การติดเชื้อที่ผิวหนัง โดยมีลักษณะของการอักเสบแบบมีหนอง และอาจร้ายแรงจนถึงแก่ชีวิตได้ แหล่งแพร่เชื้อ *Staphylococcus* ที่สำคัญส่วนมากมาจากแผลของผู้ป่วย จากทางเดินหายใจ ภาชนะ สิ่งของเครื่องใช้ รวมทั้งเสื้อผ้าของผู้ป่วย (สุภาภรณ์ พัวเพิ่มพูนศิริ, 2527) เชื้อนี้สามารถทนต่อความร้อนและความแห้งได้ดี อาจทำให้เป็นโรคต่างๆ เช่น เช่น ฝีหนอง โรคปอดบวม อาหารเป็นพิษ ลำไส้อักเสบ ไขกระดูกอักเสบ และการติดเชื้อในกระแสเลือดและเยื่อบุหัวใจอักเสบ เป็นต้น

2.4 รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet ray)

รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นส่วนหนึ่งของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องถึงพื้นโลก รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) เป็นพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่รังสีออกจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงแสงที่ตาของมนุษย์จะมองเห็นได้ รังสีอัลตราไวโอเลตมีอยู่ในแสงอาทิตย์ แต่รังสีต่างๆ ที่มีต้นกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์นี้มักถูกดูดกลืน หักเห หรือสะท้อนออกไปโดยชั้นบรรยากาศซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่ (ชั้นเทอร์โมสเฟียร์และชั้นบนของเมโซฟอส) ก่อนที่จะผ่านมาถึงโลกได้ ทำให้รังสีที่สามารถผ่านลงมาถึงผิวโลกได้มีเพียงร้อยละ 49 ของรังสีทั้งหมดเท่านั้น และรังสีที่ผ่านลงมาได้นี้ส่วนใหญ่เป็นรังสีอินฟราเรด (Infared) ถึงร้อยละ 46 และรังสีที่มองเห็นได้ (Visible Light) อีกร้อยละ 45 คงเหลือเป็นรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตเพียงร้อยละ 9

มนุษย์สามารถสร้างรังสีอัลตราไวโอเลตโดยอาศัยหลอดไฟเรืองแสง ซึ่งภายในบรรจุไอระเหยของสารปรอท ซึ่งลักษณะของหลอดจะคล้ายกับหลอดไฟวาวแสง (Fluorescent Lamp) เพียงแต่ภายในของหลอดไม่ได้ฉาบสารฟอสโฟเรสเซนต์ (Phosphorescent) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีอัลตราไวโอเลตให้เป็นแสงสีขาวที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ (Lehr และคณะ, 1980)

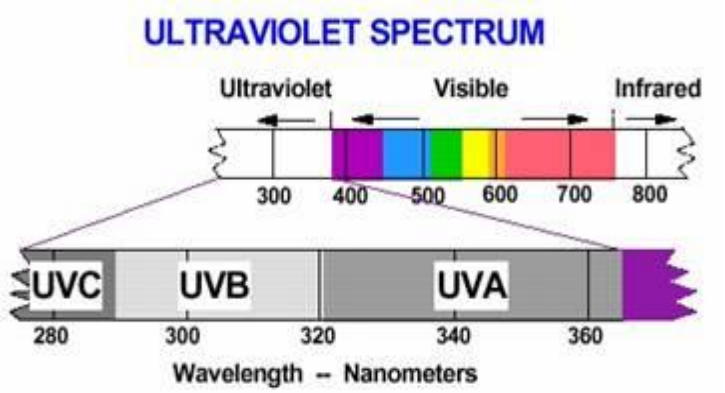
แสงอัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100-400 นาโนเมตรหรือมีช่วงสเปกตรัมอยู่ระหว่างรังสีเอ๊กซ์ (X-rays) กับแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible light) ซึ่งสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเลตนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 สเปกตรัมด้วยกัน ได้แก่

1) UV C เป็นรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 200-280 นาโนเมตร มีช่วงคลื่นสั้น รังสีช่วงนี้เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต เป็นที่นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ตัวอย่างเช่น การใช้ รังสี UV-C ที่ปล่อยจากหลอดซึ่งใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรค (Germicidal lamp)

2) UV B เป็นรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-320 นาโนเมตร มีช่วงคลื่นปานกลาง มีผลในการสร้างวิตามินดีในเวลาสั้นๆ แต่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้ผิวหนังแดง ไหม้เกรียม มีการสะสมทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง โรคเกี่ยวกับตา และยับยั้งระบบภูมิคุ้มกันร่างกายในระยะยาว

3) UV A เป็นรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 320-400 นาโนเมตร มีช่วงคลื่นยาว ส่วนใหญ่ส่องถึงพื้นโลกได้ มีอันตรายไม่มาก แต่สามารถทำให้จุลินทรีย์ตายได้ จึงนำมาใช้ศึกษาทางด้านการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก มีความจำเป็นต่อร่างกายในการ

สังเคราะห์วิตามินดี แต่หากมากเกินไปจะทำให้ผิวหนังหยาบกร้าน ยับยั้งภูมิคุ้มกันร่างกาย ทำให้ผิวหนังแดงและโรคเกี่ยวกับตา



ภาพที่ 2.1 สเปคตรัมรังสีอัลตราไวโอเลต
ที่มา : http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm

2.4.1 หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต

หลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด คือ (Willy, 2002 อ้างถึงใน ปรัศนีย์ เจริญสิน, 2549)

1) หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดความดันสูง (High-pressure lamp) โดยหลอดความดันสูงนี้ภายในบรรจุด้วยก๊าซอาร์กอนหรือไอปรอท และขั้วหลอดแบบ Epoxidated electrodes (Wolfram wires coated with strontium and barium carbonates) ตัวหลอดทำจากวัสดุท่อควอทซ์ (Quartz pipe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-30 มิลลิเมตร และมีขั้วหลอดปิดอยู่ปลายทั้งสอง หลอดควอทซ์ซึ่งบรรจุปรอทที่ความดันสูง (ประมาณ 1-10 atm) เมื่อทำงานจะมีความร้อนเกิดขึ้นถึง 300 องศาเซลเซียส โดยหลอดชนิดนี้จะกำเนิดแสงขาว (Visible light), รังสีอินฟาเรด (Infared ray)และรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet ray) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 365.0-366.3 นาโนเมตร

2) หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดความดันปานกลาง (Medium-pressure lamp) จะบรรจุไอปรอทอยู่ภายใน มีความดันก๊าซทั้งหมดอยู่ในช่วง 10-30 Mpa (1-3 atm) รังสีที่เกิดจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ 200-600 นาโนเมตร

3) หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดความดันต่ำ (Low-pressure lamp) หลอดชนิดนี้สร้างขึ้นจากท่อแก้ว Uviol รังสีที่เกิดขึ้นมาจากไอปรอทซึ่งบรรจุอยู่ภายในหลอดแก้ว มีความดันประมาณ 0.001 atm โดยปกติหลอดชนิดนี้จะมีขนาด 15-60 วัตต์ ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำงานมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส หลอดชนิดความดันต่ำนี้จะมีรังสีอัลตราไวโอเลตอยู่ประมาณร้อยละ 70 ของรังสีที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่น 184-253 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรค (รังสี UV-C) และทำลายพันธะเคมีต่างๆ

2.4.1.1 การป้องกันจากรังสีอัลตราไวโอเลต

วิธีการป้องกันอันตรายนั้นต้องกำหนดให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงานกับแสงซึ่งขึ้นกับลักษณะการทำงานกับแสงอัลตราไวโอเลตหรือหลอดแสงยูวี จำนวนแหล่งกำเนิดแสงยูวี และปริมาณของรังสีโดยมีวิธีป้องกันอันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเลต ดังต่อไปนี้

1) การป้องกันอันตรายที่แหล่งกำเนิด (Source) เช่น การปิดกั้น หรือจะสร้างห้องพิเศษ โดยอาจจะใช้วัสดุสีทึบและทำการแยกกระบวนการให้ห่างจากกลุ่มคนงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเป็นการลดความเสี่ยงต่อผู้ที่อยู่ในบริเวณที่มีรังสีอัลตราไวโอเลตได้

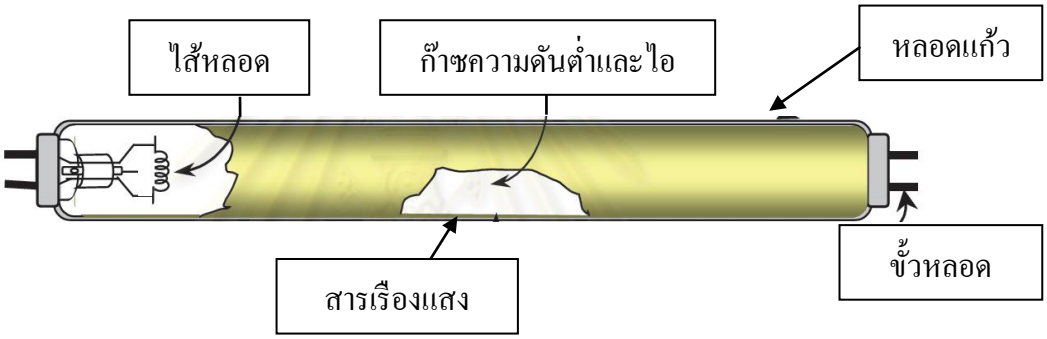
2) การป้องกันอันตรายที่ทางผ่าน (Path) เช่น การใช้แผ่นอลูมิเนียมบางๆ หรือกระจกสีแดง ม่วงเข้ม เป็นฉากกั้นการแผ่รังสี โดยอาจทำให้ฉากนี้สามารถเลื่อนไปมาได้

3) การป้องกันอันตรายที่ตัวบุคคล (Receiver) โดยเฉพาะผู้ที่ต้องทำงานกับรังสีควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสโดยตรงและใส่อุปกรณ์ป้องกันทุกครั้ง โดยกำหนดให้ทำการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม เช่น เสื้อผ้า หมวก แว่นตา ถุงมือ และรองเท้า สิ่งที่เราสวมใส่เพื่อปกปิดร่างกาย

2.4.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp)

หลอดฟลูออเรสเซนต์จะอาศัยพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเลตซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ไอปรอทที่บรรจุไว้ในก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน คริปตอน หรือนีออน ที่ความดันต่ำ ได้รับการกระตุ้นจากแหล่งปลดปล่อยพลังงาน (Discharge Source) ให้ไอปรอทจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่างออกมา โดยแสงอัลตราไวโอเลตที่เปล่งออกมานี้จะกระทบเข้ากับผิวในหลอดแก้วที่ฉาบไว้ด้วยสารเรืองแสงที่เรียกว่า ฟอสฟอร์ (Phosphor) หรือ Fluorescent Material ตัวสารเรืองแสงนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเลตซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ให้

กลายมาเป็นแสงสว่างที่ปรากฏแก่สายตาของมนุษย์ โดยโครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์แสดงดังรูปที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์
ที่มา: คณิต ชัยวัฒนา, 2543

สีของแสงสว่างที่เปล่งออกมาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์จะขึ้นอยู่กับสารประกอบทางเคมีของสารเรืองแสงที่ใช้ฉาบภายในของหลอดฟลูออเรสเซนต์ จึงทำให้มีหลายสีแตกต่างกัน ซึ่งหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นจะฉาบเม็ดสีขาวเอาไว้ภายในหลอดแก้วก่อนที่จะเคลือบสารเรืองแสงทับลงไป

หลอดฟลูออเรสเซนต์ถือเป็นหลอดที่นิยมใช้กันมากไม่ว่าจะเป็นในสำนักงาน อาคาร บ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเพดานไม่สูงกว่า 7 เมตร เพราะประหยัดไฟฟ้า มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย ซึ่งมีข้อดี คือ ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า ส่วนข้อเสีย คือ ถ้านำไปติดตั้งในที่เย็น เช่น ห้องเย็นมากๆ หลอดจะสตาร์ทติดลำบาก ต้องใช้หลอดสตาร์ทเตอร์พิเศษ นอกจากนี้อุณหภูมิเย็นมากปริมาณแสงก็ลดลงมากด้วย

2.4.3 หลอดแบล็คไลท์ (Blacklight lamp)

หลอดแบล็คไลท์จะเป็นหลอดชนิดพิเศษที่กรองแสงสีที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าออกไป และไม่มีการฉาบฟอสฟอรัสไว้ จึงทำให้สีที่เห็นเป็นสีน้ำเงินออกไปทางดำ เป็นหลอดที่ตัวแก้วเป็นสีน้ำเงินเข้มอมม่วง จะให้แสงสว่างที่มีความยาวคลื่นเท่ากับแสงอัลตราไวโอเลตหรือแสงยูวี มีความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นหลอดใช้งานทางอุตสาหกรรมและในทางการค้าใช้สำหรับตรวจหาวัตถุ ตรวจหาแร่ ใช้กับงานแผนที่ในการทำเครื่องหมายงานร่างแบบ และทำให้วัตถุที่มีฟอสฟอรัสฉาบหรือผสมอยู่นั้นเรืองแสง อีกทั้ง

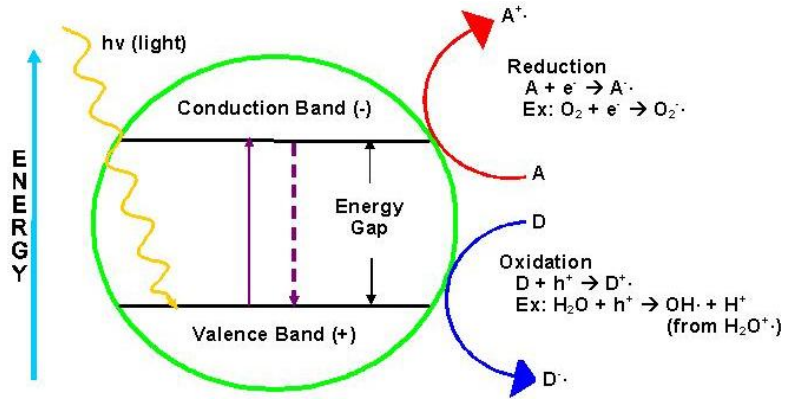
หลอดประเภทนี้จะเปล่งคลื่นความถี่ของแสงในระดับที่สายตาของแมลงสามารถรับรู้ได้ดีและชัดเจน ทำให้หลอดประเภทนี้เป็นจุดดึงดูดและล่อแมลงให้เกิดความสนใจ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในเครื่องดักแมลง

2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส (Photocatalysis Process)

2.5.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส (Photocatalysis Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวคะตะลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตัวคะตะลิสต์ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไล-

ซีสนี้ใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy) หรือ Eg กั้นอยู่ (สรรค์ จิตรใคร่ครวญ, 2552) ซึ่งหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การดูดติดผิว และการฉายแสง



ภาพที่ 2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสบนสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์
ที่มา: http://dev.nsta.org/evwebs/1952/photocatalysis.htm

กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสเป็นกระบวนการดูดซับโฟตอน (hv) ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยระดับพลังงาน 2 ระดับ คือ แถบวาเลนซ์ (vb) และแถบคอนดักชัน (cb) โดยแถบวาเลนซ์จะเป็นระดับ

พลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่จนเต็ม ส่วนแถบคอนดักชันจะเป็นระดับพลังงานที่มีออร์บิตอลว่างอยู่ และมีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์โดยผลต่างระหว่างระดับพลังงานทั้งสองมีพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่สูงกว่า 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดช่องว่าง (hole, h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์และเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่แถบคอนดักชัน โดยช่องว่างจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($^{\cdot}OH$) ส่วนอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($^{\circ}O^-_2$) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ (Goswami และคณะ, 2000 อ้างถึงในสุจิตรา นาวารัตน์, 2553) ซึ่งเรดิคัลเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์โดยจะปลดปล่อยและสูญเสียโพแทสเซียมไอออน (K^+) กรดไรโบนิวคลีอิก(RNA) โปรตีน และองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เซลล์ตาย

2.5.2 องค์ประกอบของกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส

1) ตัวคะตะลิสต์ เช่น โลหะตัวนำ(Transition Metal) และสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากมีราคาไม่แพง เสถียรสูง และมีช่องว่างพลังงาน (E_g) ไม่สูง (E_g =3.2 อิเล็กตรอนโวลต์)

2) พลังงานแสง ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์

3) น้ำ

4) ออกซิเจน หรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

2.5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ความเข้มแสง ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) และความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์ (Bing-Nan และคณะ, 1999; Fox และ Duley, 1993; Stafford และคณะ, 1996; Tang และคณะ, 1997; Venkatadri และ Peters, 1993 อ้างถึงในชวิศร์ กรัณย์เมธากุล, 2549) มีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าพีเอช มีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่า

พีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำ และมีค่าเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น สำหรับไทเทเนียม-ไดออกไซด์ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลาง คือ 6-6.3 และโฮลจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสเมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 3 และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปยังทำให้ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 มิลลิโวลต์ต่อหนึ่งหน่วยพีเอช

2) อุณหภูมิ ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสโดยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานการกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา (Iangphasuk, 1997)

3) ความเข้มของแสง คือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา นั่นคืออนุภาคแสง 1 โฟตอนที่มีความถี่ (ν) จะมีพลังงาน (E) = $h\nu$ หรือคิดเป็น 1 ควอนตัม ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานแสงโดยตรง ดังแสดงในสมการความสัมพันธ์ของ Planck โดยการฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$E = h\nu = hc / \lambda \qquad (1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Contant) = 6.625×10^{-34} , จูล-วินาที

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที$^{-1}$

λ คือ ความยาวคลื่นแสง , นาโนเมตร

c คือ ความเร็วแสง = 3×10^{8} , เมตร/วินาที

การที่จะกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e^{-}_{cb} และ h^{+}_{vb} ต้องใช้ความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับประมาณ 385 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ระดับความเข้มแสงต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลางอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง (Ollis และคณะ, 1991; Tseng และ Haung, 1991 อ้างถึงในชวิศร์ กรัณย์เมธากุล, 2549)

4) ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดจับ e_{cb} ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัลและจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนอิออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงเป็นตัวยืดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอีกด้วย

5) ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะโดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลาย จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสลดลง เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง (ทั้งนี้ปริมาณไทไทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชันส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร)

2.5.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ในสถานะก๊าซ

อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e_{cb}) ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน (O_2) ที่ดูดติดผิวไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคัล (O_2^-) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์ (h^+_{vb}) สามารถรับอิเล็กตรอน (Oxidized) จากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในก๊าซได้โดยตรงหรือไฮดรอกซิลอิออน (Hydroxyl ions : OH-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิล-เรดิคัล (•OH) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่ดูดติดผิวไททาเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong Oxidizing Agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly Reactive) และทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในก๊าซที่ดูดติดผิวหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถที่ทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ 2

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

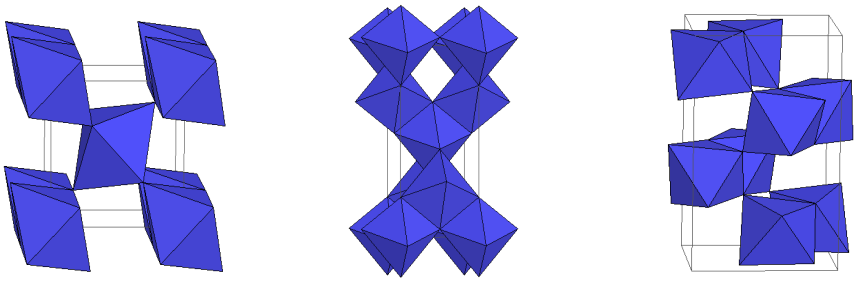
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e_{cb} ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ 3 และ 4 (วุทธินันท์ ศิริพงศ์, 2544)

$$H_2O_2 + e_{cb} \longrightarrow \bullet OH + OH^- \quad (3)$$

$$H_2O_2 + O_2^- \longrightarrow \bullet OH + OH^- + O_2 \quad (4)$$

2.6 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไททาเนียม (Ti) เป็นของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชั่น +4, +3, +2 แต่สภาพที่พบทั่วไป คือ +4 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 79.90 มีจุดเดือด 2,500-3,000 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลวหรือจุดเยือกแข็งเท่ากับ 1,840 องศาเซลเซียส และค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท N-type ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรุ๊คไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) มีคุณสมบัติสามารถฆ่าเชื้อโรคในรูปอนุภาคนาโน โดยกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลต (แสงยูวี) ฉายลงไปยังไททาเนียมไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสที่สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ หรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) ได้ (สรรค์ จิตรใคร่ครวญ, 2552) ในงานส่วนใหญ่ใช้ในรูปที่เป็นผงหรือแขวนลอยในรูปสารกึ่งตัวนำ ไททาเนียมไดออกไซด์นั้นไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่ส่งผลต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส เป็นต้น ซึ่งข้อดีในการนำไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ คือ ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น ซิงออกไซด์ ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และแคดเมียมซัลไฟด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความเสถียรสูง ไม่เป็นอันตราย ไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยา ไม่เกิดการกัดกร่อน มีช่องว่างพลังงาน (Eg) ไม่สูง (Eg =3.2 อิเล็กตรอนโวลต์) ความสามารถในการละลายต่ำ และไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษด้วย



(ก) รูไทล์ (Rutile) (ข) อนาเทส (Anatase) (ค) บรุ๊คไคท์ (Brookite)

ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา : http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาเพื่อให้เข้าใจปัญหา และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป มีดังต่อไปนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคาร ได้แก่

กฤษณียา ศังขจันทรานนท์ และคณะ (2549) ศึกษาชนิดและปริมาณของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคในโรงพยาบาลโดยเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ 3 ชนิด คือ Andersen Impactor, BioSampler และ Open plate เมื่อทำการเก็บตัวอย่างอากาศ 10 จุดในสถานที่บริเวณต่างๆ ของโรงพยาบาล ผลการทดลองพบว่า Andersen Impactor และ Open plate ให้ผลใกล้เคียงกันทั้งชนิดและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ แต่ใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างต่างกันโดย Andersen Impactor ใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างเพียง 20 นาที ส่วน Open plate ต้องเก็บนานถึง 2 ชั่วโมง ในส่วนของ BioSampler นั้นพบเชื้อจุลินทรีย์น้อยมาก และในการศึกษาโดยใช้ Andersen Impactor พบเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศทั้งหมด 11 จีนัส แบ่งเป็นเชื้อแบคทีเรีย 7 จีนัส และเชื้อรา 4 จีนัส เชื้อแบคทีเรียที่พบมากเป็น 5 อันดับแรก คือ *Staphylococcus* รองลงมา คือ *Micrococcus*, *Pseudomonas*, Non- Fermentative gram-negative Bacilli (NFB) และ *Bacillus* ตามลำดับ ส่วนเชื้อราพบมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ *Aspergillus, Penicillium* และ *Curvularia* ตามลำดับ

Kim และ Kim (2007) ศึกษาปริมาณแบคทีเรียและเชื้อราในอากาศภายในอาคารสาธารณะของประเทศเกาหลี ได้แก่ โรงพยาบาล โรงเรียนอนุบาล บ้านพักคนชรา และศูนย์ดูแล เด็กหลังคลอด พบว่า ปริมาณของแบคทีเรียและเชื้อราในอากาศภายในโรงพยาบาลมีค่าเกินมาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด ซึ่งค่าอัตราส่วนของแบคทีเรียและเชื้อราภายในอาคารต่อภายนอกอาคาร (I/O ratio) มีค่าต่ำกว่า 1.0 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแบคทีเรียและเชื้อราภายนอกอาคารมากกว่าภายในอาคาร และแบคทีเรียที่พบส่วนใหญ่เป็นพวก *Staphylococcus* spp., *Micrococcus spp., Corynebacterium* spp. และ*Bacillus* spp. ตามลำดับ ส่วนเชื้อราที่พบส่วนใหญ่เป็นพวก *Penicilium* spp., *Cladosporium* spp. และ *Aspergillus* spp. ตามลำดับ

ในอดีตได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมจุลินทรีย์ในอากาศ เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต (Nicas และ Miller, 1999; Noakes, Fletcher, Beggs, Sleigh และ Kerr, 2004) และใช้พลังงานความร้อน (Lee และ Lee, 2006; Mullican, Buchanan และ Hoffman, 1971) เป็นต้น และปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสในการกำจัดจุลินทรีย์ ได้แก่

Ibanez, Litter และ Pizarro (2003) ศึกษาผลของเชื้อแบคทีเรียต่างชนิดกันโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ซึ่งมีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ ทำการทดสอบใน *Enterobacter cloacae* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีความทนทานต่อรังสียูวีเอมาก และได้ทำการเปรียบเทียบกับแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์อื่นๆ ซึ่งมีความไวต่อแสงแตกต่างกัน เช่น *Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa และ Salmonella typhimurium* ซึ่งผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสที่มีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการฉายรังสียูวีโดยตรงสามารถทำลายเนื้อเยื่อของเซลล์แบคทีเรียที่มีความทนทานต่อรังสีได้

Kuhn และคณะ (2003) ศึกษาการปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสที่เกิดบนพื้นผิวอะคริลิคที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์และการให้แสงยูวีเอ พบว่าเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งสามารถกำจัดแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcusaureus* และ *Enterococcus faecium* ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์พื้นผิวอะคริลิคที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และพบว่าสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ โดยผนังเซลล์ของแบคทีเรียจะถูกทำลายโดยปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล

Lin และ Li (2003) ศึกษาการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Penicillium citrinum* โดยใช้แผ่นกรองไททาเนียมไดออกไซด์นำมาตรึงบนสไลด์แก้ว ซึ่งถูกใช้เป็นพื้นผิวที่เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส โดยใช้หลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสง 40 740 1,400 และ 2,100 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่ายิ่งระดับความเข้มแสงสูงจะสามารถกำจัดแบคทีเรียได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยจากการทดลองพบว่าที่ความเข้มแสง 740 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เชื้อ *Bacillus subtilis และ Penicillium citrinum* จะสามารถอยู่รอดประมาณร้อยละ 50 เมื่อผ่านไป 0.99 ชั่วโมงและ 2.55 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งอัตราการกำจัด *Penicillium citrinum* น้อยกว่า *Bacillus subtilis* ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่า *Penicillium citrinum* ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่า *Bacillus subtilis*

Sato, Koizumi และ Taya (2003) ได้ศึกษาการกำจัดเชื้อ *Escherichia coli* IM303 โดยเป็นการนำแผ่นแก้วควอตซ์มาเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งใช้หลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 15 วัตต์ต่อตารางเมตรและความหนาแน่นของไททาเนียมไดออกไซด์ 3.3×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยอัตราคงที่ของการกำจัดที่พบคือ 0.526 ต่อนาที ซึ่งไม่คำนึงถึงความหนาแน่นเริ่มต้นของเซลล์ที่อยู่บนแผ่นในช่วง 1×10^{6}-1×10^{9} เซลล์ต่อตารางเมตร การทดสอบการกำจัดเซลล์ *Escherichia coli* ในอากาศบนแผ่นที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ 3.3×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเซลล์บนแผ่น ซึ่งสามารถนำข้อมูลการทดลองมาคำนวณโดยใช้พื้นฐานของการประมาณอัตราการสะสมของเซลล์ที่ลดลงและการถูกกำจัดของเซลล์บนแผ่นที่มีการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสได้

Vohra และคณะ (2006) ศึกษาการเติมเงิน (Ag^{+}) ลงไปในไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ใช้เป็นตัวเร่งในกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส เพื่อปรับปรุงการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศให้ดีขึ้น โดยทำการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมเงินบนตัวกรอง ทำการทดสอบในสถานที่ที่มีการหมุนเวียนอากาศโดยใช้เชื้อ *Bacillus cereus, Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Aspergillus niger* และ MS2 Bacteriophage เป็นดัชนีเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมเงินลงไปสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเทียบกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสแบบปกติในสภาวะไม่มีแสง ส่วนผลการกำจัดเชื้อพบว่า ในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงสามารถกำจัดเชื้อ MS2 Bacteriophage ได้เร็วที่สุด

Pal และคณะ (2007) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซีสแบบทีละเทในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่แตกต่างกัน 6 ชนิด โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดแบล็คไลท์ มีไททาเนียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะใช้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน คือ 234 – 8,662 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรเคลือบที่แผ่นกรองเมมเบรนและใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ 3,900 ลักซ์เพื่อกำจัดแบคทีเรีย ATCC ทั้ง4ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli* K-12, *Pseudomonas fluorescens, Bacillus subtilis* และ *Microbacterium sp.* ส่วนแบคทีเรียอีก 2 ชนิด ซึ่งเก็บจากอากาศภายนอกอาคารในประเทศสิงคโปร์ ได้แก่ *Microbacteriaceae str.* W7 และ *Paenibacillus sp.* SAFN-007 ผลการทดลองพบว่า จะสามารถกำจัดแบคทีเรียแกรมลบชนิด *Escherichia coli* K-12 ได้เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่แบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Bacillus subtilis* จะถูกกำจัดในปริมาณเพียงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้นการกำจัดก็จะเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 511-1,666 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งจะสามารถกำจัดแบคทีเรียได้มากที่สุด เชื้อ *Escherichia coli* K-12 จะถูกกำจัดถึงร้อยละ 100 ภายหลังการฉายแสง 30 นาที เมื่อใช้ไททาเนียม-ไดออกไซด์ 1,666 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่เชื้อ *Microbacterium* sp., *Paenibacillus* sp. SAFN-007 และ *Microbacteriaceae* str. W7 ถูกกำจัดได้น้อยมากหลังการฉายแสง 2 ชั่วโมง เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ 1,116 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร

Zhao และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซีส เพื่อกำจัดเอนโดสปอร์ของเชื้อ *Bacillus cereus* บนพื้นผิวที่แห้ง ในช่วงรังสียูวีเอ 0-153 วัตต์ต่อตารางเมตร ผลการทดลองพบว่าสปอร์ของ *Bacillus cereus* บนพื้นผิวที่รับรังสียูวีเอที่ใช้ร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะ-ไลซีสจะถูกกำจัดเมื่อใช้รังสียูวีเอ 30 วัตต์ต่อตารางเมตร และจะต้องใช้รังสียูวีเอที่สูงกว่าในการกำจัดสปอร์ที่ไม่ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสร่วมด้วย

Zacarias และคณะ (2010) ศึกษาการกำจัดสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ซึ่งได้ทำการกระจายเชื้อบนฟิล์มที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และฉายรังสียูวีเอ 2.44–0.29 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของสปอร์ลดลงเล็กน้อยร้อยละ 69 หลังจากฉายรังสียูวีเอบนแก้วบอโรซิลิเกตโดยไม่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเมื่อฉายด้วยรังสียูวีเอภายใต้เงื่อนไขที่คล้ายกันบนแผ่นที่เคลือบด้วยไททา-เนียมไดออกไซด์ พบว่า ปริมาณของสปอร์มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งกำจัดได้ถึงร้อยละ 99.88 หลังจากฉายรังสียูวีเอ 24 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสปอร์แห้งของ *Bacillus subtilis* สามารถกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสได้ และการกำจัดที่เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับฟลักซ์ของรังสียูวีบนแผ่นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

นอกจากนั้นได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศโดยกระบวนการโฟโต-คะตะไลซีสในประเทศไทย ได้แก่

ชุลีวัลย์ ธัญญศิรินนท์ (2550) ศึกษาการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหลอดยูวีเอเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่ประดิษฐ์เองกับหลอดยูวีเอที่ไม่ได้เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับหลอดไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขายในท้องตลาด และหลอดยูวีซี แบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษาคือ *Staphylococcus epidermidis* โดยศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมเรื่องอุณหภูมิและความชื้น ผลการศึกษาพบว่า หลอดยูวีเอเคลือบไททาเนียม-ไดออกไซด์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองมีประสิทธิภาพในการกำจัด *Staphylococcus epidermidis* แตกต่างจากหลอดเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขายในท้องตลาดอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยจะสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 100 และ 97.3 ตามลำดับ ในขณะที่หลอดยูวีเอที่ไม่ได้เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์กำจัดจุลินทรีย์ร้อยละ 67.0 ภายในเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ส่วนหลอดยูวีซีสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 100 ภายใน 20 นาที ทั้งนี้อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์น้อยมาก ส่วนความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดยูวีซีชัดเจนกว่าหลอดยูวีเอที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์

Chotigawin และคณะ (2010) ศึกษาความสามารถของแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA (High Efficient Particulate Air) ที่ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในระบบปิดที่มีการหมุนเวียนอากาศภายใน และได้นำมาประยุกต์ในเครื่องฟอกอากาศ โดยทดสอบประสิทธิภาพภายในห้องทดลองขนาด 8 ลูกบาศก์เมตรและในโรงพยาบาล ซึ่งทำการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่แผ่นกรองชนิด HEPA เพื่อใช้ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่บนตัวกรองโดยใช้หลอดแบล็คไลท์ฉายไปยังตัวกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาระบบปิดพบว่าปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งในการทดลองจะกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ในขณะที่กำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ได้ร้อยละ 86.8, *Aspergillus niger* ร้อยละ 77.1 และ *Penicillium citrinum* ร้อยละ 82.7 ในเวลา 10 ชั่วโมง และเมื่อใช้แผ่นกรองอากาศโฟโตคะตะไลซีสในเครื่องฟอกอากาศ ภายในห้องทดลอง พบว่าเมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศสามารถกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ได้ร้อยละ 83.4, *Bacillus subtilis* ร้อยละ 81.4, *Aspergillus niger* ร้อยละ 88.5 และ

Penicillium citrinum ร้อยละ 75.8 ส่วนในโรงพยาบาลประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศที่ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสจะต่ำกว่าในห้องทดลอง

Chuaybamroong และคณะ (2011) ศึกษาการลดปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* และเชื้อรา *Aspergillus niger* โดยนำหลอดวิซิเบิลไวท์ไลท์และยูวีเอแบล็คไลท์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่ประดิษฐ์เองมาเปรียบเทียบกับหลอดวิซิเบิลไวท์ไลท์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขายในท้องตลาด ควบคุมสภาพแวดล้อมให้มีอุณหภูมิ 25และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 และ75 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้หลอดวิซิเบิลไวท์ไลท์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสทำให้ปริมาณของ *Staphylococcus epidermidis* ลดลงถึงร้อยละ 92 ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิหรือความชื้นที่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ใช้หลอดแบล็คไลท์จะกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้อย่างสมบูรณ์ที่ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ส่วนสปอร์ของ *Aspergillus niger* เมื่อเพิ่มความชื้นและอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณลดลง นอกจากนั้นได้ศึกษาปริมาณของแบคทีเรียและเชื้อราที่ลดลงโดยใช้หลอดไฟที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์โดยที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการและห้องเก็บขยะในโรงพยาบาล ซึ่งพบว่าสามารถลดปริมาณของแบคทีเรียและเชื้อราทั้งหมดได้ร้อยละ 9-97 และร้อยละ 3-95 ในเวลา 30-480 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญในการลดปริมาณของจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสแบบใช้หลอดไฟอย่างชัดเจน

สรุปการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุต่างๆ มาเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์เป็นไปในแนวทางที่ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แผ่นฟอกอากาศที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ มาทำการทดสอบซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ

2. กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส เป็นการใช้ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตมาใช้กำจัดจุลินทรีย์ในอากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ได้ต้องใช้ความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับประมาณ 385 นาโนเมตร ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมนี้มาใช้ในการทดลอง พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสและกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ดี

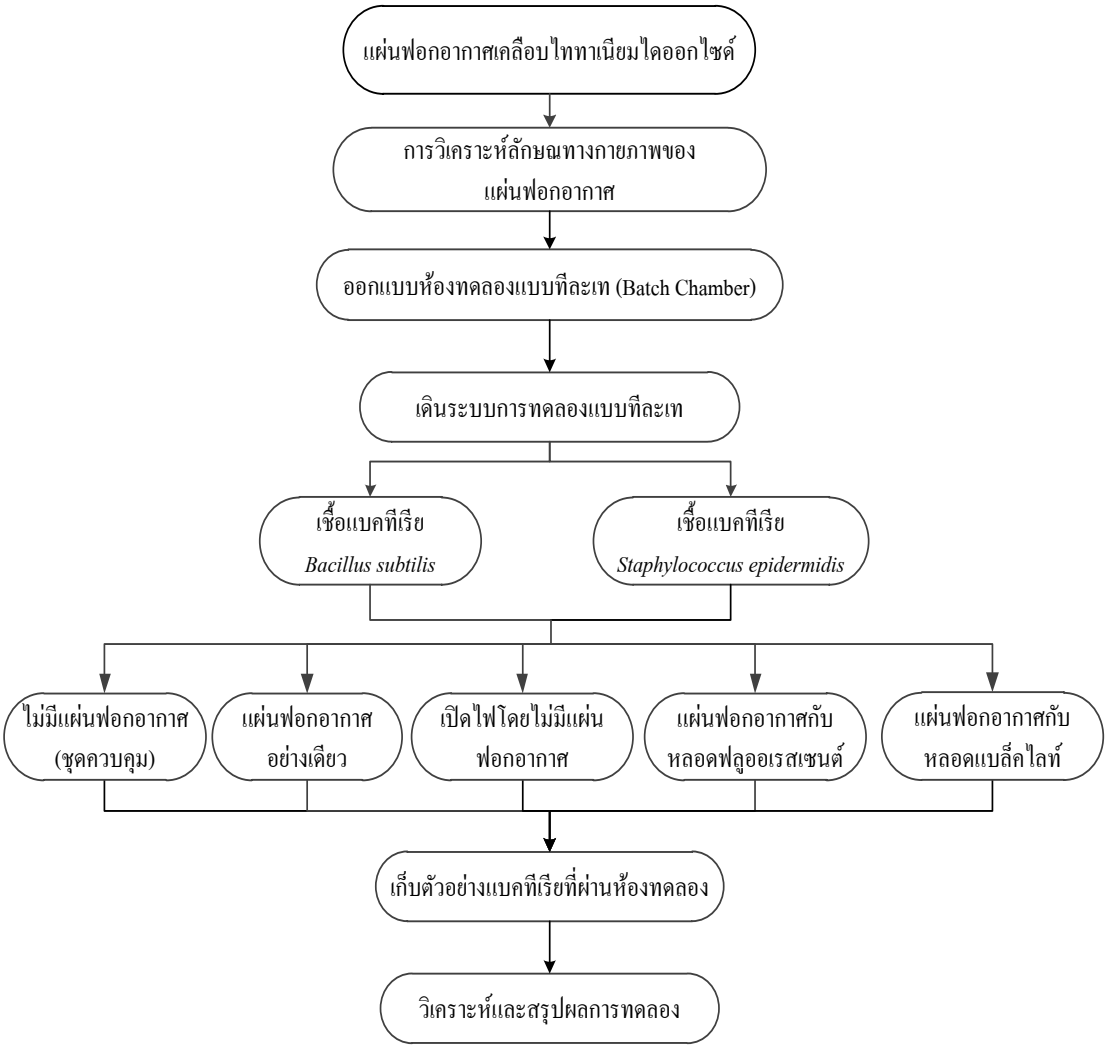
3. เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* เป็นเชื้อที่สามารถพบได้ทั่วไปในอากาศ และมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่มีสปอร์ ส่วนเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่ไม่มีสปอร์ ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ว่าลักษณะของเซลล์มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของแผ่นฟอกอากาศมากน้อยเพียงใด

4. การเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศด้วยเครื่องไบโออิมแพคเตอร์แบบชั้นเดียว (Single-stage viable cascade impactor) มีวิธีการเก็บตัวอย่างตามมาตรฐานของ NIOSH Method 0800 และ 0801 และสามารถนำจำนวนโคโลนีที่นับได้จากจานอาหารเลี้ยงเชื้อไปคำนวณในสมการปรับแก้จำนวนโคโลนีทั้งหมดด้วย correction factor เพื่อที่จะได้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศ ด้วยแผ่นฟอกอากาศชนิดโฟโตคะตะไลติก ซึ่งทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการคุณภาพอากาศ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก

ชุดที่	ชุดการทดลอง	แผ่นฟอกอากาศ	แหล่งกำเนิดแสง		เชื้อจุลินทรีย์	
			ฟลูออเรสเซนต์ ($\mu W/cm^2$)	แบล็คไลท์ ($\mu W/cm^2$)	*Bacillus subtilis*	*Staphylococcus epidermidis*
1	ควบคุม (1)	-	-	-	✓	-
2	ควบคุม (2)	-	-	-	-	✓
3	แผ่นฟอกอากาศ (1)	✓	-	-	✓	-
4	แผ่นฟอกอากาศ (2)	✓	-	-	-	✓
5	แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ (1)	✓	1.0, 3.0, 3.7	-	✓	-
6	แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ (2)	✓	1.0, 3.0, 3.7	-	-	✓
7	แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ (1)	-	ความเข้มแสงจากชุดที่ 5	-	✓	-
8	แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ (2)	-	ความเข้มแสงจากชุดที่ 6	-	-	✓
9	แหล่งกำเนิดแสงแบล็คไลท์ (1)	✓	-	70, 220, 270	✓	-
10	แหล่งกำเนิดแสงแบล็คไลท์ (2)	✓	-	70, 220, 270	-	✓
11	แหล่งกำเนิดแสงแบล็คไลท์ (1)	-	-	ความเข้มแสงจากชุดที่ 9	✓	-
12	แหล่งกำเนิดแสงแบล็คไลท์ (2)	-	-	ความเข้มแสงจากชุดที่ 10	-	✓

3.2 ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรคงที่ คือ

- ห้องทดลองจำลองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร (1,000 ลิตร)
- อุณหภูมิอากาศ 25±2 องศาเซลเซียส
- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ±5
- ความดันบรรยากาศปกติ
- ความเร็วลม 0.20 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น คือ

- ชนิดของแบคทีเรียในอากาศ คือ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis*
- แหล่งกำเนิดแสง คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์มีความเข้มแสงยูวี 1.0, 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่มีความเข้มแสงยูวี 70, 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ตัวแปรตาม คือ

- ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียในอากาศที่ลดลงหลังจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส

3.3 อุปกรณ์ในงานวิจัย

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

1) เครื่องปั๊มดูดอากาศ High Flow Vacuum Pump ยี่ห้อGAST® จากบริษัท Thermo Andersen Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น 10 -710

2) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Genesys 10s UV-Vis spectrophotometer

3) เครื่องดูดอากาศ ยี่ห้อ GAST® รุ่น DOA-P518-FD

4) เครื่องเหวี่ยงสารให้ตกตะกอน (Centrifuge) ยี่ห้อ Heraeus Instrument

5) เครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter)

6) แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 18 วัตต์ (Fluorescent Lamp) ยี่ห้อ Sylvania รุ่น F18WT8/154

7) แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ขนาด 18 วัตต์ (Blacklight Lamp) ยี่ห้อ Sylvania รุ่น F18WTB/BLB

8) หลอดไฟอัลตราไวโอเลตซีขนาด 18 วัตต์ (Germicidal Lamp) Sankyo Denki Co., Ltd จากประเทศญี่ปุ่น

9) พัดลมขนาดเล็ก ยี่ห้อ Sunon รุ่น DP200A

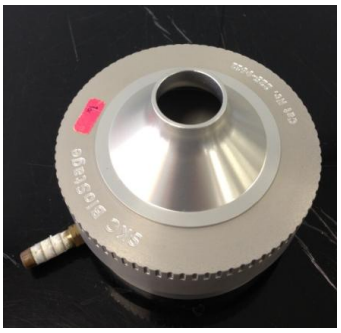
10) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น ยี่ห้อ Q^{TM}-Trak รุ่น 7556) (ดังแสดงในภาพที่ 3.2)

ภาพที่ 3.2 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น

11) เครื่องวัดความเข้มแสง (Radiometer) ยี่ห้อ Vilber Lourmat รุ่น VLX-3W (ดังแสดงในภาพที่ 3.3)

ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความเข้มแสง

12) เครื่องเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ ไบโออิมแพคเตอร์แบบชั้นเดียว ชนิด 400 รู (Single-stage viable cascade impactor) ยี่ห้อ SKC,Inc. รุ่น Standard Biostage (ดังแสดงในภาพที่ 3.4)

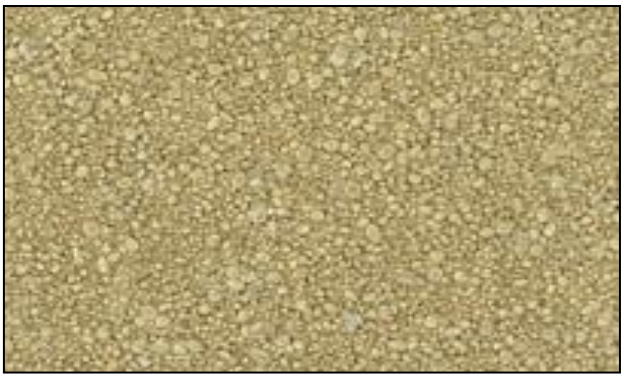


ภาพที่ 3.4 เครื่องเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ Bio Impactor แบบชั้นเดียว

13) เครื่องพ่นจุลินทรีย์ให้เป็นละอองฝอย (Nebulizer) ยี่ห้อ BGI รุ่น MRE-CN 24 (ดังภาพที่ 3.5)

ภาพที่ 3.5 เครื่องพ่นจุลินทรีย์ให้เป็นละอองฝอย

14) แผ่นฟอกอากาศที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ยี่ห้อ ชิเซน แอร์คลีน จากประเทศญี่ปุ่น นำเข้าโดย บริษัท ไอเคเอส จำกัด (ดังภาพที่ 3.6)



ภาพที่ 3.6 แผ่นฟอกอากาศชิเซน แอร์คลีน

3.3.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย

1) เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ HIRAYAMA รุ่น HA-3D

2) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Electric balance) ยี่ห้อ SARTORIUS รุ่น BP 3100S

3) ตู้บ่มเพาะเชื้อ (Incubator) ยี่ห้อ HEREANS รุ่น KB 900

4) จานเพาะเชื้อ (Plate)

5) เครื่องแก้วต่างๆ เช่น บีกเกอร์ ปิเปต กระบอกตวง เป็นต้น

6) กระจกสไลด์และบ่วงถ่ายเชื้อ (Loop)

7) ตะเกียงแอลกอฮอล์

8) กล้องจุลทรรศน์

3.4 อาหารเลี้ยงเชื้อและสายพันธุ์ของแบคเรีย

1) อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง Tryptic Soy Agar (TSA) จากบริษัท DIFCO™

2) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* (TISTR 008) จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3) เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* (TISTR 518) จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.5 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.5.1 สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

1) 70% Isopropyl alcohol

2) 0.85% NaCl

3.5.2 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดแบคทีเรียด้วยวิธีการย้อมสีแกรม (Gram stain)

1) สารละลายอะซิโตนแอลกอฮอล์

2) สารละลายคริสตัลไวโอเลต (Crystal violet solution)

3) สารละลายแกรมไอโอดีน (Lugol's iodine solution)

4) สารละลายสีซาฟรานิน (Safranin solution)

3.6 วิธีดำเนินงานวิจัย แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ

- การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกบนแผ่นฟอกอากาศด้วย X-Ray Diffraction (XRD)
- การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- การวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)

การทดลองส่วนที่ 2 ทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย

1) การเตรียมเชื้อแบคทีเรียและหาความเข้มข้นของแบคทีเรียเริ่มต้น

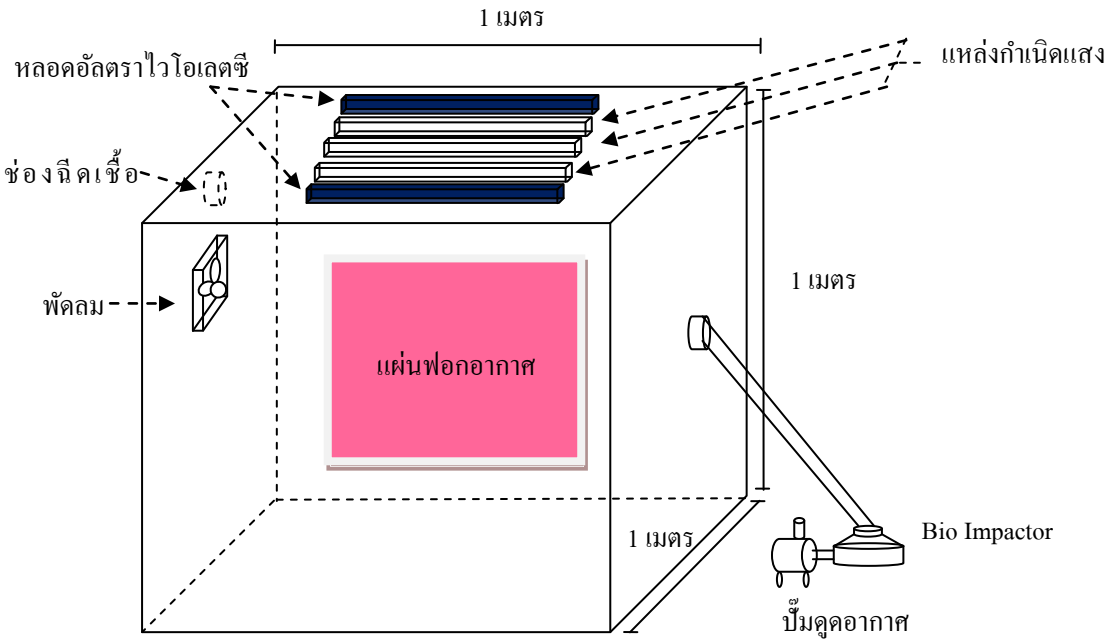
1.1) การเตรียมสปอร์ของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยนำหัวเชื้อมาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (TISTR 008)ในรูปผงแห้ง นำมาผสมกับน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อจนเข้ากัน แล้วใช้ปิเปตหยดเชื้อ 1 หยดลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) เกลี่ยให้ทั่ว ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วันจนมีโคโลนีขึ้น

เต็ม จากนั้นเขี่ยเชื้อปริมาณเล็กน้อยมาเจือจางในน้ำกลั่น นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดเชื้อที่มีชีวิตอยู่ (Vegetative cell)ให้เหลือแต่สปอร์ที่มีความทนทานสูง แล้วจึงนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ความเร็ว 2,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที นำสปอร์ที่อยู่ในส่วนของสารละลายใสมาเทียบความขุ่นให้เท่ากับ McFarland Standard หมายเลข 0.5 (เทียบเท่าจำนวนโคโลนี 10^8 ต่อมิลลิลิตร) (สุจิตรา นาวารัตน์, 2553) จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร(เทียบเท่ากับ โคโลนี 10^4 ต่อมิลลิลิตร) นำสารละลายสปอร์ที่ได้ไปใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นสำหรับพ่นจุลินทรีย์ด้วยเครื่องพ่นจุลินทรีย์ให้เป็นละอองฝอยในห้องทดลองจำลองต่อไป

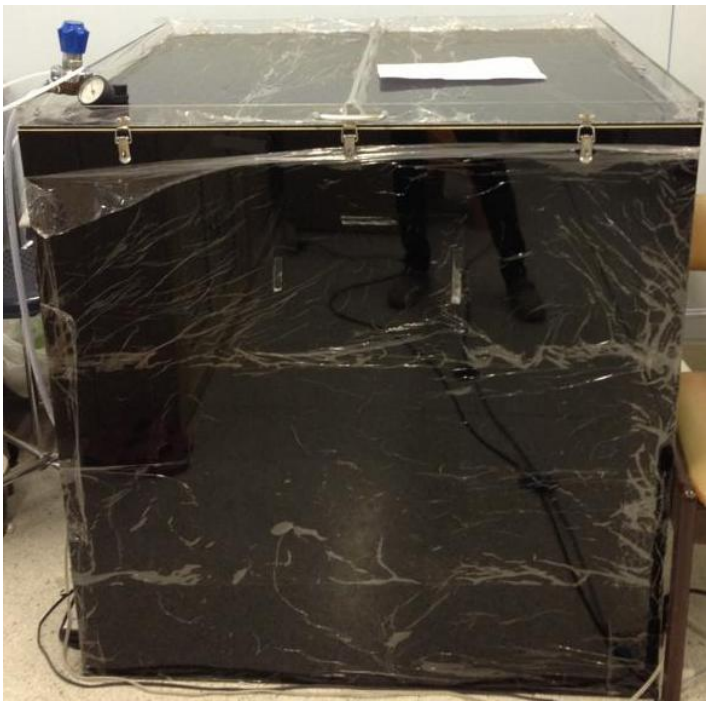
1.2) การเตรียมเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* โดยนำหัวเชื้อมาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (TISTR 518)ในรูปผงแห้ง นำมาผสมกับน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อจนเข้ากัน แล้วใช้ปิเปตหยดเชื้อ 1 หยดลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) เกลี่ยให้ทั่ว นำมาบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเขี่ยเชื้อใส่ลงในหลอดทดลองที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.85 ของน้ำหนักต่อปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร เทียบความขุ่นให้เท่ากับ McFarland Standard หมายเลข 0.5 (เทียบเท่าจำนวนโคโลนี 10^8 ต่อมิลลิลิตร) (Maus และ Umhauer, 1997 อ้างถึงในชุลีวัลย์ ธัญญศิรินนท์, 2550) จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร(เทียบเท่ากับโคโลนี 10^5 ต่อมิลลิลิตร) นำสารละลายหัวเชื้อที่ได้นำไปใช้สำหรับพ่นจุลินทรีย์ด้วยเครื่องพ่นจุลินทรีย์ให้เป็นละอองฝอยในห้องทดลองจำลองต่อไป

2) การออกแบบห้องทดลองจำลอง

- ออกแบบห้องทดลองแบบทีละเท (Batch Chamber) ซึ่งเป็นห้องปิดทำด้วยวัสดุอะคริลิคทึบทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร และความสูง 1เมตร ปริมาตรเท่ากับ 1,000 ลิตรหรือ 1 ลูกบาศก์เมตร ติดตั้งหลอดไฟเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงบริเวณผนังด้านบนของห้องทดลอง โดยแปรเปลี่ยนระหว่างแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ที่มีความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายในมีพัดลม 1 ตัวเพื่อทำช่วยให้เกิดการกระจายของเชื้อแบคทีเรียที่ฉีดพ่นเข้าไปให้ทั่วทั้งห้องทดลอง ติดแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกขนาดกว้าง 0.45 เมตร และยาว 0.50 เมตร มีพื้นที่เท่ากับ 0.23 ตารางเมตร ติดในแนวตั้งที่บริเวณผนังด้านในของห้องทดลองจำลอง ดังภาพที่ 3.7 เพื่อเลียนแบบรูปแบบการใช้ประโยชน์ของแผ่นฟอกอากาศในการใช้งานจริง



(ก) ภายในของห้องทดลอง



(ข) ภายนอกของห้องทดลอง

ภาพที่ 3.7 ห้องทดลองแบบทีละเท

3) ทำการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดลองโดยตรวจวัดทั้งก่อนเริ่มต้นเดินระบบและหลังการเดินระบบทุกครั้งพร้อมบันทึกผล

4) เปิดหลอดยูวีซีภายในห้องทดลองเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในอากาศทั้งก่อนเริ่มต้นเดินระบบและภายหลังเสร็จสิ้นการเดินระบบ

5) ทำการพ่นเชื้อแบคทีเรียปริมาณ 100 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องพ่นจุลินทรีย์ให้เป็นละอองฝอย เข้าไปภายในห้องทดลองจำลอง ที่แรงดัน 35 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) โดยทำการเปิดพัดลมเพื่อช่วยกระจายให้เชื้อแบคทีเรียผสมกับอากาศภายในห้องทดลองจำลองเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียภายในห้องทดลองด้วยเครื่องไบโออิมแพคเตอร์แบบชนิดชั้นเดียว ที่บรรจุจานอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA ด้วยอัตราการไหล 28. 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ได้ปริมาณแบคทีเรียเริ่มต้น (นาทีที่ 0)

6) เริ่มเดินระบบการไหลแบบทีละเทภายในห้องทดลองจำลอง เก็บตัวอย่างแบคทีเรียด้วยเครื่องไบโออิมแพคเตอร์ที่ระยะเวลา 15 30 45 60 75 90 105 และ 120 นาที ด้วยอัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

7) ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในสภาวะที่แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดแบล็คไลท์ โดยเมื่อได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแบคทีเรียของแต่ละแหล่งกำเนิดแสงแล้ว จึงนำค่าความเข้มแสงนั้นมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียในอากาศอีกครั้งในสภาวะการทดลองที่ทำการเปิดไฟแต่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าเกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตคะไลซีสจริง

8) ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่หลงเหลือภายในห้องทดลองหลังเสร็จสิ้นการทดลองด้วยหลอดยูวีซีเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียซ้ำเพื่อเป็นการยืนยันว่าปราศจากเชื้อ และใช้แอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 70 ทำความสะอาดไบโออิมแพคเตอร์ทุกครั้งภายหลังการใช้งาน

9) นำจานอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA ที่ได้ไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง แล้วจึงนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏบนจานเลี้ยงเชื้อ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณและรายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้สมการปรับแก้จำนวนโคโลนีทั้งหมดด้วย correction factor เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด (Hinds, W.C. 1999 อ้างถึงในกฤษณียา ศังขจันทรานนท์, 2548)

สมการปรับแก้ค่าจำนวนโคโลนีด้วยค่า correction factor คือ

$$n_c = n_f \left(\frac{1.075}{1.052 - f} \right)^{0.483} \quad \text{for } f < 0.95$$

โดย n_c คือ จำนวนโคโลนีที่ปรับแก้ (CFU/m^3)

n_f คือ จำนวนโคโลนีที่นับได้จากอาหารเลี้ยงเชื้อ

f คือ ค่า n_f/N_j (N_j คือ จำนวนรูทั้งหมดในแต่ละชั้นของ Bio Impactor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 400)

เมื่อทำการคำนวณตามสมการปรับแก้จำนวนโคโลนีแล้ว จึงนำค่าที่ได้มาหารด้วยปริมาตรอากาศทั้งหมดที่ทำการเก็บตัวอย่างจะได้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในอากาศในหน่วย CFU/m^3 ดังสมการ

$$\text{ปริมาตรอากาศทั้งหมด (ลบ.ม.)} = \frac{\text{28.3 ลิตรต่อนาที x เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)}}{1{,}000}$$

$$\text{ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศต่อลูกบาศก์เมตรอากาศ} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่ปรับแก้}}{\text{ปริมาตรอากาศทั้งหมด}}$$

10) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศภายในห้องทดลองแบบทีละเท ในสภาวะการทดลองที่มีชุดควบคุม (Baseline) ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอากาศอย่างเดียว ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอากาศในสภาวะที่แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงระหว่างหลอดฟลูออเรสเซนต์กับหลอดแบล็คไลท์ของเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิด และสภาวะการเปิดไฟโดยไม่มีแผ่นฟอกอากาศ

11) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียชนิด *Bacillus subtilis* กับ *Staphylococcus epidermidis*

12) การตรวจวิเคราะห์ชนิดของแบคทีเรีย

12.1) ทำการสังเกตลักษณะของโคโลนีที่ปรากฏบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยจะพิจารณาจากขนาด สี ขอบโคโลนี รูปร่าง พื้นผิว และความโปร่งใส แล้วทำการบันทึกผล

12.2) ตรวจยืนยันชนิดของเชื้อแบคทีเรียด้วยการย้อมสีแบบแกรม (Gram stain) และส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (ภาคผนวก ญ)

3.7 การวิเคราะห์ผลการศึกษา

1) เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศของชุดการทดลองต่างๆ โดยมีชุดควบคุม แผ่นฟอกอากาศอย่างเดียว แผ่นฟอกอากาศกับแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ แผ่นฟอกอากาศกับหลอดแบล็คไลท์ และการเปิดไฟโดยไม่มีแผ่นฟอกอากาศ ตามสูตรดังต่อไปนี้

- การคำนวณร้อยละของประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียในอากาศ

$$\text{Efficiency}(\%) = \frac{nb_0 - nb_t}{nb_0} \times 100$$

โดย Efficiency คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียในอากาศ (%)

nb_0 คือ ปริมาณแบคทีเรียเริ่มต้น (นาทีที่ 0) (จำนวนโคโลนีต่อลูกบาศก์เมตร)

nb_t คือ ปริมาณแบคทีเรียในแต่ละช่วงเวลา (จำนวนโคโลนีต่อลูกบาศก์เมตร)

- การคำนวณอัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศของแผ่นฟอกอากาศ

$$\text{Rate}(\text{CFU}/\text{m}^5 - \text{min}) = \frac{\left(nb_0 - nb_t\right)}{t \times A}$$

โดย Rate คือ อัตราการกำจัด (CFU/m^5- min)

nb_0 คือ ปริมาณแบคทีเรียเริ่มต้น (นาทีที่ 0) (จำนวนโคโลนีต่อลูกบาศก์เมตร)

nb_t คือ ปริมาณแบคทีเรียในแต่ละช่วงเวลา (จำนวนโคโลนีต่อลูกบาศก์เมตร)

t คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)

A คือ พื้นที่แผ่นฟอกอากาศ (ตารางเมตร)

- การคำนวณค่าคงที่ของอัตราการกำจัดแบคทีเรียในอากาศของแผ่นฟอกอากาศ (k:min^{-1})

$$-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = kt \qquad \text{โดย Slope= k}$$

2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียชนิด *Bacillus Subtilis* กับ *Staphylococcus epidermidis*

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยหลักการทางสถิติ 2 แนวทาง คือ

1) สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ซึ่งจะวิเคราะห์ข้อมูลโดยแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อคำนวณปริมาณของแบคทีเรียที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลา

2) สถิติเชิงวิเคราะห์ (Analytical statistics) โดยใช้สถิติในการทดสอบ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- การทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรม ANOVA เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในกำจัดแบคทีเรียของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกของแหล่งกำเนิดแสงแต่ละชนิด

- การทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรม T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศของแต่ละแหล่งกำเนิดแสง และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียชนิด *Bacillus Subtilis* กับ *Staphylococcus epidermidis*

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ และช่วงที่ 2 เป็นการดำเนินการทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดแบคทีเรียทดสอบ 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศ โดยทำการทดลองในห้องทดลองจำลองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร (1,000 ลิตร) ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5 ด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกที่มีขนาดเท่ากับ 0.23 ตารางเมตร ช่วงเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที ทำการทดลองเปรียบเทียบกันโดยมีชุดควบคุม (Baseline) ชุดที่มีแผ่นฟอกอากาศอย่างเดียว และชุดทดลองที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ สภาวะที่มีแผ่นฟอกอากาศกับแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ แผ่นฟอกอากาศกับหลอดแบล็คไลท์ และสภาวะการเปิดไฟโดยไม่มีแผ่นฟอกอากาศ โดยในการทดลองที่มีการใช้แหล่งกำเนิดแสงนั้นจะทำการแปรเปลี่ยนความเข้มแสงยูวีที่แตกต่างกัน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 1.0 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ

4.1.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบในแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

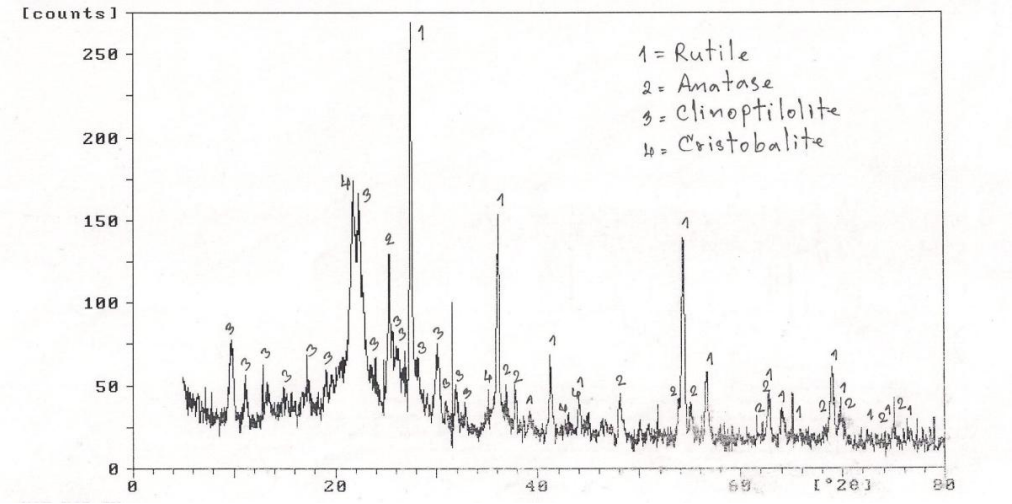
ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบในแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 54.67 และรองลงมาคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) คิดเป็นร้อยละ 33.07 โดยน้ำหนัก โดยซิลิกอนไดออกไซด์มีผลช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับแผ่นฟอกอากาศเพื่อให้โมเลกุลของจุลินทรีย์สามารถเกาะติดผิวได้มากขึ้น ส่วนไททาเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรสูง และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ซึ่งจะสามารถฆ่าจุลินทรีย์ได้ เมื่อจุลินทรีย์สัมผัสกับพื้นผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์และมีการกระตุ้นด้วยแสงเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.1 ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบที่พบในแผ่นฟอกอากาศ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบที่พบในแผ่นฟอกอากาศ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)											
Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO_2	Fe_2O_3	ZrO_2	Nb_2O_5
1.95	0.3	3.38	54.67	0.04	3.52	1.03	33.07	0.13	1.84	0.01	0.01

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

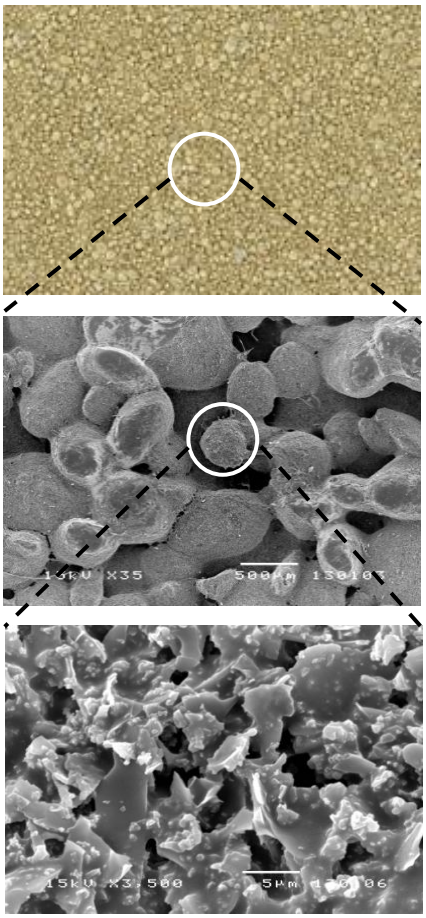
จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟอกอากาศพบว่า ผลึกที่พบมากที่สุดในแผ่นฟอกอากาศ คือ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของไททาเนียมไดออกไซด์ รองลงมาคือ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งโครงสร้างผลึกทั้งสองรูปแบบที่พบจะนิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส โดยทั่วไปไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ แต่ในบางปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีส่วนผสมระหว่างโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์ จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสได้ (ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์, 2550) โดยโครงสร้างแบบอนาเทสสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส นอกจากอุณหภูมิแล้วยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของผลึก ได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก และขนาดของผลึก เป็นต้น



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการทดลองจากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของแผ่นฟอกอากาศไม่เรียบ มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนกระจัดกระจายไปทั่ว โดยเมื่อส่องดูที่กำลังขยาย 35 และ 3,500 เท่าพบว่า ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศมีลักษณะไม่แน่นอนและไม่สมมาตร มีรูพรุนหลายขนาดกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของแผ่นฟอกอากาศ ซึ่งกระบวนการโฟโตคะ-ตะไลซีสนั้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณรูพรุนเหล่านี้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการเกาะติดของจุลินทรีย์ และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสซึ่งสามารถกำจัดจุลินทรีย์ให้ลดลงได้ ดังนั้นหากแผ่นฟอกอากาศมีพื้นผิวความเป็นรูพรุนมากก็จะส่งผลให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสเกิดได้ดีด้วย



(ก) เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

(ข) กำลังขยาย 35 เท่า

(ค) กำลังขยาย 3,500 เท่า

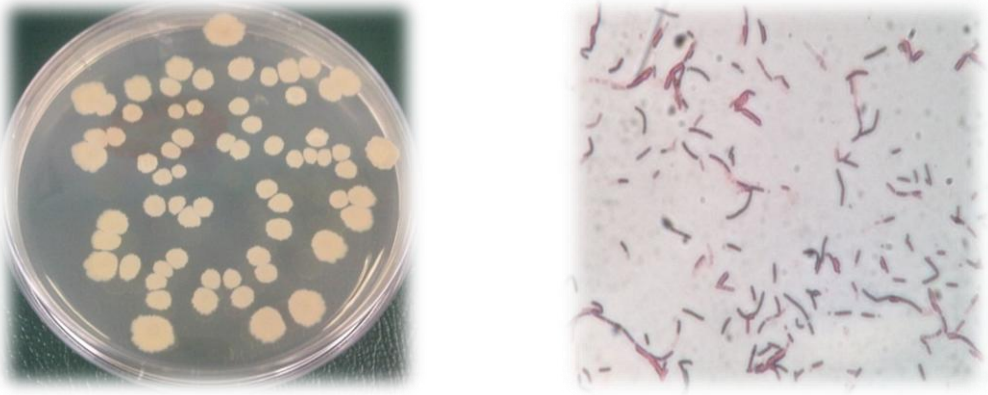
ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

4.1.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นฟอกอากาศด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)

เทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) เป็นการวัดปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุ โดยทฤษฎีของ BET ได้กล่าวไว้ว่า แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือจะแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ในการหาพื้นที่ผิวจำเพาะนั้นจะทำการวิเคราะห์ว่าพื้นที่ผิวสามารถดูดซับแก๊สไนโตรเจนได้มากน้อยเพียงใด แล้วจึงสามารถคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุนั้นๆได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเท่ากับ 6.04 ตารางเมตรต่อกรัม โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นฟอกอากาศนี้จะทำให้รู้ถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์รวมถึงจุลินทรีย์ด้วย

4.2 ลักษณะการเจริญและรูปร่างของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis*

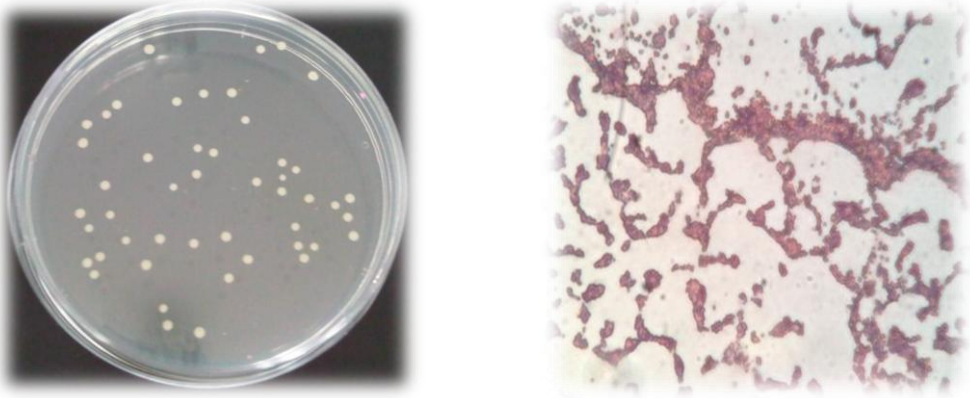
เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* โดยการสังเกตโคโลนีด้วยตาเปล่าและทำการย้อมสีแกรมแล้วส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าลักษณะโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเป็นวงกลม มีสีครีม โค้งนูน พื้นผิวของโคโลนีส่วนใหญ่มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ แผ่กว้างขนาดใหญ่ และเมื่อทำการย้อมสีแกรมแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า จะเห็นลักษณะเซลล์มีการเรียงตัวกระจัดกระจายเป็นรูปทรงท่อน มีขนาดอยู่ในช่วง 0.3 –2.2 x 1.2 –7.0 ไมโครเมตร ย้อมติดสีน้ำเงินหรือม่วงของ Crystal violet เป็นการยืนยันว่าเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมบวก และสามารถพบเอนโดสปอร์รูปกลมอยู่ภายในเซลล์ แสดงดังภาพที่ 4.3



(ก) ลักษณะโคโลนีจากการมองด้วยเปล่า (ข) ลักษณะรูปร่างของเซลล์จากการย้อมสีแกรม

ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*

ส่วนเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะโคโลนีโดยการสังเกตด้วยตาเปล่าและทำการย้อมสีแกรมแล้วส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* มีลักษณะโคโลนีขนาดเล็ก รูปวงกลม โค้งนูน มีสีครีม พื้นผิวของเชื้อแบคทีเรียมีลักษณะเรียบ และเมื่อทำการย้อมสีแกรม แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า จะพบว่าเซลล์รูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดอยู่ในช่วง 0.5 –1.0 ไมครอน ไม่มีสปอร์ เรียงตัวเป็นกลุ่มคล้ายพวงองุ่น ย้อมติดสีน้ำเงินหรือม่วงของ Crystal violet จึงเป็นการยืนยันว่าเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมบวก แสดงดังภาพที่ 4.4



(ก) ลักษณะโคโลนีจากการมองด้วยเปล่า (ข) ลักษณะรูปร่างของเซลล์จากการย้อมสีแกรม

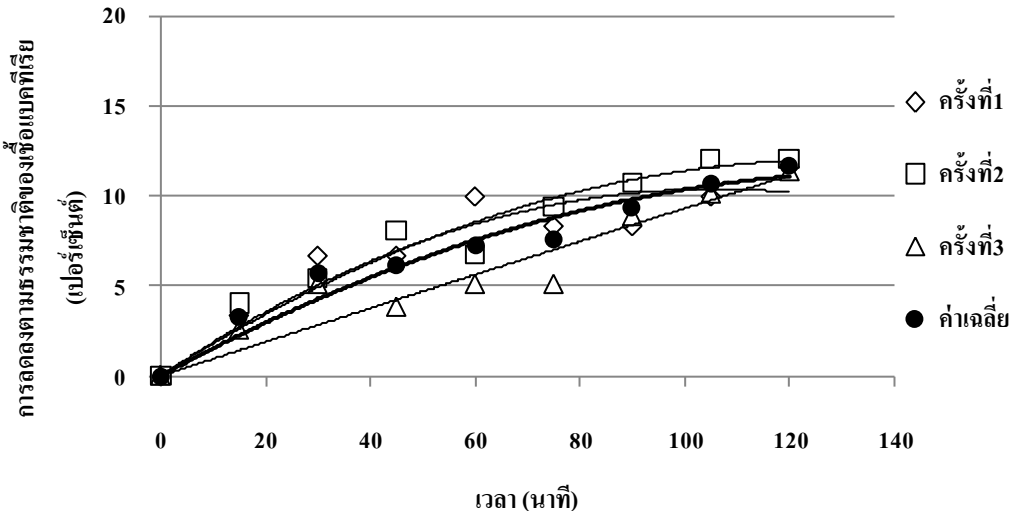
ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

4.3 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*

เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่สร้างสปอร์และสามารถพบได้ในอากาศทั่วไป โดยสปอร์ของ *Bacillus subtilis* มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ซึ่งเกี่ยวกับระบบทางเดินอาหาร ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 การลดลงตามธรรมชาติของแบคเรีย *Bacillus subtilis* ในอากาศ (Baseline) หรือชุดควบคุม

ในการทดลองชุดควบคุมเพื่อหา Baseline จะทำการทดลองในสภาวะที่ปิดไฟ และไม่มีแผ่นฟอกอากาศ เพื่อสังเกตการลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ในอากาศ โดยผลการทดลองพบว่า ตลอดระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที มีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะเห็นการลดลงอย่างชัดเจนในช่วงเวลา 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ จนค่อนข้างคงที่ถึงนาทีที่ 120 โดยเส้นกราฟทั้งสามจะมีความสอดคล้องและมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อคำนวณปริมาณการลดลงเฉลี่ยในเวลา 120 นาทีของแบคทีเรีย *B. subtilis* เท่ากับร้อยละ 11.69±0.37 ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคเรีย *Bacillus subtilis* ในอากาศ (Baseline)

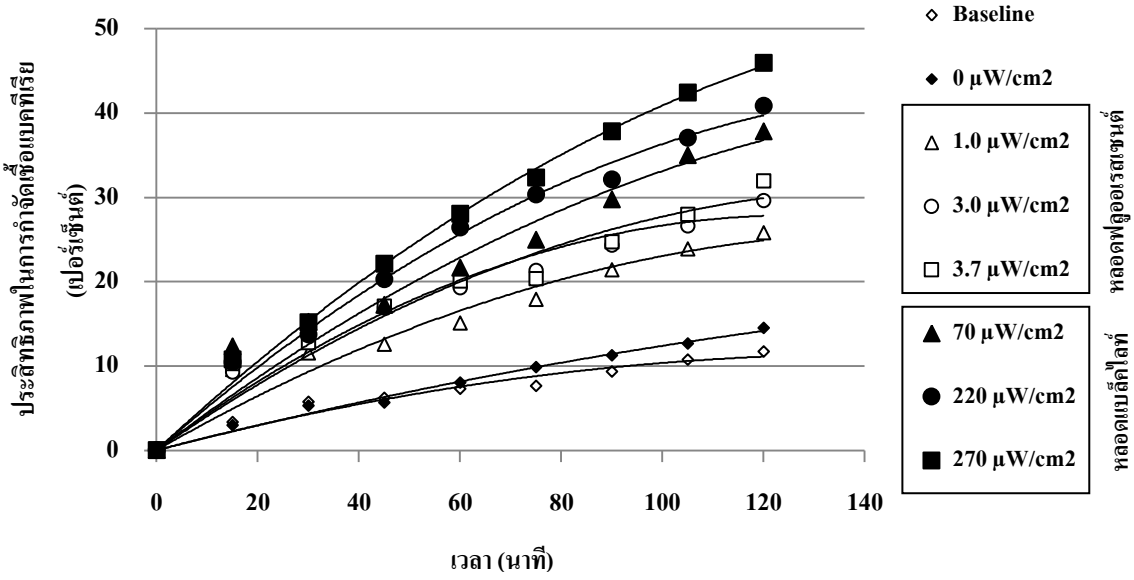
4.3.2 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

เมื่อทำการทดลองการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ด้วยแผ่นฟอกอากาศที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.23 ตารางเมตร ในสภาวะที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูเรสเซนต์กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสที่มีความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน คือ 1.0 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เปรียบเทียบการใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร ในระยะเวลาทดลอง 120 นาที ผลการทดลองพบว่า

ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ที่ความเข้มแสงยูวี 0 ถึง 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรของการใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่า แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์จะสามารถกำจัดแบคทีเรีย *B. subtilis* ได้ดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรสามารถกำจัดแบคทีเรียได้ดีที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 45.93±2.40 รองลงมาคือความเข้มแสงยูวี 220 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรมีค่าเท่ากับร้อยละ 40.84±1.37 และความเข้มแสงยูวี 70 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรมีค่าเท่ากับร้อยละ 37.81±0.48 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม ANOVA พบว่าประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.000$)

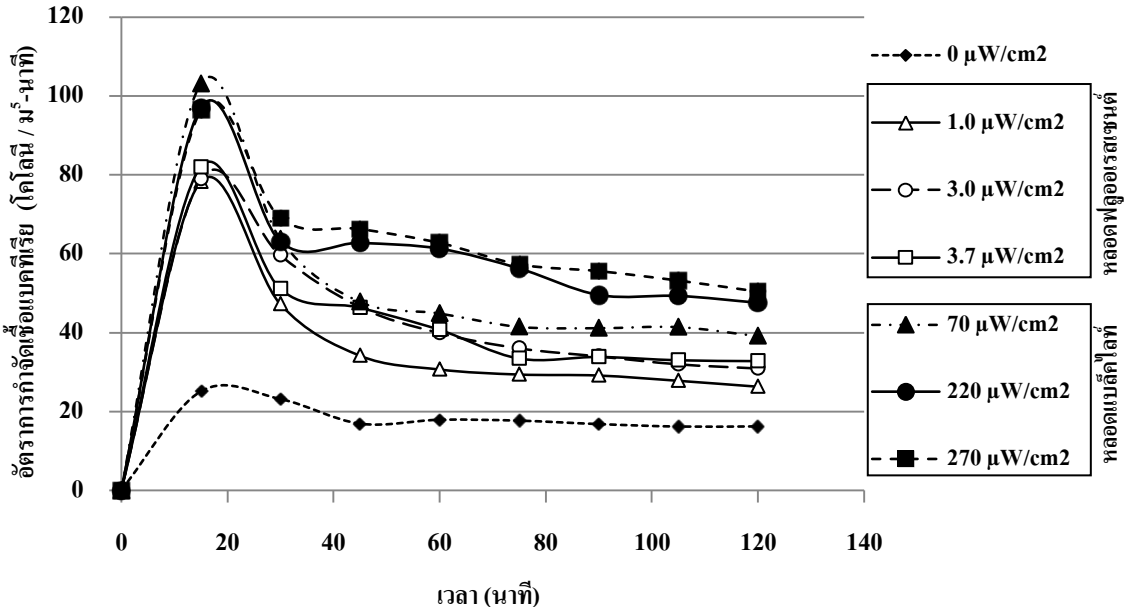
จากประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ที่พบว่า แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์สามารถกำจัดแบคทีเรีย *B. subtilis* ได้ดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องมาจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์มีความเข้มแสงยูวีสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ประมาณ 90 เท่า จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pal และคณะ (2007) ที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างแหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ (0.013ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) กับแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ (4.28 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ในการกำจัดแบคทีเรีย *B. subtilis* พบว่าแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้

ดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ และนอกจากนั้นยังพบว่าที่ความเข้มแสงยูวีสูงจะสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

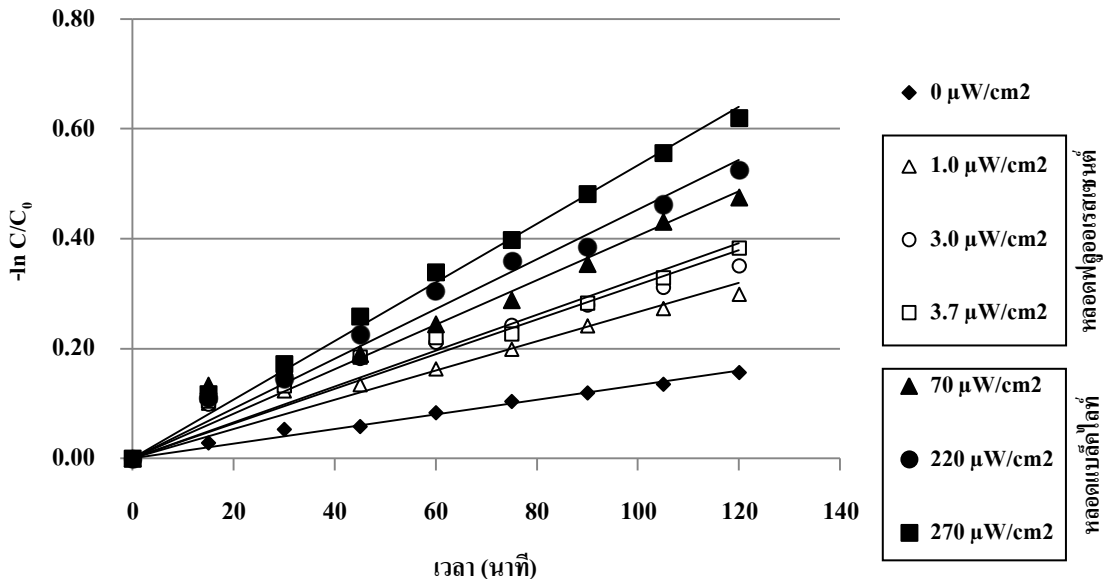
เมื่อพิจารณาอัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศไททาเนียมไดออกไซด์ตลอดระยะเวลา 120 นาที ที่ความเข้มแสงยูวีตั้งแต่ 0 ถึง 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ได้ผลดังภาพที่ 4.7 อัตราการกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และหลังจากนาทีที่ 30 จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดยอัตราการกำจัดในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดของเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง สภาวะการทดลองที่มีอัตราการกำจัดดีที่สุด คือ แหล่งกำเนิดแสงแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสง 270 220 และ70ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงว่าความเข้มแสงยูวีที่สูงจะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสได้สูงขึ้น และส่งผลให้มีอัตราการกำจัดของแบคทีเรียโดยแผ่นฟอกอากาศตลอดระยะเวลาในการทดลองสูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.7 อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

4.3.3 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

เพื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* กับเวลาในแต่ละความเข้มแสงยูวี จากภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* แต่ละช่วงเวลา ต่อปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นจะลดลง โดยความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรจะมีปริมาณเชื้อแบคทีเรียลดลงมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการกำจัดจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าคงที่อัตราการกำจัดเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียสูงขึ้นด้วย โดยความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดสูงที่สุดเท่ากับ 0.0053 นาที$^{-1}$ แสดงว่าเมื่อเพิ่มความเข้มแสงยูวีจะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและค่าคงที่อัตราการกำจัดที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.8 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* กับเวลาที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

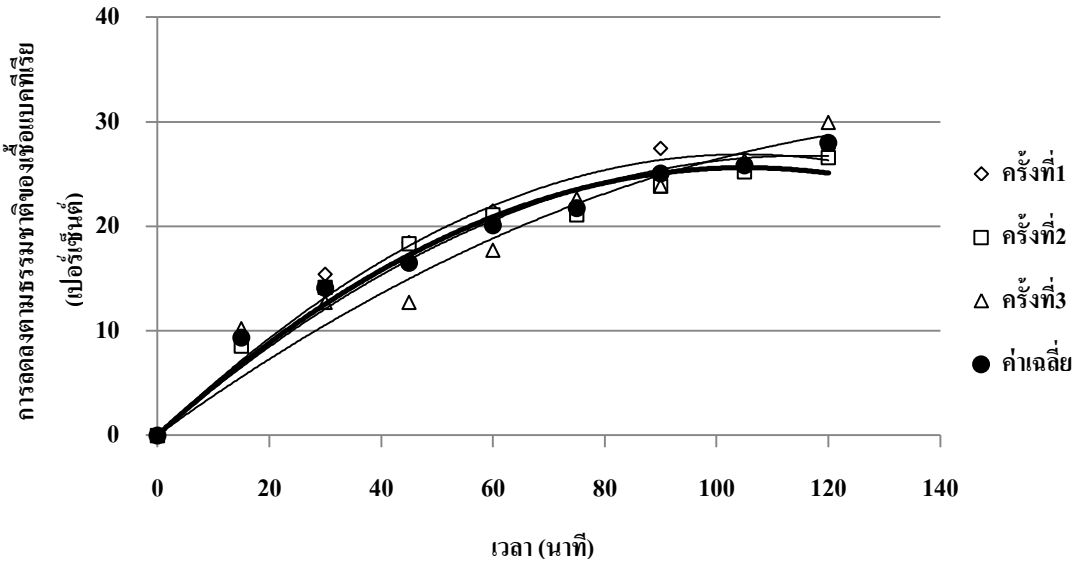
ความเข้มแสงยูวี (ไมโครวัตต์ / ตร.ซม.)	สมการความสัมพันธ์	R^2	ค่าคงที่อัตราการกำจัด (นาที$^{-1}$)
0	y = 0.0011x	0.9006	0.0011
1.0	y = 0.0013x	0.9855	0.0013
3.0	y = 0.0027x	0.9108	0.0027
3.7	y = 0.0033x	0.9372	0.0033
70	y = 0.0041x	0.9570	0.0041
220	y = 0.0045x	0.9794	0.0045
270	y = 0.0053x	0.9923	0.0053

4.4 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่ไม่มีสปอร์และสามารถพบได้ในอากาศทั่วไป ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ซึ่งเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ และผิวหนังของมนุษย์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ *Staphylococcus epidermidis* เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.4.1 การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศ (Baseline) หรือชุดควบคุม

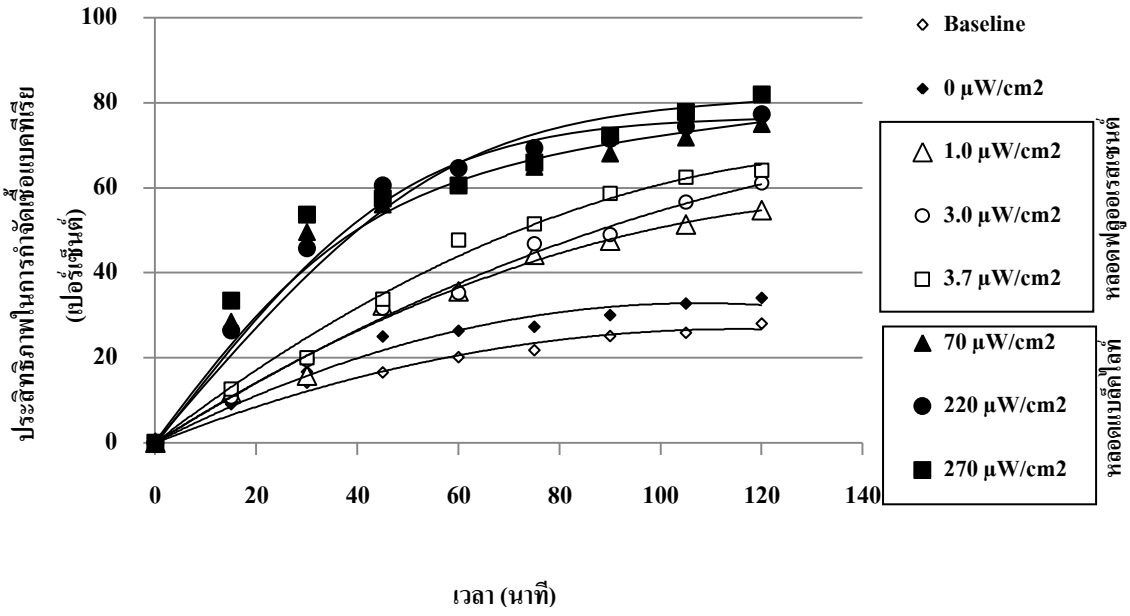
ผลการทดลองของชุดควบคุมหรือ Baseline เมื่อทำการปิดไฟและทดสอบในสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ พบว่า การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* เมื่อทำการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลดังภาพที่ 4.9 โดยจะเห็นได้ว่าช่วงแรกของการทดลองตั้งแต่นาทีที่ 0 จนถึงนาทีที่ 60 แบคทีเรียจะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะมีแนวโน้มการลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแรก และเมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง จะพบว่ามีแนวโน้มค่อนข้างเป็นไปในทางเดียวกัน โดยปริมาณลดลงเฉลี่ยในเวลา 120 นาทีของ *S. epidermidis* มีค่าเท่ากับร้อยละ 28.02±1.75



ภาพที่ 4.9 การลดลงตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* (Baseline)

4.4.2 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

ในการทดลองกำจัดเชื้อ *S. epidermidis* ด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูเรสเซนต์ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน คือ 1.0 3.0 และ 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 70 220 และ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร โดยใช้แผ่นฟอกอากาศที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ขนาด 0.23 ตารางเมตร และระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที พบว่าได้ผลดังภาพที่ 4.10



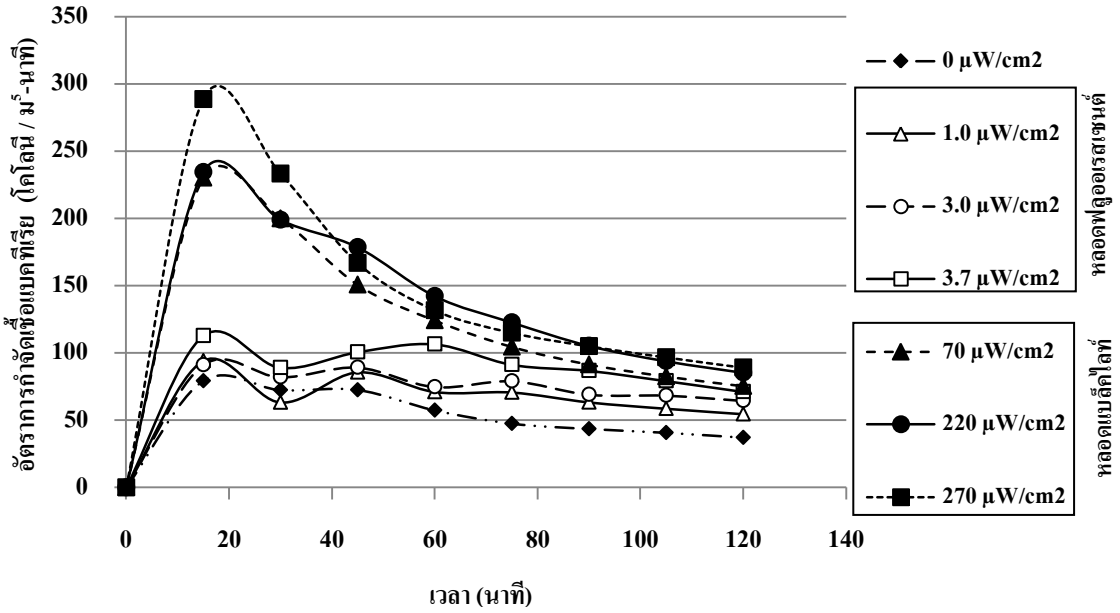
ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

โดยผลการทดลองจากภาพที่ 4.10 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* กับเวลาที่ความเข้มแสงยูวี 0 ถึง 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามระยะเวลาในการทดลอง โดยจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงนาทีที่ 45 ประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งเส้นกราฟของชุดการทดลองมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ดีที่สุด คือ แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 81.92±2.26 ที่

ความเข้มแสงยูวี 220 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตรจะมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 77.28±0.77 และที่ความเข้มแสงยูวี 70 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตรจะมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 74.96±1.01 เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม ANOVA ของประสิทธิภาพแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p=0.000) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มแสงยูวี โดยเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.3.2

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuaybamroong และคณะ (2011) ที่พบว่าหลอดยูวีเอแบล็คไลท์ที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ จะสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ได้ดีกว่าหลอดวิซิเบิลไวท์ไลท์ โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 จะกำจัดได้ดีที่สุด เช่นเดียวกันกับในการทดลองนี้ที่ได้ใช้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5

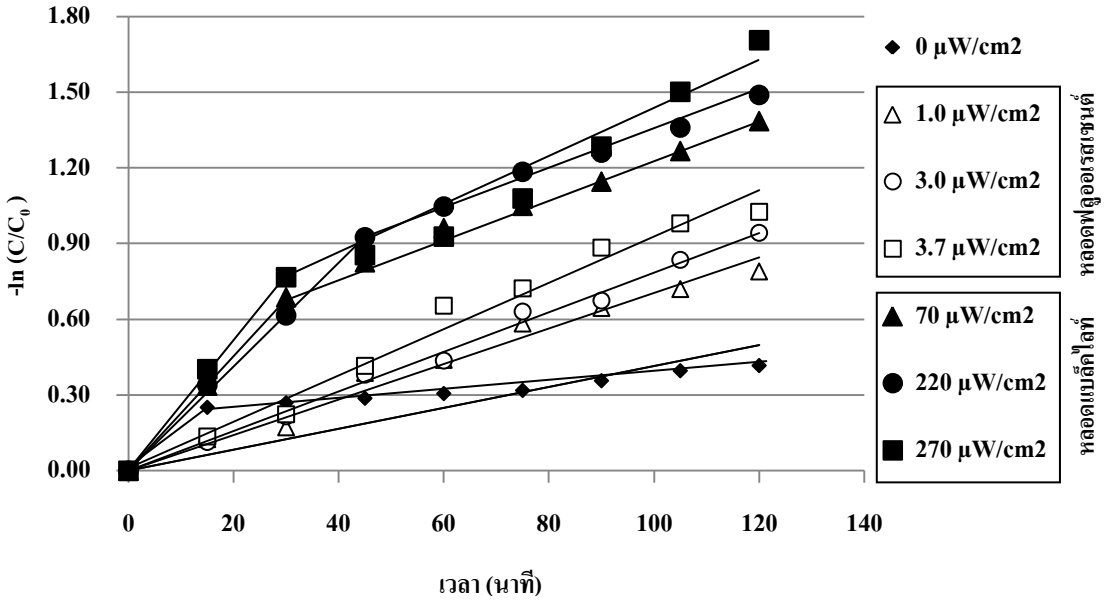
ผลของอัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศ พบว่าจะมีอัตราการกำจัดสูงสุดที่นาทีที่ 15 และอัตราการกำจัดจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งมีแนวโน้มเกือบจะคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยแนวโน้มของแต่ละชุดการทดลองมีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันนอกจากนี้แนวโน้มของกราฟระหว่างผลของอัตราการกำจัดกับประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียยังมีความสอดคล้องกัน นั่นคือประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลองและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนค่อนข้างคงที่ โดยความเข้มแสงยูวีที่ให้อัตราการกำจัดที่ดีที่สุด คือ ความเข้มแสงยูวีจากแหล่งกำเนิดแสงแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 270 220 และ 70 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเข้มแสงยูวีมีผลต่ออัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

4.4.3 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* กับเวลาในแต่ละความเข้มแสงยูวี พบว่าความเข้มแสงยูวีที่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* มากที่สุด คือ 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรดังภาพที่ 4.12 และเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการกำจัดจากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเข้มแสงยูวีสูงสุด คือ ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรจะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มแสงยูวีอื่นๆ โดยจะแบ่งเป็นสองช่วงคือ ตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึง 30 จะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดเท่ากับ 0.0258 นาที$^{-1}$ และนาทีที่ 30 ถึง 120 จะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดเท่ากับ 0.0093 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะ-ตะไลซีสได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pal และคณะ (2007) ที่พบว่าค่าคงที่อัตราการกำจัดจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์มีค่ามากกว่าค่าคงที่อัตราการกำจัดจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มแสงยูวีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและค่าคงที่อัตราการกำจัดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 4.12 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* กับเวลาที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

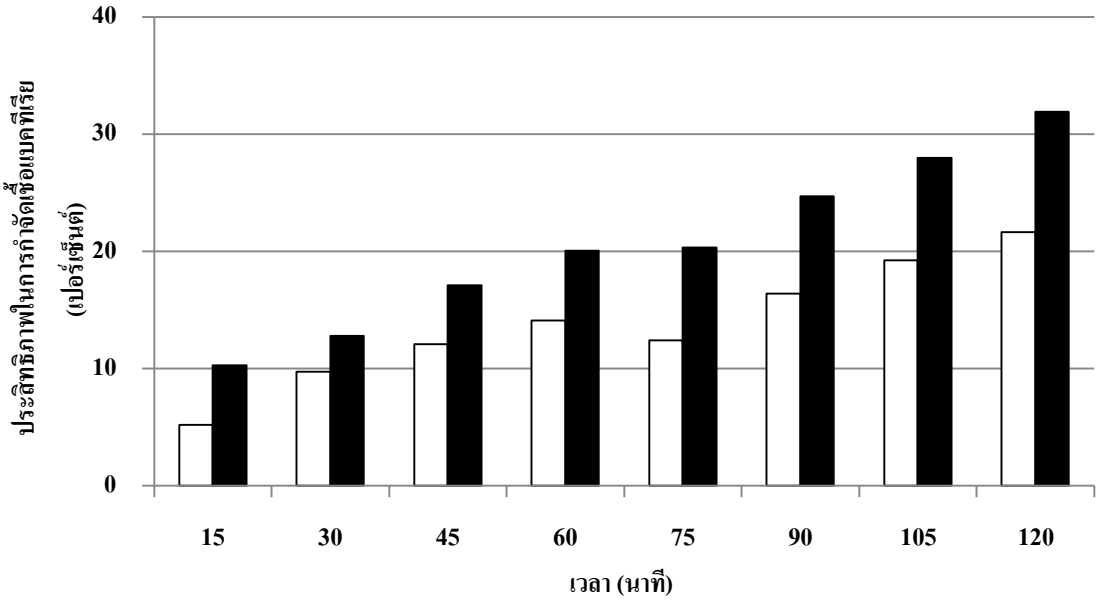
ความเข้มแสงยูวี (ไมโครวัตต์ / ตร.ซม.)	สมการความสัมพันธ์	R^2	ค่าคงที่อัตราการกำจัด (นาที$^{-1}$)
0	y = 0.0031x	0.8718	0.0031
1.0	y = 0.0042x	0.3404	0.0042
3.0	y = 0.0070x	0.9781	0.0070
3.7	y = 0.0079x	0.9937	0.0079
70 (นาที 0-30)	y = 0.0228x	0.9999	0.0228
70 (นาที 30-120)	y = 0.0078x + 0.4536	0.9935	0.0078
220 (นาที 0-45)	y = 0.0207x	0.9981	0.0207
220 (นาที 45-120)	y = 0.0075x+ 0.5879	0.9929	0.0075
270 (นาที 0-30)	y = 0.0258x	0.9990	0.0258
270 (นาที 30-120)	y= 0.0093x + 0.4880	0.9440	0.0093

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศของแต่ละแหล่งกำเนิดแสง

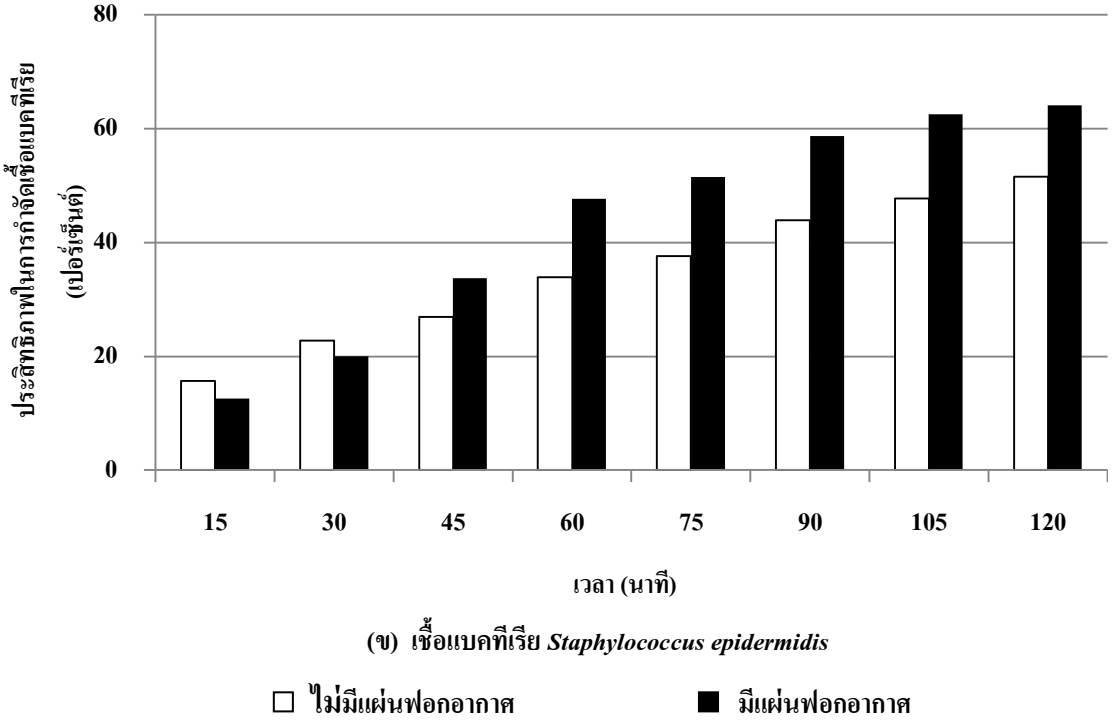
ทำการทดลองโดยนำผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* จากแต่ละแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดมาใช้เปรียบเทียบกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการทดลองที่ทำการเปิดไฟแต่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศ (Photolysis) กับมีแผ่นฟอกอากาศ (Photocatalysis) ซึ่งผลจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่สามารถกำจัดแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ดีที่สุดคือ ความเข้มแสงยูวี 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ดีที่สุด คือ ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะนำความเข้มแสงยูวีที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ดีที่สุดนี้มาใช้ในการทดลองดังต่อไปนี้

4.5.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ ระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับการมีแผ่นฟอกอากาศ โดยความเข้มแสงที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ความเข้มแสงยูวี 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.13



(ก) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ในสภาวะที่มีและไม่มีแผ่นฟอกอากาศด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพที่ 4.13 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* กับเวลา ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า สภาวะการทดลองที่มีแผ่นฟอกอากาศจะสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้กว่าไม่มีแผ่นฟอกอากาศ โดยการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* จะมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 31.93±1.52 และการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 21.64±2.27 ซึ่งเป็นไปแนวทางเดียวกันกับผลการวิจัยของ Pal และคณะ (2007) ที่ศึกษาพบว่าเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มแสงยูวี 0.013 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 120 นาที สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ได้ประมาณร้อยละ 21 และเมื่อทำการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 53 ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ในสภาวะที่มีการเปิดไฟและไม่มีแผ่นฟอกอากาศ พบว่ามีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 51.54±3.07 และการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศจะมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 64.09±1.19 เมื่อทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ T-Test ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย

ทั้ง *B. subtilis* และเชื้อ *S. epidermidis* ระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p = 0.001$ และ $p = 0.016$ ตามลำดับ)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การทดลองที่มีการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าการทดลองที่มีการเปิดไฟเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่มีสารเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ จะเกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส จึงสามารถกำจัดแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การเปิดไฟเพียงอย่างเดียวก็มีผลในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในอากาศได้ ซึ่งเป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นถึงแม้จะมีความเข้มแสงยูวีเออยู่ในระดับต่ำ แต่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลภายในเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์ถูกทำลายได้ (Kuhn และคณะ, 2003) นอกจากนั้นยังมีผลการศึกษาที่ยืนยันว่าแสงยูวีที่มีช่วงคลื่นยาวระหว่าง 320-400 นาโนเมตร จะทำลายเซลล์ได้ โดยเกิดจากการกระตุ้นของโมเลกุลที่มีความไวต่อแสงภายในเซลล์ เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet OH$) ซูเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคัล (O_2^-) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นต้น ซึ่งเรดิคัลเหล่านี้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ และส่งผลทางด้านลบต่อจีโนมและโมเลกุลภายในเซลล์อื่นๆ สามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยจะปลดปล่อยและสูญเสียโพแทสเซียมไอออน (K^+) กรดไรโบนิวคลีอิก(RNA) โปรตีน และองค์ประกอบอื่นๆ ทำให้เซลล์เกิดการกลายพันธุ์ มีการเจริญเติบโตช้า จนกระทั่งเซลล์ตายได้ (Oguma, Katayama และ Ohgaki, 2002)

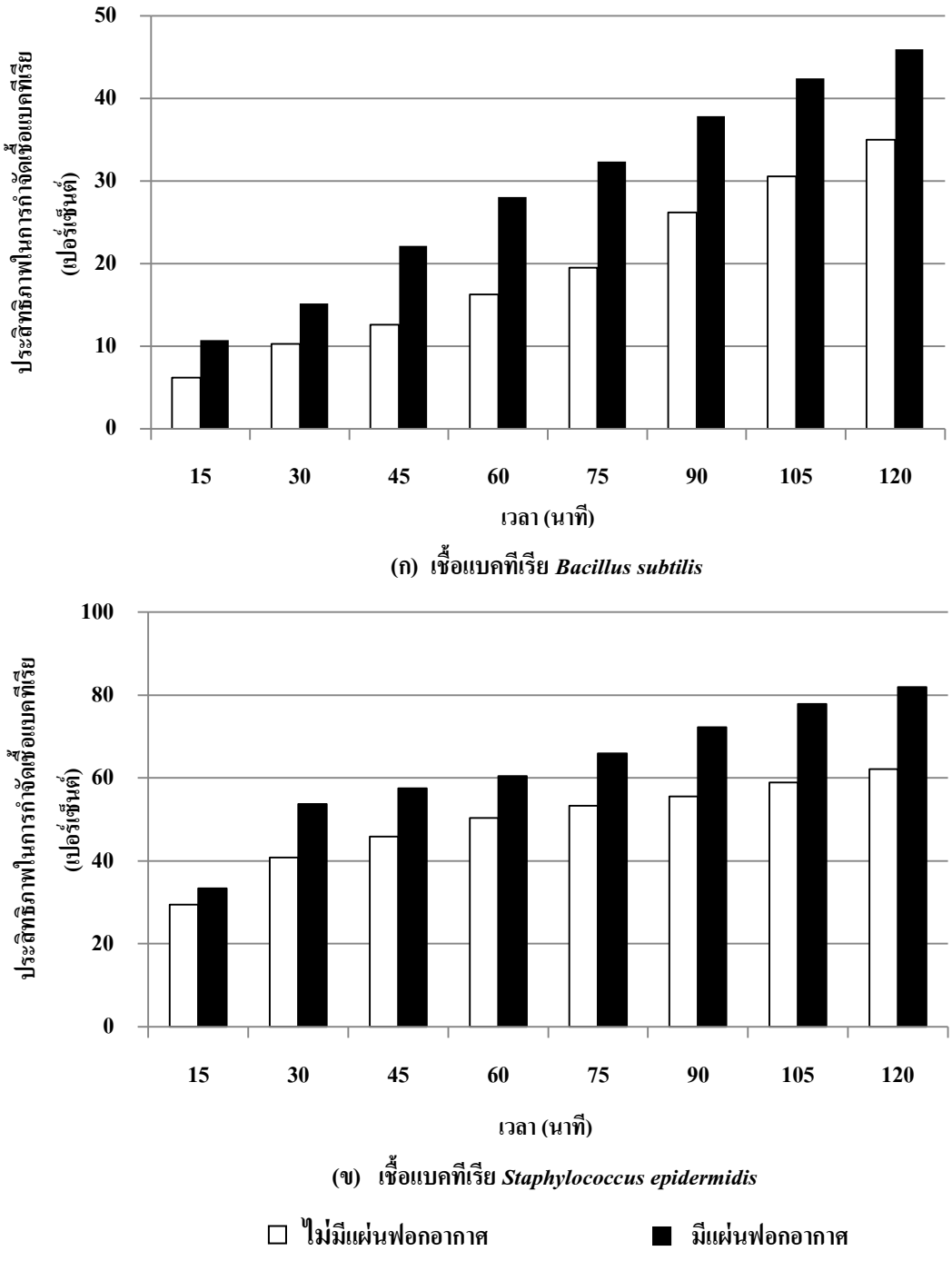
4.5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้หลอดแบล็คไลท์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* จากแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ ระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศ กับแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ โดยความเข้มแสงที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.14

ผลการทดลองพบว่า การเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ได้เท่ากับร้อยละ 34.99±1.43 และการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศมีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อได้ดีกว่าคือเท่ากับร้อยละ 45.93±2.40 เมื่อทดสอบทางสถิติโดยใช้ T-Test ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศและการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p = 0.013$)

ในสภาวะการทดลองที่ทำการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศหรือการเปิดไฟเพียงอย่างเดียว สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ได้เท่ากับร้อยละ 62.08±2.49 ส่วนการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 81.92±2.26 เมื่อทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ T-Test ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศและการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.002$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chotigawin และคณะ (2010) ที่พบว่าแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA ที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ได้ดีกว่าการเปิดไฟเพียงอย่างเดียว

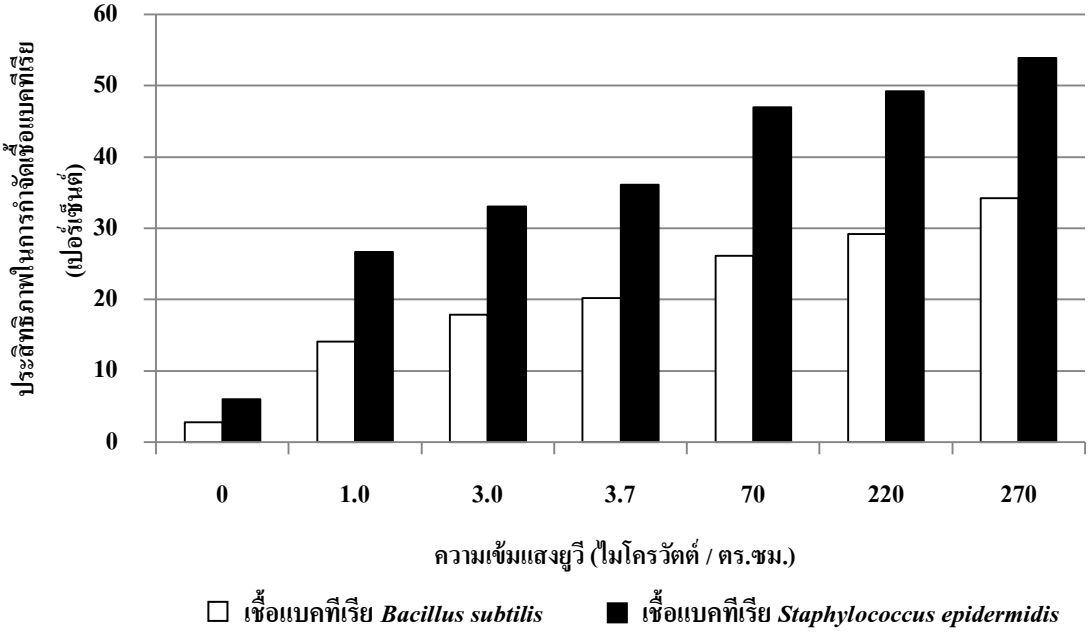
ผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ดีกว่าการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศ เนื่องจากในการทดลองใช้แผ่นฟอกอากาศที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อทำการกระตุ้นด้วยแสงจึงทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส ซึ่งสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี ส่วนการเปิดไฟโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียวนั้นแม้ว่าจะมีความเข้มแสงยูวีถึง 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จะทำให้เกิดการกระตุ้นโมเลกุลที่มีความไวต่อแสงภายในเซลล์ที่สามารถทำลายเซลล์ของแบคทีเรียได้เท่านั้น ต่างจากการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่มีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถเกิดกระบวนการดูดติดผิวและปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส จึงส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ดีกว่าด้วย



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ในสภาวะที่มีและไม่มีแผ่นฟอกอากาศด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์

4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่าง *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน ซึ่งการเปรียบเทียบนี้จะหักลบการลดลงตามธรรมชาติ (baseline) หรือชุดควบคุมของแต่ละเชื้อแบคทีเรียด้วย เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้

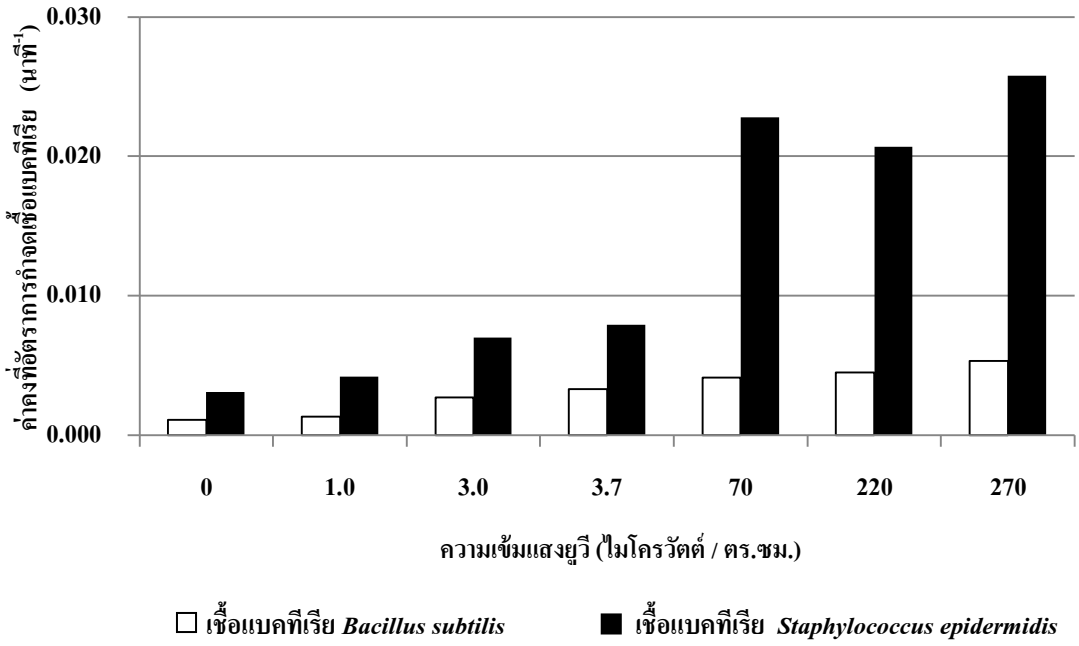


ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียระหว่างเชื้อ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* กับความเข้มแสงยูวี โดยทำการทดลอง 120 นาที ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ของแผ่นฟอกอากาศจะดีกว่าการกำจัดเชื้อ *B. subtilis* อย่างเห็นได้ชัดในทุกๆ ความเข้มแสงยูวี โดยแหล่งกำเนิดแสงและความเข้มแสงยูวีที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ได้ดีที่สุดคือแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 34.24±2.40 และ 53.90±2.26 ตามลำดับ รองลงมาคือ แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 220 และ 70 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อทำการ

ทดสอบทางสถิติโดยใช้ T-Test ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p=0.000-0.004) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแผ่นฟอกอากาศนี้จะกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ได้ดีกว่าการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียทั้งสองมีความแตกต่างกันโดย *B. subtilis* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่มีการสร้างสปอร์หรือเอนโดสปอร์ภายในเซลล์ ซึ่งเอนโดสปอร์นี้เป็นโครงสร้างของเซลล์ที่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี เช่น ความร้อนสูง ความแห้งแล้ง และแบคทีเรียสามารถทนต่อรังสียูวีได้ หรือแม้แต่รังสีคลื่นสั้นที่มีพลังงานสูง เป็นต้น (Moeller และคณะ, 2005) นอกจากนั้นยังมีความทนทานต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซีสด้วย (Pal และคณะ, 2005) ส่วนเชื้อแบคเรีย *S. epidermidis* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่มีความไวต่อรังสียูวีเอ และไม่มีสปอร์ ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับรังสียูวีจะทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์ซึ่งมีเปปทิโดไกลแคนเป็นองค์ประกอบถูกทำลายได้ง่าย (Liu และ Yang, 2003)

ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* กับความเข้มแสงยูวี พบว่าค่าคงที่อัตราการกำจัดของเชื้อทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* จะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดสูงกว่าเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ในทุกความเข้มแสงยูวี ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและความเข้มแสงยูวีที่ให้ค่าคงที่อัตราการกำจัดที่ดีที่สุด คือ แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* มีค่าคงที่อัตราการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 0.0258 นาที$^{-1}$ และ *B. subtilis* เท่ากับ 0.0053 นาที$^{-1}$ รองลงมาคือ แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 220 และ 70 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากต้องการใช้รังสียูวีในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคารสำนักงานร่วมกับการติดแผ่นฟอกอากาศต้องเปิดแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงที่เหมาะสมด้วย จึงจะเกิดการกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ



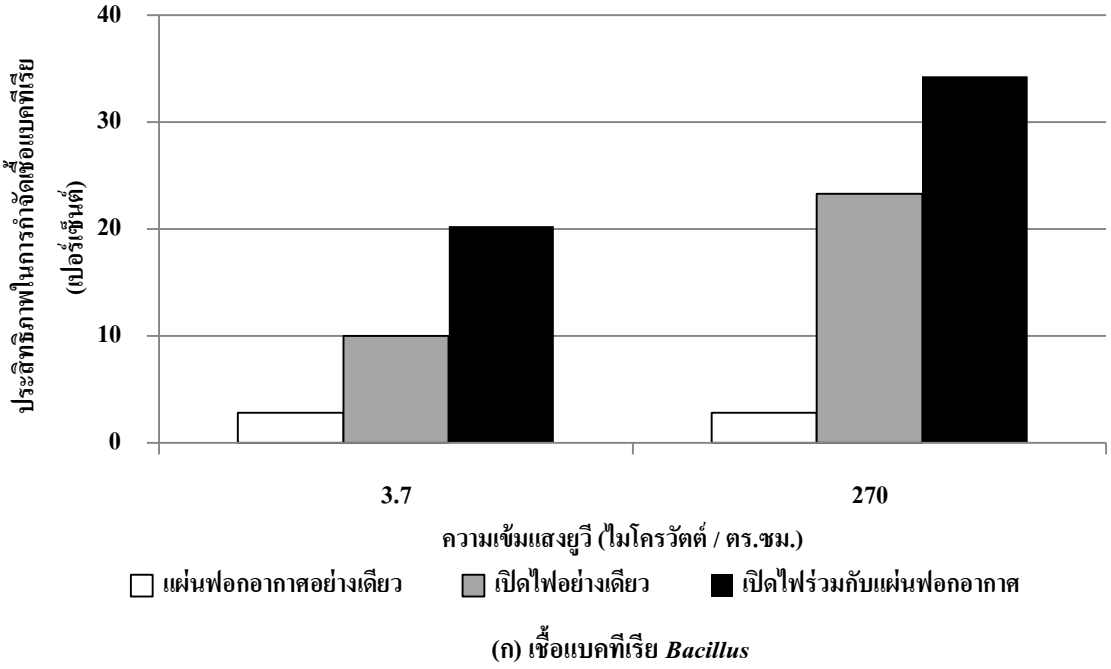
ภาพที่ 4.16 ค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ที่มีความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

4.7 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส

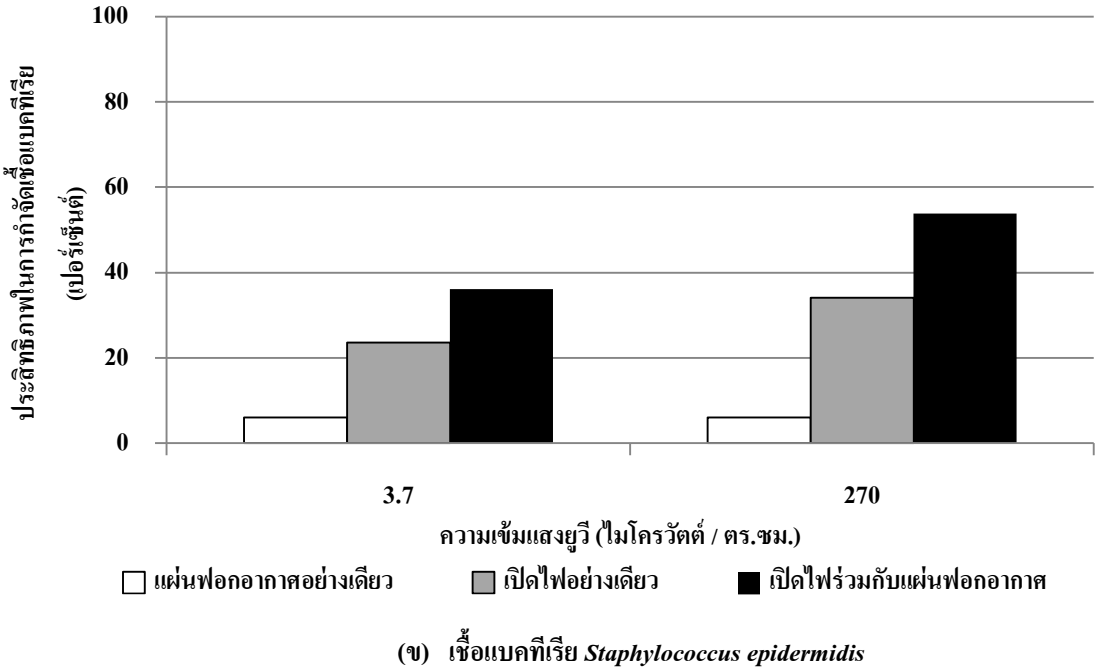
ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส ในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* จะเปรียบเทียบในสภาวะที่มีแผ่นฟอกอากาศเพียงอย่างเดียว สภาวะที่เปิดไฟเพียงอย่างเดียว และสภาวะที่มีการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ โดยพิจารณาผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าแหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่สามารถกำจัดแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ดีที่สุดคือ ความเข้มแสงยูวี 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ดีที่สุด คือ ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเข้มแสงยูวีทั้งสองนี้จะพิจารณาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส โดยจะทำการหักลบการลดลงตามธรรมชาติ (baseline) หรือชุดควบคุมของแต่ละเชื้อแบคทีเรียด้วย ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

การเปรียบเทียบในสภาวะที่มีแผ่นฟอกอากาศเพียงอย่างเดียว เปิดไฟเพียงอย่างเดียว และการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ที่แหล่งกำเนิดแสงแตกต่างกัน โดยภาพที่ 4.17 พบว่า ในสภาวะที่ทำการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอก

อากาศจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้แผ่นฟอกอากาศเพียงอย่างเดียว หรือการเปิดไฟเพียงอย่างเดียว โดยการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ได้ดีที่สุดคือ แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ ที่ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยจากกราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* เมื่อใช้แผ่นฟอกอากาศอย่างเดียว จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.80±0.64 และเปิดไฟเพียงอย่างเดียวจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 23.30±1.43 ซึ่งเมื่อรวมกันจะมีค่าน้อยกว่าการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.24±2.40 เช่นเดียวกันกับการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *S. epidermidis* ที่มีการใช้แผ่นฟอกอากาศอย่างเดียว จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.04±0.96 และเมื่อเปิดไฟเพียงอย่างเดียวจะเท่ากับร้อยละ 34.06±2.49 เมื่อรวมกันจะมีค่าน้อยกว่าการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 53.90±2.26 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโต-คะตะไลซีส โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส จะเกิดจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นฟอกอากาศทำปฏิกิริยาร่วมกับอนุภาคของแสงที่ตกกระทบ ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่า การใช้แผ่นฟอกอากาศเพียงอย่างเดียว และการเปิดไฟเพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด



(ก) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus*



(ข) เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการคุณภาพอากาศ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟอกอากาศ และการดำเนินการทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ คือ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศในสภาวะที่กระตุ้นด้วยความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และทำการควบคุมอุณหภูมิรวมถึงความชื้นให้คงที่ ได้ผลการทดลองที่สรุปได้ดังนี้

1. แผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกมีปริมาณของซิลิกอนออกไซด์และไททาเนียม-ไดออกไซด์ร้อยละ 54.67 และ 33.07 โดยน้ำหนัก และลักษณะโครงสร้างผลึกของแผ่นฟอกอากาศที่พบมากที่สุดในแผ่นฟอกอากาศ คือ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของไททาเนียมไดออกไซด์ นอกจากนั้นแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 6.04 ตารางเมตรต่อกรัม

2. การลดลงตามธรรมชาติหรือ Baseline ของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ในอากาศภายในห้องทดลองระบบปิด เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที พบว่า ปริมาณลดลงเฉลี่ยตามธรรมชาติของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองเท่ากับร้อยละ 11.69 และ 28.02 ตามลำดับ

3. ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัด อัตราการกำจัด และค่าคงที่อัตราการกำจัดของการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ดีที่สุด คือ สภาวะที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ ที่ความเข้มแสงยูวี 270ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 45.93 และมีค่าคงที่อัตราการกำจัดที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.0053 นาที$^{-1}$ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มแสงยูวีจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดรวมถึงค่าคงที่อัตราการกำจัดเพิ่มขึ้นด้วย

4. ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* พบว่า แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ที่ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีสได้ดีที่สุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 81.92 และค่าคงที่อัตราการกำจัดสูงสุด จะแบ่งเป็นสองช่วงคือ ตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึง 30 จะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดเท่ากับ 0.0258 นาที$^{-1}$ และนาทีที่ 30 ถึง 120 จะมีค่าคงที่อัตราการกำจัดเท่ากับ 0.0093 นาที$^{-1}$ โดยสภาวะดังกล่าวจะมีค่าอัตราการกำจัดสูงสุดเช่นเดียวกัน

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 3.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรระหว่างสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศ (Photolysis) กับมีแผ่นฟอกอากาศ (Photocatalysis) พบว่า ในสภาวะที่มีการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ร้อยละ 31.93 และ 64.09 ตามลำดับ จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการเปิดไฟเพียงอย่างเดียวซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 21.64 และ 51.54 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศจะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะ-ตะไลซีสระหว่างแผ่นฟอกที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีกว่าการเปิดไฟเพียงอย่างเดียว

6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* โดยใช้หลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 270 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรระหว่างการเปิดไฟในสภาวะไม่มีแผ่นฟอกอากาศ (Photolysis)กับมีแผ่นฟอกอากาศ (Photocatalysis) พบว่า แหล่งกำเนิดแสงหลอดแบล็คไลท์ร่วมกับแผ่นฟอกอากาศจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซีส โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 45.93 และ 81.92 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าการเปิดไฟเพียงอย่างเดียว ที่จะกระตุ้นโมเลกุลที่มีความไวต่อแสงภายในเซลล์ทำให้สามารถทำลายเซลล์ของแบคทีเรียได้เท่านั้น สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 34.99 และ 62.08 ตามลำดับ

7. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อทั้งสองชนิด พบว่าแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่ไม่มีสปอร์ได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่มีสปอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยการกำจัดแบคทีเรียในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก พบว่าควรทำการศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียชนิดอื่นๆที่สามารถพบได้ทั่วไปในอากาศ รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อราด้วย

2. ทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติกและนำไปใช้ในสถานที่จริง เช่น โรงพยาบาล อาคารสำนักงาน และโรงเรียน เป็นต้น โดยควรคำนึงถึงปริมาณความเข้มแสงที่ใช้ให้เหมาะสมต่อสถานที่ และอาคารสำนักงานด้วย

5.3 ความสำคัญเชิงวิศวกรรม

สามารถนำค่าคงที่อัตราการกำจัดไปใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม โดยมีแนวคิดมาจากค่าพื้นที่แผ่นฟอกอากาศ และความเข้มแสง ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง มีผลต่อค่าคงที่อัตราการกำจัด ซึ่งสามารถบอกได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการหาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย จะต้องคำนึงถึงค่าคงที่อัตราการกำจัดด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤตกรณ์ ประทุมวงษ์. 2540. เชื้อแบคทีเรียในอากาศที่ทำให้เกิดโรคทางเดินหายใจในย่านชุมชนของกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กฤษณียา ศังขจันทรานนท์. 2548. ชนิดและปริมาณของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อโรคในโรงพยาบาล และการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

คณิต ชัยวัฒนา. 2543. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์[ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://ruby.colorado.edu/~smyth/ min/tio2.html [2555 ตุลาคม 21]

ฒริกา คุ้มไทย. 2545. แบคทีเรียในอากาศบริเวณที่มีการสัญจรหนาแน่นของกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฑามาศ เทพชัยศรี. 2542. คู่มือปฏิบัติการวิชา สว 214 จุลชีววิทยาในทางสาธารณสุข. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาสุขศึกษา คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ชวิศร์ กรัณย์เมธากุล. 2549. การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ชุลีวัลย์ ธัญญศิรินนท์. 2550. การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยการใช้หลอด UV A เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เทียนฉาย สถิรภิวงศ์ . 2554. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยด้วยแผ่นฟอกอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์. ไททาเนีย: ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม[ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: http://www.vcharkarn.com/varticle/27809[2555 ธันวาคม 17]

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. 2548. จุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บัญญัติ สุขศรีงาม. 2525. จุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์ จำกัด.

ปรัศนีย์ เจริญสิน. 2549. การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พลากร พุทธรักษ์ และสุวรรณา ชัยทวีทรัพย์. 2551. การตรวจวิเคราะห์ทางห้องแบคทีเรีย. เอกสารคุณภาพห้องปฏิบัติการเทคนิคการแพทย์. โรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ.

วันทนี พันธุ์ประสิทธิ์. 2549. การระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์ธรรมสาร.

วีรนุช หลาง. 2551. จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วุทธินันท์ ศิริพงศ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สเปคตรัมรังสีอัลตราไวโอเลต[ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm [2554 มิถุนายน 21]

สรรค์ จิตรใคร่ครวญ. การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ[ออนไลน์].(ม.ป.ป.).แหล่งที่มา: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2552_57_179_P21_24.pdf[2554 มิถุนายน 10]

สุจิตรา นาวารัตน์. 2553. การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลสิส การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี และการเติมคลอรีน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. 2552. การจัดจำแนกแบคทีเรียแกรมลบ รูปท่อน วงศ์เอนเทอแบคทีเรียซีอี. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุภาภรณ์ พัวเพิ่มพูนสิริ. 2527. แบคทีเรียแกรมบวก. ขอนแก่น: คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาษาอังกฤษ

Ao, C.H. and Lee, S.C. 2004. Combination effect of activated carbon with TiO_2 for the photodegradation of binary pollutants at typical indoor air level. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 161: 131-140.

Baron, P.A. and Willeke, K. 2001. Aerosol measurement. principle, technic and application. 2nd edition, Canada. John Wiley and sons.

Chotigawin, R., Sribenjalux, P., Supothina, S., Johns, J., Charerntanyarak, L. and Chuaybamroong, P. 2010. Airborne Microorganism Disinfection by Photocatalytic HEPA Filter. Environment Asia. 3(2): 1-7.

Chuaybamroong, P., Thunyasirinon, C., Supothina, S., Sribenjalux, P. and Wu, C.Y. 2011. Performance of photocatalytic lamps on reduction of culturable airborne microorganism concentration. Chemosphere. 83: 730–735.

Huang, Z., Maness, P-C., Blake, D.M., Wolfrum, E.J., Smolinski, S.L. and Jacoby, W.A. 2000. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 130: 163-170.

Iangphasuk, M. 1997. The potential for photocatalytic oxidation of dyes in textile wastewater. Ph.D. Thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok.

Ibanez, J.A., Litter, M.I. and Pizarro, R.A. 2003. Photocatalytic bactericidal effect of TiO_2 on *Enterobacter cloacae* comparative study with other Gram (-) bacteria. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 157: 81–85.

Kim, K.Y. and Kim, C.N. 2007. Airborne microbiological characteristics in public buildings of Korea. Building and environment. 42: 2188-2196.

Kuhn, K.P., Chaberny, I.F., Massholder, K., Stickler, M., Benz, V.W., Sonntag, H.G., and Erdinger, L. 2003. Disinfection of surfaces by photocatalytic oxidation with titanium dioxide and UVA light. Chemosphere. 53: 71-77.

Lee, B.U., Hong, I.G., Lee, D.H., Chong, E.S., Jung, J.H., Lee, J.H., Kim, H.J. and Lee, I.S. 2012. Bacterial Bioaerosol Concentrations in Public Restroom Environments. Aerosol and Air Quality Research. 12: 251–255.

Lee, B.U., Kim, S.H. and Kim, S.S. 2002. Hygroscopic growth of *E. coli* and *B. subtilis* bioaerosols. Journal of Aerosol Science. 33: 1721–1723.

Lee, Y.H. and Lee, B.U. 2006. Inactivation of airborne *E. coli* and *B. subtilis* bioaerosols utilizing thermal energy. Journal of Microbiology and Biotechnology. 16: 1684–1689.

Lehr, J.H., Tyler, E.G., Wayne, A.P., and Jack, D. 1980. Domestic Water Treatment. McGraw Hill Book Company, New York.

Lin, C.Y. and Lin, C.S. 2003. Inactivation of Microorganisms on the Photocatalytic Surfaces in Air. Aerosol Science and Technology. 37: 939-946.

Liu, H.L. and Yang, C.K. 2003. Photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* and *Lactobacillus helveticus* by ZnO and TiO2 activated with ultraviolet light. Process Biochemistry. 39: 475-481.

Moeller, R., Horneck, G., Facius, R. and Stackebrandt, E. 2005. Role of pigmentation in protecting *Bacillus* sp. endospores against environmental UV radiation. FEMS Microbiology Ecology. 51: 231-236.

Mullican, C.L., Buchanan, L.M. and Hoffman, R.K. 1971. Thermal inactivation of aerosolized *Bacillus subtilis* var. *niger* spores. Applied Microbiology. 22: 557–559.

Nicas, M. and Miller, S.L. 1999. A multi-zone model evaluation of the efficacy of upper-room air ultraviolet germicidal irradiation. Applied Occupational and Environmental Hygiene. 14: 317–328.

Noakes, C.J., Fletcher, L.A., Beggs, C.B., Sleigh, P.A. and Kerr, K.G. 2004. Development of a numerical model to simulate the biological inactivation of airborne microorganisms in the presence of ultraviolet light. Journal of Aerosol Science. 35: 489–507.

Oguma, K., Katayama, H. and Ohgaki, S. 2002. Photoreactivation of *Escherichia coli* after low- or medium-pressure UV disinfection determined by an endonuclease sensitive site assay. Applied and Environmental Microbiology. 68**:** 6029-6035.

Pal, A., Min, X., Yu, L.E., Pehkonen, S.O. and Ray, M.B. 2005. Photocatalytic inactivation of bioaerosols by TiO_2 coated membrane. International Journal of Chemical Reactor Engineering. 3: 1–15.

Pal, A., Pehkonen, S.O., Yu, L.E. and Ray, M.B. 2007. Photocatalytic inactivation of Gram-positive and Gram-negative bacteria using fluorescent light. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 186: 335–341.

Ross, C., Menezes, J.R., Svidzinski, T.E., Albino, U, and Andrade, G. 2004. Studies on fungal and bacterial population of air-conditioned environments. Brazilian Archives of Biology and Technology. 47: 827-835.

Sato, T., Koizumi, Y. and Taya, M. 2003. Photocatalytic deactivation of airborne microbial cells on TiO2-loaded plate. Biochemical Engineering Journal. 14: 149–152.

U.S. EPA. 1995. The inside story[Online]. Available from: http://epa.gov/iaq/pubs/insidest.html [15 June 2012].

Visible-Light Photocatalysis: A Cleaner Way of Life. 2005. Photocatalysis[Online]. Available from: http://dev.nsta.org/evwebs/1952/photocatalysis.htm[2011, May 16]

Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A. and Block, S.S. 2006. Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air. Applied Catalysis B: Environmental. 65: 57–65.

Wamer, W.G., Yin, J.J. and Wei, R.R. 1997. Oxidative damage to nucleic acids photosensitized by titanium dioxide. Free Radical Biology & Medicine. 23: 851-858.

Zacarias, S.M., Vaccari, M.C., Alfano, O.M., Irazoqui, H.A. and Imoberdorf, G.E. 2010. Effect of the radiation flux on the photocatalytic inactivation of spores of *Bacillus subtilis.* Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 214: 171–180.

Zhao, J., Krishna, V., Hua, B., Moudgil, B. and Koopman, B. 2009. Effect of UVA irradiance on photocatalytic and UVA inactivation of *Bacillus cereus* spores. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 94: 96–100.

Zucker, B.A., Trojan, S. and Muller, W. 2000. Airborne gram-negative bacterial flora in animal houses. Journal of Veterinary Medicine B, Infectious Diseases and Veterinary Public Health, Series B. 47: 37–46.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองประสิทธิภาพในการกำจัด
เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*

ตารางที่ ก -1 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองควบคุม (Baseline) อุณหภูมิ 25.7-24.6°C ความชื้น 59.6-57.1 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)
0	2516.9	0.00	3251.1	0.00	3519.2	0.00	3095.7	0.00
15	2432.8	3.34	3118.8	4.07	3429.3	2.56	2993.7	3.32± 0.76
30	2349.3	6.66	3075.0	5.42	3339.9	5.09	2921.4	5.72±0.83
45	2349.3	6.66	2987.8	8.10	3384.5	3.83	2907.2	6.20±2.17
60	2266.2	9.96	3031.3	6.76	3339.9	5.09	2879.1	7.27±2.47
75	2307.7	8.31	2944.3	9.44	3339.9	5.09	2864.0	7.61±2.25
90	2307.7	8.31	2901.0	10.77	3206.9	8.88	2805.2	9.32±1.29
105	2266.2	9.96	2857.9	12.10	3162.8	10.13	2762.3	10.73±1.19
120	2224.8	11.60	2857.9	12.10	3118.8	11.38	2733.8	11.69±0.37

ตารางที่ ก -2 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.8 -26.0 °C ความชื้น 60.7-58.1 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2686.4	0.00	0.00	3118.8	0.00	0.00	3429.3	0.00	0.00	3078.2	0.00	0.00
15	2559.1	4.74	36.90	3031.3	2.81	25.37	3384.5	1.31	12.97	2991.6	2.95± 1.72	25.08
30	2516.9	6.31	24.57	2944.3	5.60	25.29	3295.4	3.90	19.40	2918.9	5.27±1.24	23.09
45	2559.1	4.74	12.30	2901.0	6.98	21.04	3251.1	5.20	17.22	2903.7	5.64±1.19	16.85
60	2474.8	7.88	15.33	2857.9	8.37	18.91	3162.8	7.77	19.31	2831.8	8.01±0.32	17.85
75	2432.8	9.44	14.70	2814.8	9.75	17.63	3075.0	10.33	20.54	2774.2	9.84±0.45	17.62
90	2391.0	11.00	14.27	2771.9	11.13	16.76	3031.3	11.60	19.23	2731.4	11.24±0.32	16.75
105	2349.3	12.55	13.96	2729.1	12.50	16.14	2987.8	12.88	18.28	2688.7	12.64±0.20	16.13
120	2307.7	14.10	13.72	2643.8	15.23	17.21	2944.3	14.14	17.57	2631.9	14.49±0.64	16.17

ตารางที่ ก -3 (1) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 1.0 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.4-25.7 °C ความชื้น 59.4- 57.5 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2814.8	0.00	0.00	3031.3	0.00	0.00	2601.4	0.00	0.00	2815.8	0.00	0.00
15	2601.4	7.58	61.86	2686.4	11.38	73.08	2349.3	9.69	99.99	2545.7	9.55± 1.90	78.31
30	2559.1	9.09	37.06	2601.4	14.18	42.57	2307.7	11.29	62.31	2489.4	11.52±2.56	47.31
45	2516.9	10.58	28.79	2601.4	14.18	32.39	2266.2	12.89	41.54	2461.5	12.55±1.82	34.24
60	2432.8	13.57	27.68	2559.1	15.58	30.28	2183.5	16.06	34.22	2391.8	15.07±1.32	30.73
75	2307.7	18.02	29.40	2391.0	21.12	21.83	2224.8	14.48	37.12	2307.8	17.87±3.33	29.45
90	2183.5	22.43	30.50	2349.3	22.50	24.16	2101.3	19.22	32.95	2211.4	21.38±1.87	29.20
105	2101.3	25.35	29.54	2307.7	23.87	24.09	2019.6	22.36	29.97	2142.9	23.86±1.49	27.87
120	2060.4	26.80	27.33	2224.8	26.61	22.55	1978.9	23.93	29.22	2088.0	25.78±1.61	26.37

ตารางที่ ก -3 (2) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.0 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.4-25.1 °C ความชื้น 58.9-56.1 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2814.8	0.00	0.00	2559.1	0.00	0.00	3295.4	0.00	0.00	2889.8	0.00	0.00
15	2601.4	7.58	61.86	2349.3	8.20	60.81	2901.0	11.97	114.32	2617.2	9.25± 2.37	79.00
30	2474.8	12.08	49.28	2101.3	17.89	66.34	2857.9	13.28	63.42	2478.0	14.41±3.07	59.68
45	2349.3	16.54	44.98	2060.4	19.49	48.18	2814.8	14.59	46.44	2408.2	16.87±2.47	46.53
60	2266.2	19.49	39.76	2019.6	21.08	39.09	2729.1	17.19	41.04	2338.3	19.25±1.96	39.96
75	2183.5	22.43	36.60	2101.3	17.89	26.53	2516.9	23.63	45.14	2267.2	21.31±3.03	36.09
90	2101.3	25.35	34.47	1978.9	22.67	28.03	2474.8	24.90	39.65	2185.0	24.31±1.43	34.05
105	2060.4	26.80	31.24	1938.3	24.26	25.70	2349.3	28.71	39.18	2116.0	26.59±2.23	32.04
120	2019.6	28.25	28.81	1777.0	30.56	28.33	2307.7	29.97	35.79	2034.8	29.60±1.20	30.98

ตารางที่ ก -3 (3) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.7μW/cm^2) อุณหภูมิ 25.5-24.1 °C ความชื้น 58.5-57.3 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	3162.8	0.00	0.00	2814.8	0.00	0.00	2559.1	0.00	0.00	2845.6	0.00	0.00
15	2987.8	5.53	50.73	2516.9	10.58	86.36	2183.5	14.67	108.85	2562.7	10.26± 4.58	81.98
30	2944.3	6.91	31.66	2391.0	15.06	61.42	2142.4	16.28	60.39	2492.6	12.75±5.10	51.16
45	2729.1	13.71	41.91	2307.7	18.02	49.00	2060.4	19.49	48.18	2365.7	17.07±3.00	46.36
60	2686.4	15.06	34.52	2183.5	22.43	45.74	1978.9	22.67	42.04	2282.9	20.05±4.32	40.77
75	2601.4	17.75	32.55	2101.3	25.35	41.36	2101.3	17.89	26.53	2268.0	20.33±4.35	33.48
90	2474.8	21.75	33.24	1978.9	29.70	40.38	1978.9	22.67	28.03	2144.2	24.71±4.35	33.88
105	2266.2	28.35	37.13	1978.9	29.70	34.61	1897.8	25.84	27.38	2047.6	27.96±1.96	33.04
120	2183.5	30.96	35.48	1938.3	31.14	31.76	1697.0	33.69	31.23	1939.6	31.93±1.52	32.82

ตารางที่ ก -4 (1) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.2- 24.5 °C ความชื้น 61.1-59.5 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2643.8	0.00	0.00	3075.0	0.00	0.00	2857.9	0.00	0.00	2858.9	0.00	0.00
15	2391.0	9.56	73.28	2601.4	15.40	137.29	2516.9	11.93	98.84	2503.1	12.30± 2.94	103.14
30	2349.3	11.14	42.69	2516.9	18.15	80.89	2391.0	16.34	67.66	2419.0	15.21±3.64	63.75
45	2266.2	14.28	36.49	2516.9	18.15	53.93	2307.7	19.25	53.16	2363.6	17.23±2.61	47.86
60	2101.3	20.52	39.31	2391.0	22.25	49.57	2224.8	22.15	45.87	2239.0	21.64±0.97	44.92
75	2060.4	22.07	33.82	2266.2	26.30	46.89	2101.3	26.47	43.86	2142.6	24.95±2.50	41.52
90	1897.8	28.22	36.04	2101.3	31.66	47.04	2019.6	29.33	40.50	2006.2	29.74±1.76	41.19
105	1737.0	34.30	37.55	1978.9	35.65	45.39	1857.4	35.01	41.42	1857.8	34.98±0.67	41.45
120	1657.2	37.32	35.75	1897.8	38.28	42.65	1777.0	37.82	39.16	1777.3	37.81±0.48	39.19

ตารางที่ ก -4 (2) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 220 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 25.3-24.4 °C ความชื้น 57.1 -55.2 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2771.9	0.00	0.00	3564.4	0.00	0.00	3295.4	0.00	0.00	3210.6	0.00	0.00
15	2516.9	9.20	73.91	3295.4	7.55	77.96	2814.8	14.59	139.32	2875.7	10.44± 3.68	97.06
30	2349.3	15.25	61.25	3206.9	10.03	51.81	2771.9	15.89	75.88	2776.0	13.72±3.21	62.98
45	2183.5	21.23	56.85	2857.9	19.82	68.26	2643.8	19.77	62.96	2561.7	20.27±0.82	62.69
60	2019.6	27.14	54.51	2686.4	24.63	63.62	2391.0	27.45	65.54	2365.7	26.41±1.54	61.23
75	1897.8	31.53	50.67	2559.1	28.20	58.28	2266.2	31.23	59.67	2241.0	30.32±1.84	56.21
90	1817.2	34.44	46.12	2516.9	29.39	50.61	2224.8	32.49	51.72	2186.3	32.11±2.55	49.48
105	1737.0	37.34	42.85	2224.8	37.58	55.47	2101.3	36.24	49.45	2021.0	37.05±0.72	49.26
120	1657.2	40.21	40.39	2142.4	39.90	51.52	1897.8	42.41	50.64	1899.1	40.84±1.37	47.52

ตารางที่ ก -4 (3) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.2-24.7 °C ความชื้น 62.3-59.6 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2516.9	0.00	0.00	3519.2	0.00	0.00	2987.8	0.00	0.00	3008.0	0.00	0.00
15	2307.7	8.31	60.64	3031.3	13.86	141.42	2686.4	10.09	87.36	2675.1	10.75± 2.84	96.47
30	2307.7	8.31	30.32	2814.8	20.02	102.09	2474.8	17.17	74.35	2532.4	15.17±6.10	68.92
45	2142.4	14.88	36.18	2559.1	27.28	92.77	2266.2	24.15	69.72	2322.5	22.10±6.45	66.22
60	1978.9	21.37	38.98	2307.7	34.43	87.80	2142.4	28.30	61.26	2143.0	28.03±6.53	62.68
75	1817.2	27.80	40.56	2224.8	36.78	75.04	2019.6	32.40	56.13	2020.5	32.33±4.49	57.24
90	1657.2	34.16	41.53	2060.4	41.45	70.47	1857.4	37.83	54.61	1858.3	37.81±3.65	55.54
105	1498.9	40.45	42.15	1938.3	44.92	65.46	1737.0	41.86	51.79	1724.7	42.41±2.29	53.14
120	1420.3	43.57	39.73	1817.2	48.36	61.67	1617.4	45.86	49.65	1618.3	45.93±2.40	50.35

ตารางที่ ก-5 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.6-25.2 °C ความชื้น 59.4-56.8 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)
0	2901.0	0.00	3474.2	0.00	2559.1	0.00	2978.1	0.00
15	2771.9	4.45	3206.9	7.69	2474.8	3.29	2817.8	5.15±2.28
30	2686.4	7.40	3118.8	10.23	2266.2	11.45	2690.5	9.69±2.08
45	2601.4	10.33	3031.3	12.75	2224.8	13.06	2619.2	12.05±1.50
60	2516.9	13.24	3031.3	12.75	2142.4	16.28	2563.5	14.09±1.91
75	2559.1	11.79	2987.8	14.00	2266.2	11.45	2604.3	12.41±1.39
90	2474.8	14.69	2901.0	16.50	2101.3	17.89	2492.4	16.36±1.60
105	2391.0	17.58	2814.8	18.98	2019.6	21.08	2408.5	19.21±1.76
120	2307.7	20.45	2771.9	20.22	1938.3	24.26	2339.3	21.64±2.27

ตารางที่ ก-6 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดไฟแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 27.0-25.9 °C ความชื้น 62.4-57.3 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)
0	3162.8	0.00	2814.8	0.00	3339.9	0.00	3105.8	0.00
15	2987.8	5.53	2559.1	9.09	3206.9	3.98	2917.9	6.20± 2.62
30	2814.8	11.00	2516.9	10.58	3031.3	9.24	2787.7	10.28±0.92
45	2771.9	12.36	2432.8	13.57	2944.3	11.84	2716.3	12.59±0.89
60	2771.9	12.36	2266.2	19.49	2771.9	17.01	2603.3	16.29±3.62
75	2643.8	16.41	2183.5	22.43	2686.4	19.57	2504.6	19.47±3.01
90	2474.8	21.75	1978.9	29.70	2432.8	27.16	2295.5	26.20±4.06
105	2307.7	27.04	1897.8	32.58	2266.2	32.15	2157.2	30.59±3.08
120	2019.6	36.15	1817.2	35.44	2224.8	33.39	2020.5	34.99±1.43

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองประสิทธิภาพในการกำจัด
เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

ตารางที่ ข -1 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองควบคุม (Baseline) อุณหภูมิ 26.6-25.3 °C ความชื้น 61.7-59.7 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)
0	2729.1	0.00	3031.3	0.00	3474.2	0.00	3078.2	0.00
15	2474.8	9.32	2771.9	8.56	3118.8	10.23	2788.5	9.37 ± 0.84
30	2307.7	15.44	2601.4	14.18	3031.3	12.75	2646.8	14.12±1.35
45	2224.8	18.48	2474.8	18.36	3031.3	12.75	2577.0	16.52±3.28
60	2142.4	21.50	2391.0	21.12	2857.9	17.74	2463.7	20.12±2.07
75	2142.4	21.50	2391.0	21.12	2686.4	22.68	2406.6	21.77±0.81
90	1978.9	27.49	2307.7	23.87	2643.8	23.90	2310.1	25.09±2.08
105	2019.6	26.00	2266.2	25.24	2559.1	26.34	2281.6	25.86±0.56
120	1978.9	27.49	2224.8	26.61	2432.8	29.97	2212.2	28.02±1.75

ตารางที่ ข -2 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ Staphylococcus epidermidis ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 μW/cm2) อุณหภูมิ 26.2-25.4 °C ความชื้น 63.3-60.9 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	3162.8	0.00	0.00	3075.0	0.00	0.00	2771.9	0.00	0.00	3003.2	0.00	0.00
15	2391.0	12.36	113.31	2432.8	5.66	50.43	2183.5	9.20	73.91	2335.8	9.07 ± 3.35	79.22
30	2391.0	17.75	81.37	2349.3	14.02	62.49	2142.4	18.24	73.29	2294.2	16.67±2.31	72.38
45	2307.7	27.04	82.62	2391.0	22.25	66.09	2060.4	25.67	68.74	2253.0	24.98±2.47	72.48
60	2266.2	28.35	64.97	2307.7	24.96	55.61	2060.4	25.67	51.55	2211.4	26.32±1.79	57.38
75	2307.7	27.04	49.57	2224.8	27.65	49.29	2019.6	27.14	43.61	2184.0	27.28±0.33	47.49
90	2183.5	30.96	47.31	2183.5	28.99	43.07	1938.3	30.07	40.27	2101.8	30.01±0.99	43.55
105	2101.3	33.56	43.95	2101.3	31.66	40.32	1857.4	32.99	37.86	2020.0	32.74±0.97	40.71
120	2060.4	34.85	39.94	2019.6	34.32	38.24	1857.4	32.99	33.13	1979.1	34.06±0.96	37.10

ตารางที่ ข -3 (1) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสง ยูวี 1.0 μW/cm^2) อุณหภูมิ 26.5-25.9 °C ความชื้น 59.0-57.8 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2814.8	0.00	0.00	2559.1	0.00	0.00	2901.0	0.00	0.00	2758.3	0.00	0.00
15	2391.0	15.06	122.84	2307.7	9.82	72.87	2601.4	10.33	86.86	2433.3	11.74± 2.89	94.19
30	2349.3	16.54	67.47	2183.5	14.67	54.43	2432.8	16.14	67.86	2321.9	15.78±0.98	63.25
45	1897.8	32.58	88.60	1657.2	35.24	87.14	2060.4	28.98	81.22	1871.8	32.27±3.14	85.65
60	1857.4	34.01	69.37	1617.4	36.80	68.23	1857.4	35.97	75.62	1777.4	35.59±1.43	71.08
75	1420.3	49.54	80.84	1459.5	42.97	63.74	1737.0	40.13	67.48	1538.9	44.21±4.83	70.69
90	1381.2	50.93	69.26	1381.2	46.03	56.90	1577.8	45.61	63.92	1446.7	47.52±2.96	63.36
105	1303.3	53.70	62.59	1264.5	50.59	53.61	1459.5	49.69	59.69	1342.4	51.33±2.10	58.63
120	1264.5	55.08	56.17	1110.2	56.62	52.50	1381.2	52.39	55.07	1251.9	54.70±2.14	54.58

ตารางที่ ข-3 (2) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.0 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.1-25.5 °C ความชื้น 61.4-58.7 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2857.9	0.00	0.00	3251.1	0.00	0.00	2643.8	0.00	0.00	2917.6	0.00	0.00
15	2516.9	11.93	98.84	2901.0	10.77	101.47	2391.0	9.56	73.28	2603.0	10.75± 1.18	91.20
30	2266.2	20.70	85.75	2686.4	17.37	81.84	2101.3	20.52	78.62	2351.3	19.53±1.87	82.07
45	1978.9	30.76	84.92	2183.5	32.84	103.15	1817.2	31.27	79.87	1993.2	31.62±1.08	89.31
60	1697.0	40.62	84.12	2101.3	35.37	83.32	1857.4	29.74	56.98	1885.3	35.24±5.44	74.81
75	1617.4	43.40	71.91	1697.0	47.80	90.09	1342.2	49.23	75.46	1552.2	46.81±3.04	79.15
90	1538.3	46.17	63.75	1577.8	51.47	80.83	1342.2	49.23	62.88	1486.1	48.96±2.66	69.15
105	1264.5	55.76	65.98	1381.2	57.52	77.43	1148.6	56.56	61.91	1264.7	56.61±0.88	68.44
120	1071.8	62.50	64.71	1303.3	59.91	70.57	1033.6	60.91	58.34	1136.2	61.10±1.30	64.54

ตารางที่ ข-3 (3) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 25.7-24.2 °C ความชื้น 63.1-58.2 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	2901.0	0.00	0.00	3429.3	0.00	0.00	2857.9	0.00	0.00	3062.7	0.00	0.00
15	2559.1	11.79	99.12	2944.3	14.14	140.57	2516.9	11.93	98.84	2673.4	12.62± 1.32	112.84
30	2432.8	16.14	67.86	2686.4	21.66	107.67	2224.8	22.15	91.75	2448.0	19.99±3.34	89.09
45	2183.5	24.73	69.32	2101.3	38.72	128.31	1777.0	37.82	104.43	2020.6	33.76±7.83	100.69
60	1817.2	37.36	78.54	1577.8	53.99	134.17	1381.2	51.67	107.00	1592.1	47.67±9.01	106.57
75	1498.9	48.33	81.29	1657.2	51.68	102.73	1303.3	54.40	90.12	1486.4	51.47±3.04	91.38
90	1225.7	57.75	80.93	1381.2	59.72	98.94	1187.1	58.46	80.71	1264.7	58.64±1.00	86.86
105	1110.2	61.73	74.16	1264.5	63.13	89.64	1071.8	62.50	73.96	1148.8	62.45±0.70	79.25
120	1071.8	63.05	66.28	1187.1	65.38	81.24	1033.6	63.83	66.10	1097.5	64.09±1.19	71.20

ตารางที่ ข-4 (1) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 25.8-25.1 °C ความชื้น 60.3-58.1 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	3075.0	0.00	0.00	2516.9	0.00	0.00	2729.1	0.00	0.00	2773.6	0.00	0.00
15	2060.4	33.00	294.09	1777.0	29.40	214.45	2101.3	23.00	181.95	1979.6	28.46± 5.06	230.16
30	1420.3	53.81	239.81	1264.5	49.76	181.51	1498.9	45.08	178.29	1394.5	49.55±4.37	199.87
45	1148.6	62.65	186.13	1033.6	58.93	143.31	1459.5	46.52	122.66	1213.9	56.03±8.45	150.70
60	995.5	67.63	150.69	881.6	64.97	118.50	1303.3	52.24	103.32	1060.1	61.61±8.22	124.17
75	957.4	68.86	122.76	843.9	66.47	96.99	1110.2	59.32	93.85	970.5	64.89±4.97	104.53
90	843.9	72.56	107.79	806.2	67.97	82.64	995.5	63.52	83.75	881.8	68.02±4.52	91.39
105	806.2	73.78	93.95	693.7	72.44	75.49	843.9	69.08	78.06	781.3	71.77±2.42	82.50
120	768.6	75.00	83.57	656.4	73.92	67.41	656.4	75.95	75.10	693.8	74.96±1.01	75.36

ตารางที่ ข-4 (2) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 220 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.0-24.7 °C ความชื้น 62.5-59.2 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	3429.3	0.00	0.00	2987.8	0.00	0.00	2729.1	0.00	0.00	2801.1	0.00	0.00
15	2391.0	30.28	300.96	2391.0	19.97	172.98	1938.3	28.98	229.21	1995.1	26.41± 5.61	234.38
30	2266.2	33.92	168.57	1420.3	52.46	227.17	1342.2	50.82	201.00	1513.2	45.73±10.27	198.91
45	1303.3	62.00	205.41	1187.1	60.27	173.98	1110.2	59.32	156.42	1110.3	60.53±1.36	178.60
60	1303.3	62.00	154.06	1071.8	64.13	138.84	881.6	67.70	133.87	983.0	64.61±2.88	142.26
75	995.5	70.97	141.09	957.4	67.96	117.70	843.9	69.08	109.29	856.6	69.34±1.52	122.69
90	957.4	72.08	119.41	881.6	70.49	101.75	768.6	71.84	94.71	793.8	71.47±0.86	105.29
105	881.6	74.29	105.49	768.6	74.27	91.89	693.7	74.58	84.28	718.7	74.38±0.17	93.89
120	806.2	76.49	95.04	656.4	78.03	84.47	619.2	77.31	76.44	631.6	77.28±0.77	85.32

ตารางที่ ข-4 (3) ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 25.3-24.6 °C ความชื้น 59.4-57.3 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Eff (%)	Rate (CFU/m^5-min)
0	3031.3	0.00	0.00	2729.1	0.00	0.00	3251.1	0.00	0.00	3003.8	0.00	0.00
15	1978.9	34.72	305.06	1697.0	37.82	299.14	2349.3	27.74	261.40	2008.4	33.42± 5.16	288.53
30	1498.9	50.55	222.10	1187.1	56.50	223.47	1498.9	53.90	253.95	1394.9	53.65±2.98	233.17
45	1342.2	55.72	163.20	1148.6	57.91	152.70	1342.2	58.72	184.44	1277.7	57.45±1.55	166.78
60	1264.5	58.29	128.04	1033.6	62.13	122.86	1264.5	61.11	143.96	1187.5	60.51±1.99	131.62
75	1110.2	63.38	111.37	957.4	64.92	102.70	995.5	69.38	130.76	1021.0	65.89±3.12	114.95
90	881.6	70.92	103.85	768.6	71.84	94.71	843.9	74.04	116.29	831.4	72.27±1.61	104.95
105	731.1	75.88	95.25	545.1	80.03	90.43	731.1	77.51	104.35	669.1	77.81±2.09	96.68
120	619.2	79.57	87.40	434.5	84.08	83.14	582.1	82.10	96.70	545.3	81.92±2.26	89.08

ตารางที่ ข-5 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 26.1-25.7 °C ความชื้น 61.7-58.0 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)
0	2857.9	0.00	2601.4	0.00	3384.5	0.00	2947.9	0.00
15	2391.0	16.34	2142.4	17.64	2944.3	13.01	2492.6	15.66± 2.39
30	2224.8	22.15	1938.3	25.49	2686.4	20.63	2283.2	22.76±2.49
45	2060.4	27.90	1857.4	28.60	2559.1	24.39	2159.0	26.96±2.26
60	1897.8	33.59	1657.2	36.30	2307.7	31.82	1954.2	33.90±2.25
75	1777.0	37.82	1577.8	39.35	2183.5	35.49	1846.1	37.55±1.94
90	1617.4	43.40	1420.3	45.40	1938.3	42.73	1658.7	43.85±1.39
105	1498.9	47.55	1381.2	46.90	1737.0	48.68	1539.0	47.71±0.90
120	1381.2	51.67	1342.2	48.40	1538.3	54.55	1420.6	51.54±3.07

ตารางที่ ข-6 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดไฟแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี270 $\mu W/cm^2$) อุณหภูมิ 25.3-24.2 °C ความชื้น 57.8-56.3 %RH

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)	Bacteria Conc (CFU/m^3)	Efficiency (%)
0	2901.0	0.00	3474.2	0.00	2474.8	0.00	2950.0	0.00
15	2101.3	27.57	2391.0	31.18	1737.0	29.81	2076.4	29.52± 1.82
30	1777.0	38.75	1938.3	44.21	1498.9	39.43	1738.1	40.80±2.98
45	1577.8	45.61	1817.2	47.70	1381.2	44.19	1592.1	45.83±1.76
60	1459.5	49.69	1657.2	52.30	1264.5	48.91	1460.4	50.30±1.78
75	1303.3	55.08	1538.3	55.72	1264.5	48.91	1368.7	53.23±3.76
90	1381.2	52.39	1420.3	59.12	1110.2	55.14	1303.9	55.55±3.38
105	1187.1	59.08	1303.3	62.49	1110.2	55.14	1200.2	58.90±3.68
120	1110.2	61.73	1225.7	64.72	995.5	59.78	1110.5	62.08±2.49

ภาคผนวก ค
ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดของการกำจัด
เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*

ตาราง ค -1 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองควบคุม (Baseline)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.03	0.04	0.03	0.03
30	0.07	0.06	0.05	0.06
45	0.07	0.08	0.04	0.06
60	0.10	0.07	0.05	0.07
75	0.09	0.10	0.05	0.08
90	0.09	0.11	0.09	0.10
105	0.10	0.13	0.11	0.11
120	0.12	0.13	0.12	0.12

ตาราง ค -2 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.05	0.03	0.01	0.03
30	0.07	0.06	0.04	0.05
45	0.05	0.07	0.05	0.06
60	0.08	0.09	0.08	0.08
75	0.10	0.10	0.11	0.10
90	0.12	0.12	0.12	0.12
105	0.13	0.13	0.14	0.14
120	0.15	0.17	0.15	0.16

ตาราง ค -3 (1) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 1.0 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.08	0.12	0.10	0.10
30	0.10	0.15	0.12	0.12
45	0.11	0.15	0.14	0.13
60	0.15	0.17	0.18	0.16
75	0.20	0.24	0.16	0.20
90	0.25	0.25	0.21	0.24
105	0.29	0.27	0.25	0.27
120	0.31	0.31	0.27	0.30

ตาราง ค -3 (2) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.0 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.08	0.09	0.13	0.10
30	0.13	0.20	0.14	0.15
45	0.18	0.22	0.16	0.18
60	0.22	0.24	0.19	0.21
75	0.25	0.20	0.27	0.24
90	0.29	0.26	0.29	0.28
105	0.31	0.28	0.34	0.31
120	0.33	0.36	0.36	0.35

ตาราง ค -3 (3) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.06	0.11	0.16	0.10
30	0.07	0.16	0.18	0.13
45	0.15	0.20	0.22	0.18
60	0.16	0.25	0.26	0.22
75	0.20	0.29	0.20	0.23
90	0.25	0.35	0.26	0.28
105	0.33	0.35	0.30	0.33
120	0.37	0.37	0.41	0.38

ตาราง ค -4 (1) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.10	0.17	0.13	0.13
30	0.12	0.20	0.18	0.17
45	0.15	0.20	0.21	0.19
60	0.23	0.25	0.25	0.24
75	0.25	0.31	0.31	0.29
90	0.33	0.38	0.35	0.35
105	0.42	0.44	0.43	0.43
120	0.47	0.48	0.48	0.48

ตาราง ค -4 (2) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 220 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.10	0.08	0.16	0.11
30	0.17	0.11	0.17	0.15
45	0.24	0.22	0.22	0.23
60	0.32	0.28	0.32	0.31
75	0.38	0.33	0.37	0.36
90	0.42	0.35	0.39	0.38
105	0.47	0.47	0.45	0.46
120	0.51	0.51	0.55	0.53

ตาราง ค -4 (3) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.09	0.15	0.11	0.12
30	0.09	0.22	0.19	0.17
45	0.16	0.32	0.28	0.26
60	0.24	0.42	0.33	0.34
75	0.33	0.46	0.39	0.40
90	0.42	0.54	0.48	0.48
105	0.52	0.60	0.54	0.56
120	0.57	0.66	0.61	0.62

ตาราง ค -5 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.05	0.08	0.03	0.06
30	0.08	0.11	0.12	0.10
45	0.11	0.14	0.14	0.13
60	0.14	0.14	0.18	0.15
75	0.13	0.15	0.12	0.13
90	0.16	0.18	0.20	0.18
105	0.19	0.21	0.24	0.21
120	0.23	0.23	0.28	0.24

ตาราง ค -6 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ชุดทดลองที่ใช้หลอดแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.06	0.10	0.04	0.06
30	0.12	0.11	0.10	0.11
45	0.13	0.15	0.13	0.13
60	0.13	0.22	0.19	0.18
75	0.18	0.25	0.22	0.22
90	0.25	0.35	0.32	0.30
105	0.32	0.39	0.39	0.36
120	0.45	0.44	0.41	0.43

ภาคผนวก ง
ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดของ
เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

ตาราง ง -1 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองควบคุม (Baseline)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.10	0.09	0.11	0.10
30	0.17	0.15	0.14	0.15
45	0.20	0.20	0.14	0.18
60	0.24	0.24	0.20	0.22
75	0.24	0.24	0.26	0.25
90	0.32	0.27	0.27	0.29
105	0.30	0.29	0.31	0.30
120	0.32	0.31	0.36	0.33

ตาราง ง -2 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่มีแผ่นฟอกอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 0 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.28	0.23	0.10	0.25
30	0.28	0.27	0.20	0.27
45	0.32	0.25	0.30	0.29
60	0.33	0.29	0.30	0.31
75	0.32	0.32	0.32	0.32
90	0.37	0.34	0.36	0.36
105	0.41	0.38	0.40	0.40
120	0.43	0.42	0.40	0.42

ตาราง ง -3 (1) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 1.0 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.16	0.10	0.11	0.13
30	0.18	0.16	0.18	0.17
45	0.39	0.43	0.34	0.39
60	0.42	0.46	0.45	0.44
75	0.68	0.56	0.51	0.58
90	0.71	0.62	0.61	0.65
105	0.77	0.71	0.69	0.72
120	0.80	0.84	0.74	0.79

ตาราง ง –3 (2) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.0 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.13	0.11	0.10	0.11
30	0.23	0.19	0.23	0.22
45	0.37	0.40	0.37	0.38
60	0.52	0.44	0.35	0.44
75	0.57	0.65	0.68	0.63
90	0.62	0.72	0.68	0.67
105	0.82	0.86	0.83	0.84
120	0.98	0.91	0.94	0.94

ตาราง ง –3 (3) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.13	0.15	0.13	0.14
30	0.18	0.24	0.25	0.22
45	0.28	0.49	0.48	0.42
60	0.47	0.78	0.73	0.65
75	0.66	0.73	0.79	0.72
90	0.86	0.91	0.88	0.88
105	0.96	1.00	0.98	0.98
120	1.00	1.06	1.02	1.03

ตาราง ง –4 (1) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 70 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.40	0.35	0.26	0.34
30	0.77	0.69	0.60	0.69
45	0.98	0.89	0.63	0.83
60	1.13	1.05	0.74	0.96
75	1.17	1.09	0.90	1.05
90	1.29	1.14	1.01	1.15
105	1.34	1.29	1.17	1.27
120	1.39	1.34	1.42	1.39

ตาราง ง –4 (2) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 220 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.36	0.22	0.34	0.34
30	0.41	0.74	0.71	0.62
45	0.97	0.92	0.90	0.93
60	0.97	1.03	1.13	1.05
75	1.24	1.14	1.17	1.18
90	1.28	1.22	1.27	1.26
105	1.36	1.36	1.37	1.36
120	1.45	1.52	1.48	1.49

ตาราง ง –4 (3) ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ชุดทดลองที่ใช้แผ่นฟอกอากาศร่วมกับหลอดแบล็คไลท์ (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.43	0.48	0.32	0.40
30	0.70	0.83	0.77	0.77
45	0.81	0.87	0.88	0.85
60	0.87	0.97	0.94	0.93
75	1.00	1.05	1.18	1.08
90	1.24	1.27	1.35	1.28
105	1.42	1.61	1.49	1.50
120	1.59	1.84	1.72	1.71

ตาราง ง -5 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ทดลองที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 3.7 $\mu W/cm^2$)

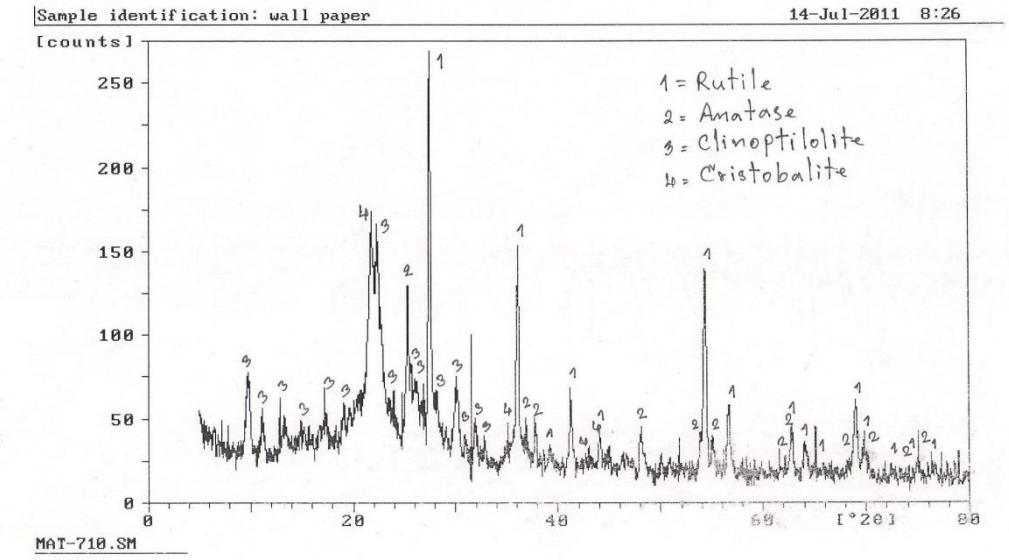
เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.18	0.19	0.14	0.17
30	0.25	0.29	0.23	0.26
45	0.33	0.34	0.28	0.31
60	0.41	0.45	0.38	0.41
75	0.48	0.50	0.44	0.47
90	0.57	0.61	0.56	0.58
105	0.65	0.63	0.67	0.65
120	0.73	0.66	0.79	0.73

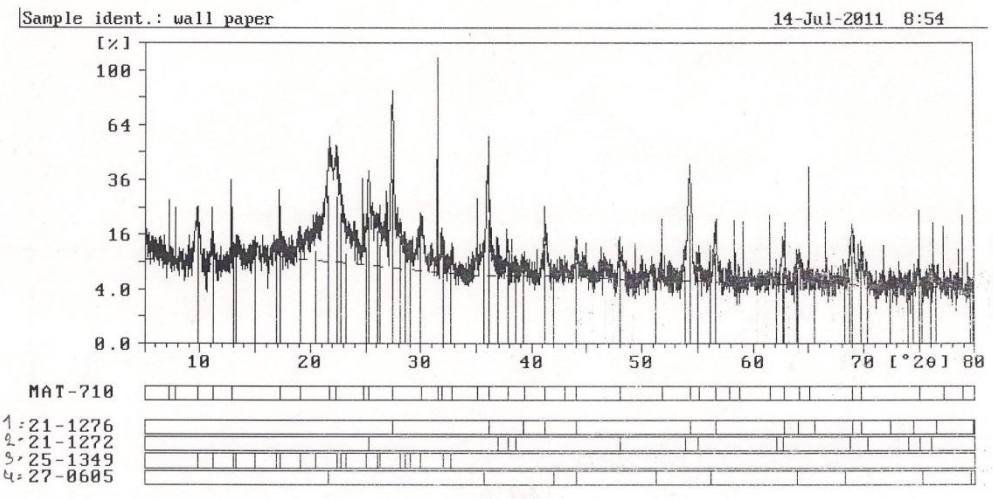
ตาราง ง -6 ผลค่าคงที่อัตราการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ทดลองที่ใช้หลอดแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มแสงยูวี 270 $\mu W/cm^2$)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.32	0.37	0.35	0.35
30	0.49	0.58	0.50	0.53
45	0.61	0.65	0.58	0.62
60	0.69	0.74	0.67	0.70
75	0.80	0.81	0.67	0.77
90	0.74	0.89	0.80	0.82
105	0.89	0.98	0.80	0.90
120	0.96	1.04	0.91	0.98

ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ
แผ่นฟอกอากาศซิเซน แอร์คลีน

1. ผลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)





File: MAT-710.DI 14-Jul-

Philips Analytical PC-APD, Diffraction Software

Sample identification	wall paper
Data measured at	8-Jul-2011 12:17:00
Diffractometer type	PW3710 BASED
Tube anode	Cu
Generator tension [kV]	40
Generator current [mA]	30
Wavelength Alpha1 [Å]	1.54060
Wavelength Alpha2 [Å]	1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1)	0.500
Divergence slit	1°
Receiving slit	0.1
Monochromator used	YES
Start angle [°2θ]	5.010
End angle [°2θ]	79.990
Step size [°2θ]	0.020
Maximum intensity	334.8900
Time per step [s]	1.000
Type of scan	CONTINUOUS
Peak positions defined by	Top of smoothed peak
Minimum peak tip width	0.00
Maximum peak tip width	1.00
Peak base width	2.00
Minimum significance	0.75
Number of peaks	39

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
7.225	12.2254	12.2555	0.060	55	32	16.4	1.15
7.805	11.3182	11.3460	0.080	50	30	15.1	1.10
9.785	9.0319	9.0541	0.280	44	29	13.0	1.75
11.170	7.9149	7.9344	0.320	21	28	6.3	1.21
12.875	6.8704	6.8873	0.060	85	30	25.3	2.88
17.270	5.1306	5.1432	0.240	23	34	6.9	1.57
19.075	4.6490	4.6604	0.240	22	32	6.6	0.80
21.775	4.0782	4.0883	0.200	132	30	39.5	1.02
22.330	3.9781	3.9879	0.200	128	30	38.1	1.05
24.785	3.5893	3.5982	0.060	27	28	8.1	1.68
25.320	3.5147	3.5233	0.140	100	28	29.9	2.13
27.460	3.2455	3.2534	0.180	240	26	71.7	5.95
30.080	2.9685	2.9758	0.400	42	24	12.6	2.67
31.530	2.8352	2.8422	0.040	335	23	100.0	14.83
31.910	2.8023	2.8092	0.240	22	23	6.6	1.31
32.850	2.7242	2.7309	0.240	16	22	4.8	1.23
35.155	2.5507	2.5570	0.060	67	21	20.1	1.13
36.130	2.4841	2.4902	0.060	125	21	37.5	1.66
37.830	2.3763	2.3821	0.200	21	21	6.3	1.20
39.315	2.2899	2.2955	0.480	9	21	2.7	1.03
41.230	2.1878	2.1932	0.240	42	21	12.6	2.86
42.990	2.1022	2.1074	0.100	12	20	3.7	0.86

File: MAT-710.DI 14-Jul-2011 8:26

Philips Analytical PC-APD, Diffraction Software

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
44.070	2.0532	2.0582	0.240	22	20	6.6	1.50
48.035	1.8926	1.8972	0.280	22	18	6.6	1.87
51.820	1.7629	1.7672	0.060	24	18	7.2	2.03
54.325	1.6873	1.6915	0.120	119	18	35.5	1.42
55.075	1.6661	1.6702	0.320	17	18	5.0	1.47
56.660	1.6232	1.6272	0.240	38	17	11.5	2.33
57.905	1.5913	1.5952	0.480	3	17	0.9	0.79
58.750	1.5704	1.5742	0.060	8	16	2.3	0.82
61.580	1.5048	1.5085	0.060	14	16	4.3	1.13
62.790	1.4787	1.4823	0.240	21	16	6.3	1.40
64.115	1.4513	1.4549	0.400	16	17	4.8	1.80
65.095	1.4318	1.4353	0.060	22	18	6.6	2.94
68.995	1.3601	1.3634	0.160	42	16	12.6	1.08
69.820	1.3460	1.3493	0.320	20	15	6.0	0.96
75.055	1.2646	1.2677	0.040	66	15	19.6	1.91
77.235	1.2342	1.2373	0.080	3	14	1.0	1.29
78.935	1.2118	1.2148	0.060	55	14	16.4	2.20

Reference pattern: 21-1276 14-Jul-2011 09:03

Name : Titanium Oxide
Name : Rutile, syn
Name : titania
Formula : TiO2
Elements : O, Ti
Groups : --
Crystal type : Tetragonal
Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns, Forensics, Educational patterns
Pattern deleted: NO

d value	Angle	Rel.Int.
3.2470	27.447	100
2.4870	36.086	50
2.2970	39.188	8
2.1880	41.226	25
2.0540	44.052	10
1.6874	54.323	60
1.6237	56.642	20
1.4797	62.742	10
1.4528	64.040	10
1.4243	65.480	2
1.3598	69.010	20
1.3465	69.790	12
1.3041	72.410	2
1.2739	74.411	1
1.2441	76.510	4
1.2006	79.822	2
1.1702	82.335	6
1.1483	84.260	4
1.1143	87.464	2
1.0936	89.557	8
1.0827	90.708	4
1.0425	95.275	6
1.0364	96.017	6
1.0271	97.177	4
1.0167	98.514	1
0.9703	105.099	2
0.9644	106.019	2
0.9438	109.406	2
0.9072	116.227	4
0.9009	117.527	4
0.8892	120.059	8
0.8774	122.788	8
0.8738	123.660	8
0.8437	131.847	6
0.8292	136.549	8
0.8196	140.052	12
0.8120	143.116	2
0.7877	155.870	2

Reference pattern: 25-1349 14-Jul-2011 09:03

Name : Potassium Sodium Calcium Aluminum Silicate Hydrate
Name : Clinoptilolite
Formula : (Na,K,Ca)6(Si,Al)36O72!20H2O
Elements : H, O, Na, Al, Si, K, Ca
Groups : H2O
Crystal type : Monoclinic
Subfiles : Inorganic, Minerals, Common phases, Forensics, Zeolites
Pattern deleted: YES

d value	Angle	Rel.Int.
8.9900	9.831	85
7.9100	11.177	40
6.7600	13.086	15
6.6400	13.324	10
5.9300	14.927	5
5.2300	16.939	15
5.1200	17.306	30
4.6540	19.054	30
4.3460	20.418	10
3.9710	22.370	100
3.9100	22.724	70
3.8350	23.175	10
3.5490	25.071	20
3.4180	26.049	45
3.3830	26.323	25
3.1650	28.172	40
3.1220	28.569	25
3.0740	29.024	20
2.9760	30.002	65
2.7940	32.007	40
2.7330	32.741	25

Reference pattern: 27-0605 14-Jul-2011 09:04

Name : Silicon Oxide
Name : cristobalite
Formula : SiO2
Elements : O, Si
Groups : SiO2
Crystal type : Cubic
Subfiles : Inorganic, Alloys, Forensics
Pattern deleted: NO

d value	Angle	Rel.Int.
4.1100	21.605	100
2.5180	35.627	12
2.1490	42.010	1
2.0560	44.007	4
1.7820	51.223	1
1.6360	56.178	7
1.4550	63.932	5
1.3720	68.311	2
1.2610	75.304	2
1.2030	79.631	3
1.1880	80.842	1
1.1280	86.140	2
1.0880	90.144	1
1.0750	91.542	1
1.0290	96.937	1
0.9988	100.928	1
0.9532	107.825	1
0.9286	112.101	1
0.8915	119.549	1
0.8715	124.228	1
0.8405	132.833	1
0.8235	138.585	1

Reference pattern: 21-1272 14-Jul-2011 09:03

Name : Titanium Oxide
Name : Anatase, syn
Formula : TiO2
Elements : O, Ti
Groups : --
Crystal type : Tetragonal
Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns, Forensics, Educational patterns
Pattern deleted: NO

d value	Angle	Rel.Int.
3.5200	25.281	100
2.4310	36.947	10
2.3780	37.801	20
2.3320	38.576	10
1.8920	48.050	35
1.6999	53.891	20
1.6665	55.062	20
1.4930	62.121	4
1.4808	62.690	14
1.3641	68.762	6
1.3378	70.311	6
1.2795	74.031	2
1.2649	75.032	10
1.2509	76.020	4
1.1894	80.727	2
1.1725	82.139	2
1.1664	82.662	6
1.1608	83.149	4
1.0600	93.221	2
1.0517	94.182	4
1.0436	95.143	4
1.0182	98.319	2
1.0070	99.804	2
0.9967	101.221	2
0.9555	107.448	4
0.9464	108.963	4
0.9246	112.841	2
0.9192	113.861	2
0.9138	114.909	2
0.8966	118.439	4
0.8890	120.104	2
0.8819	121.725	2
0.8793	122.336	2
0.8464	131.036	2
0.8308	135.998	2
0.8268	137.391	4
0.8102	143.888	2
0.7974	150.039	4
0.7928	152.634	2

2. ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นฟอกอากาศ (BET)

THE PETROLEUM AND PETROCHEMICAL COLLEGE
CHULALONGKORN UNIVERSITY
SOI CHULA 12, PHYA THAI ROAD, BANGKOK 10330, THAILAND
THE RESEARCH AFFAIRS

PPCSDWI-06-203/001.4

ANALYTICAL / TEST REPORT

Report no. 299/54

Sample owner : Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, CU.
Sample types : Air cleaning sheet
Numbers of samples : 1
Instrument used : Surface Area Analyzer (Quantachrome, Autosorb-1)
Date of receiving : July 28, 2011
Date of analysis : August 22, 2011
Result :

Sample name	Multipoint BET (m^2/g)
Air cleaning sheet	6.04

Analyzed by :
(Ms. Jintana Chamnanmanoontham)
Researcher

Approved by :
(Assoc. Prof. Dr. Pramoch Rangsunvigit)
Deputy Dean for Research Affairs

N.B. The result is valid for sample analyzed only.

Date: 08/22/2011 Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Air cleaning sheet				
Description	RN 299/54				
Comments					
Sample Weight	0.7084 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	120.0 °C	Operator	JC
Cross-Sec Area	16.2 Å²/molecule	Outgas Time	23.0 hrs	Analysis Time	49.7 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	2	End of Run	08/22/2011 09
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS182201.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

MULTIPOINT BET

P/Po	Volume [cc/g] STP	1/(W((Po/P)-1))
5.3189e-02	0.7422	6.056E+01
7.8096e-02	0.8686	7.803E+01
1.0386e-01	1.0011	9.262E+01
1.5234e-01	1.2229	1.176E+02
2.0436e-01	1.3932	1.475E+02
2.5533e-01	1.5547	1.765E+02
3.0404e-01	1.7868	1.956E+02

Area = 6.038E+00 m²/g

Slope = 5.418E+02

Y - Intercept = 3.495E+01

Correlation Coefficient = 0.998629

C = 1.650E+01

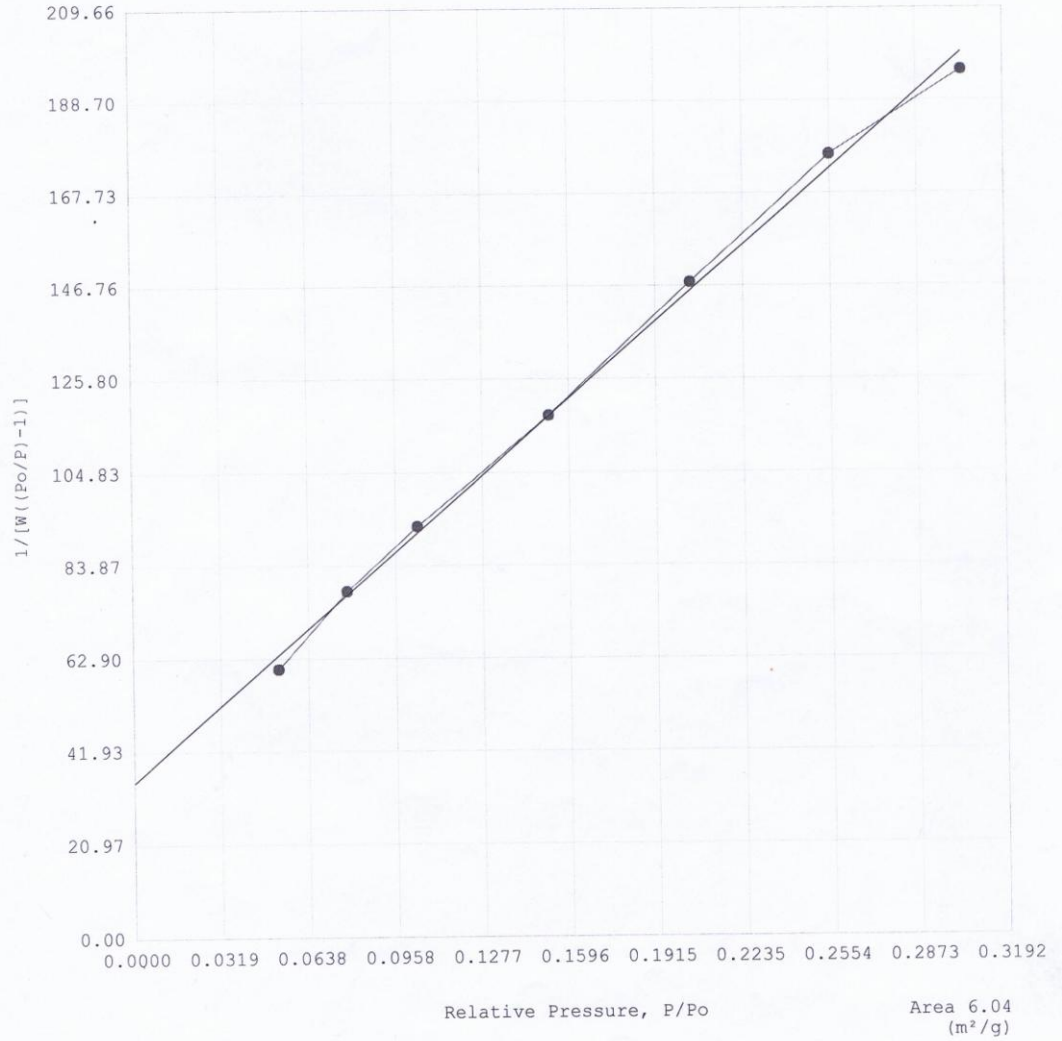
Date: 08/22/2011

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Air cleaning sheet				
Description	RN 299/54				
Comments					
Sample Weight	0.7084 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	120.0 °C	Operator	JC
Cross-Sec Area	16.2 Å²/molecule	Outgas Time	23.0 hrs	Analysis Time	49.7 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	2	End of Run	08/22/2011 09:56
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS182201.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

A ● BF ——

BET Plot



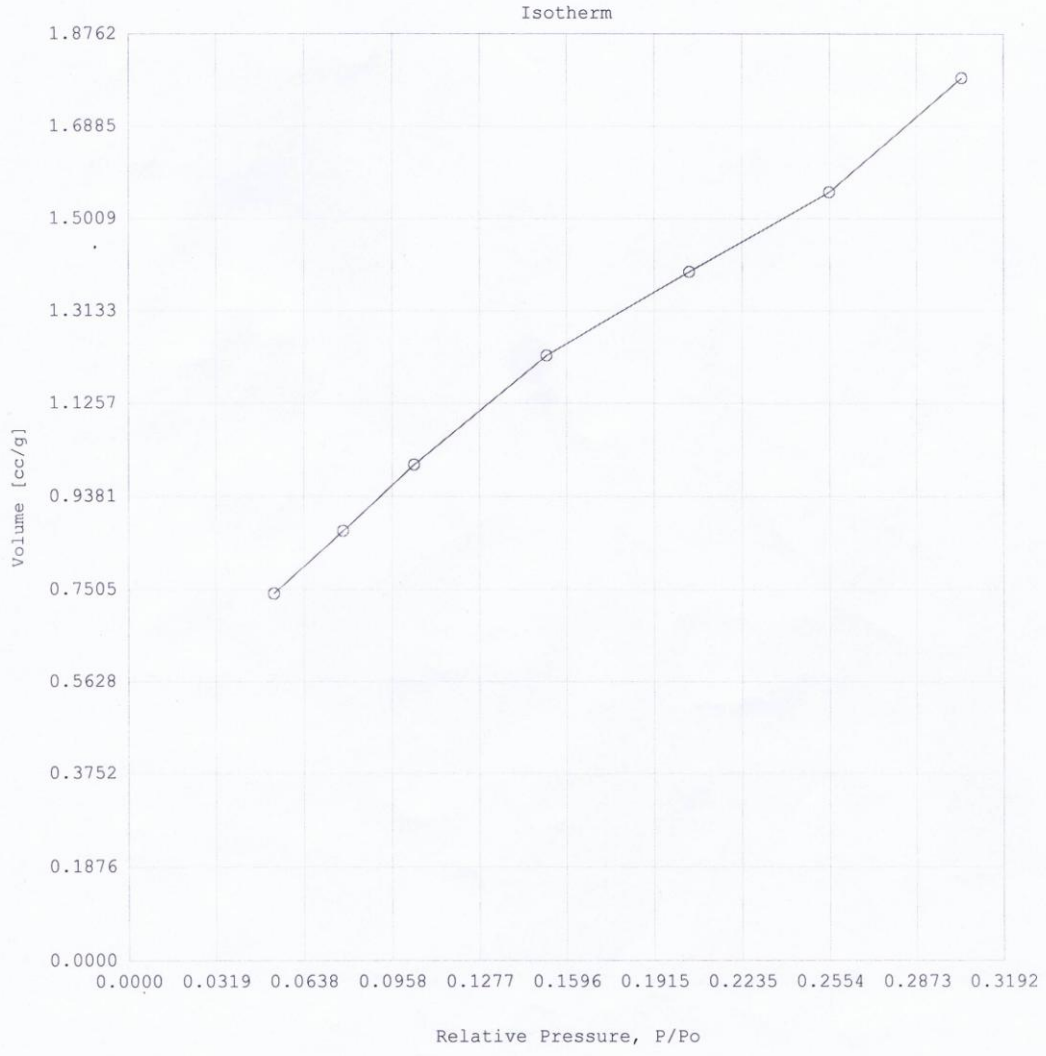
Area 6.04
(m²/g)

Date: 08/22/2011

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Air cleaning sheet				
Description	RN 299/54				
Comments					
Sample Weight	0.7084 g				
Adsorbate	NITROGEN	**Outgas Temp**	120.0 °C	**Operator**	JC
Cross-Sec Area	16.2 Å²/molecule	**Outgas Time**	23.0 hrs	**Analysis Time**	49.7 min
NonIdeality	6.580E-05	**P/Po Toler**	2	**End of Run**	08/22/2011 09:56
Molecular Wt	28.0134 g/mol	**Equil Time**	3	**File Name**	AS182201.RAW
Station #	1	**Bath Temp.**	77.35		

A



ภาคผนวก ฉ
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ฉ-1 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

ANOVA

eff

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1968.573	6	328.095	157.288	0.000
Within Groups	29.203	14	2.086		
Total	1997.776	20			

ตารางที่ ฉ-2 ประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ที่ความเข้มแสงยูวีแตกต่างกัน

ANOVA

eff

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4827.174	6	804.529	366.888	.000
Within Groups	30.700	14	2.193		
Total	4857.873	20			

ตารางที่ ฉ-3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	A	21.6433	3	2.26902	1.31002
	B	31.9300	3	1.52686	.88153

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	A & B	3	.994	.070

Paired Samples Test

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference Lower	Upper			
Pair 1 A - B	-10.28667	.76970	.44438	-12.19870	-8.37463	-23.148	2	.002

* <u>หมายเหตุ</u> A = เปิดไฟเพียงอย่างเดียว และ B = เปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ

ตารางที่ ฉ-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	A	51.5400	3	3.07706	1.77654
	B	64.0867	3	1.18602	.68475

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	A & B	3	-.681	.523

Paired Samples Test

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference Lower	Upper			
Pair 1 A - B	-12.54667	3.98037	2.29807	-22.43445	-2.65888	-5.460	2	.032

* <u>หมายเหตุ</u> A= เปิดไฟเพียงอย่างเดียว และ B= เปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ

ตารางที่ ฉ-5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยใช้หลอดหลอดแบล็คไลท์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	C	34.9933	3	1.43319	.82745
	D	45.9300	3	2.39577	1.38320

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	C & D	3	-.223	.857

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	C - D	-10.93667	3.05382	1.76313	-18.52278	-3.35055	-6.203	2	.025

* <u>หมายเหตุ</u> C= เปิดไฟเพียงอย่างเดียว และ D = เปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ

ตารางที่ ฉ-6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* โดยใช้หลอดหลอดแบล็คไลท์ ระหว่างสภาวะที่ไม่มีแผ่นฟอกอากาศกับมีแผ่นฟอกอากาศ

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	C	62.0767	3	2.48818	1.43655
	D	81.9167	3	2.26058	1.30515

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	C & D	3	.543	.634

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	C - D	-19.84000	2.27824	1.31535	-25.49947	-14.18053	-15.083	2	.004

* <u>หมายเหตุ</u> C= เปิดไฟเพียงอย่างเดียว และ D = เปิดไฟร่วมกับแผ่นฟอกอากาศ

ตารางที่ ฉ-7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis*

Group Statistics

	Type	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
A	1.00	3	2.8000	.64117	.37018
	2.00	3	6.0333	.95824	.55324
B	1.00	3	14.9833	.10970	.06333
	2.00	3	26.6767	2.14090	1.23605
C	1.00	3	17.9033	1.20018	.69292
	2.00	3	33.0867	1.30615	.75411
D	1.00	3	20.2400	1.52686	.88153
	2.00	3	36.0667	1.18602	.68475
E	1.00	3	26.1167	.48014	.27721
	2.00	3	46.9367	1.01569	.58641
F	1.00	3	29.1500	1.36847	.79008
	2.00	3	49.2567	.77054	.44487
G	1.00	3	34.2400	2.39577	1.38320
	2.00	3	53.8967	2.26058	1.30515

* หมายเหตุ A = ความเข้มแสง 0ไมโครวัตต์ / ตร.ซม. B = ความเข้มแสง 1.0ไมโครวัตต์ / ตร.ซม.
C =ความเข้มแสง 3.0 ไมโครวัตต์ / ตร.ซม. D =ความเข้มแสง 3.7 ไมโครวัตต์ / ตร.ซม.
E =ความเข้มแสง 70ไมโครวัตต์ / ตร.ซม. F=ความเข้มแสง 220 ไมโครวัตต์ / ตร.ซม.
G =ความเข้มแสง 270 ไมโครวัตต์ / ตร.ซม.

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
A	Equal variances assumed	.662	.461	-4.857	4	.008	-3.23333	.66567	-5.08152	-1.38515
	Equal variances not assumed			-4.857	3.492	.012	-3.23333	.66567	-5.19259	-1.27408
B	Equal variances assumed	6.107	.069	-9.448	4	.001	-11.69333	1.23767	-15.12965	-8.25702
	Equal variances not assumed			-9.448	2.011	.011	-11.69333	1.23767	-16.99202	-6.39464
C	Equal variances assumed	.005	.946	-14.826	4	.000	-15.18333	1.02412	-18.02675	-12.33992
	Equal variances not assumed			-14.826	3.972	.000	-15.18333	1.02412	-18.03476	-12.33191
D	Equal variances assumed	.521	.510	-14.179	4	.000	-15.82667	1.11623	-18.92583	-12.72750
	Equal variances not assumed			-14.179	3.769	.000	-15.82667	1.11623	-19.00207	-12.65126
E	Equal variances assumed	1.040	.365	-32.098	4	.000	-20.82000	.64863	-22.62089	-19.01911
	Equal variances not assumed			-32.098	2.851	.000	-20.82000	.64863	-22.94647	-18.69353
F	Equal variances assumed	1.993	.231	-22.175	4	.000	-20.10667	.90672	-22.62413	-17.58920
	Equal variances not assumed			-22.175	3.152	.000	-20.10667	.90672	-22.91495	-17.29839
G	Equal variances assumed	.003	.960	-10.336	4	.000	-19.65667	1.90175	-24.93676	-14.37657
	Equal variances not assumed			-10.336	3.987	.001	-19.65667	1.90175	-24.94378	-14.36955

ภาคผนวก ช
การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA)

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar จากอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป ซึ่งมีลักษณะเป็นผง ทำได้โดยชั่ง Tryptic Soy Agar 40 กรัมผสมกับน้ำกลั่น 1 ลิตรให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปอุ่นพร้อมกับกวนไปด้วยเป็นเวลา 1 นาที ในการทำอาหารเลี้ยงเชื้อควรแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 1 ลิตร อีกใบหนึ่ง เนื่องจากถ้านำไปนึ่งฆ่าเชื้ออาจจะทำให้อาหารเดือดและล้นออกมาจากภาชนะได้ จากนั้นปิดปากภาชนะด้วยจุกสำลีที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ แล้วทำการสเตอริไรส์โดยใส่อาหารเลี้ยงเชื้อในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ(Autoclave) อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วออกมาทำให้เย็นประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส แล้วเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อพลาสติก ปล่อยทิ้งให้เย็นแล้วจึงคว่ำจานลง นำไปบ่มในตู้เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ หากมีเชื้อขึ้นจะต้องทิ้งทันที แล้วจึงนำจานอาหารเลี้ยงเชื้อพลาสติกที่ไม่มีการปนเปื้อนไปใช้ในการทดลอง ถ้าหากยังไม่ใช้ทดลองทันทีควรเก็บในตู้แช่เย็น

ภาคผนวก ซ
การทดสอบความเที่ยงตรงของปั๊มดูดอากาศ

การทดสอบความเที่ยงตรงของปั๊มดูดอากาศ

เนื่องจาก Single stage impactor กำหนดอัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบความเที่ยงตรงของปั๊มดูดอากาศ ซึ่งทำได้โดยต่อสายยางด้านหนึ่งเข้าทางด้านล่างของเครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter)ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของสายยางให้ต่อเข้ากับปั๊มดูดอากาศ แล้วนำสายยางอีกเส้นหนึ่งต่อเข้าทางด้านบนของเครื่องวัดอัตราการไหล ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของสายยางให้ต่อเข้ากับเครื่อง Bio Impactor จากนั้นปรับอัตราการดูดอากาศของ Bio Impactor โดยใช้วาล์วของปั๊มดูดอากาศ โดยสังเกตอัตราการไหลจาก Rotameter เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน Primary Flow Meter (Drycal DC-Lite) ประมาณ 4 - 5 อัตรา เช่น1, 2, 3, 4 และ 5 ลิตรต่อนาที เพื่อสร้าง Calibration curve ระหว่างค่าที่อ่านได้จาก Rotameter กับ Primary Flow Meter (Drycal DC-Lite)โดยการเก็บตัวอย่างอากาศต้องการอัตราการดูดอากาศ 28.3 ลิตรต่อนาที ดังภาพที่ ซ-1

ภาพที่ ซ-1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดสอบความเที่ยงตรงของปั๊มดูดอากาศ

ภาคผนวก ฌ
การเทียบความขุ่นด้วยวิธี McFarland Standard

การเทียบความขุ่นด้วยวิธี McFarland Standard

1. วิธีเตรียมความขุ่นมาตรฐานสำหรับเทียบจำนวนเชื้อ (พลากร พุทธรักษ์ และสุวรรณา ชัยทวีทรัพย์, 2551: 3)

ความขุ่นมาตรฐาน McFarland Standard No. 0.5 เตรียมโดยใช้ 1.175% $BaCl_2 2H_2O$ จำนวน 0.5 มล. ผสมกับ 1% H_2SO_4 จำนวน 99.5 มล. เก็บไว้ในหลอดทดลองจุกเกลียวที่อุณหภูมิห้อง ในที่มืดได้นาน 6 เดือน ก่อนใช้เทียบความขุ่นต้องเขย่าให้เข้ากันทุกครั้งและควรใช้หลอดทดลองขนาดเดียวกับที่ใช้เลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย ความขุ่นมาตรฐาน McFarland No. 0.5 นี้ตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 625 nm จะได้ค่าความขุ่น(OD) ระหว่าง 0.08-0.10

2. วิธีเตรียมเชื้อเพื่อใช้เทียบกับความขุ่นมาตรฐาน

ทำการเขี่ยเชื้อที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยใช้ loop แตะส่วนบนของโคโลนีใส่ในหลอดที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.85 ของน้ำหนักต่อปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร แล้วนำมาเทียบความขุ่นกับ McFarland standard No.0.5 ถ้าเชื้อขุ่นมากกว่าความขุ่นมาตรฐาน ให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นหรือ การเทียบความขุ่นอาจทำได้โดยการวัดด้วยสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ หรือถ้าเทียบด้วยสายตาให้จับหลอดของเชื้อและหลอด McFarland Standard คู่กัน วางเทียบบนกระดาษสีขาวซึ่งขีดไว้ด้วยเส้นสีดำและควรให้มีแสงสว่างอย่างเพียงพอ เชื้อที่มีความขุ่นเท่ากับความขุ่นมาตรฐานนี้ จะมีจำนวนเชื้อประมาณ 10^8 cfu/ml

ภาคผนวก ญ
การย้อมสีแกรม (Gram stain)

การย้อมสีแกรม (Gram stain) (บัญญัติ สุขศรีงาม, 2525)

- ก่อนการย้อมสีควรล้างสไลด์ให้สะอาด แล้วนำมาแช่ในเอทธิลแอลกอฮอล์ 95% เช็ดให้แห้งหรือเผาเอทธิลแอลกอฮอล์ให้ไหม้หมดจนแห้ง แล้วปล่อยให้เย็น

- หยดน้ำ 1 หยดลงบนสไลด์ แล้วใช้ห่วงถ่ายเชื้อแตะโคโลนีของแบคทีเรียในจานเพาะเชื้อมาเล็กน้อย ทำการเกลี่ย (Smear)เชื้อบนสไลด์ไปมาในน้ำบนสไลด์จนขุ่นจางๆสม่ำเสมอกัน ทิ้งไว้ให้แห้งหรือลนสไลด์ผ่านเปลวไฟจากตะเกียงแอลกอฮอล์ 2-3 ครั้ง แล้วปล่อยให้แห้ง (Heat Fix)

- หยด ammonium oxalate crystal violet ลงไปจนท่วมบริเวณที่เกลี่ยไว้ ทิ้งไว้นาน 1 นาทีแล้วล้างออก โดยใช้นิ้วจับขอบปลายด้านหนึ่งของสไลด์ เอียงราว 45 องศา ปล่อยให้น้ำชะผ่านจนไม่มีละลายออกมาอีก

- หยด Lugol's iodine ลงไปจนท่วมบริเวณที่เกลี่ยไว้ ทิ้งไว้นาน 1 นาทีแล้วล้างออก

- การขจัดสี (decolorization) จับสไลด์เอียงแล้วหยดด้วยสารละลายอะซิโตนแอลกอฮอล์ลงไปเหนือบริเวณที่เกลี่ยไว้ ปล่อยให้สีถูกชะล้างจนกระทั่งไม่มีสีออกมาอีก นาน 15-30 วินาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำอีกครั้ง

- หยด safranin ให้ท่วมทิ้งไว้นาน 15-30 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำ แล้วซับด้วยกระดาษเบาๆ การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะต้องทำการหยดน้ำมันหรือ immersion oil ลงบนบริเวณที่เกลี่ยแบคทีเรียแล้วใช้หัวกำลังขยาย 100 เท่า

โดยที่แบคทีเรียที่ย้อมติดสีน้ำเงินหรือม่วงของ Crystal violet จัดเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (Gram positive) คือ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis*

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรณิกา วนะรมย์ เกิดเมื่อวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหลักสูตรสาธารณสุขศาสตรบัณฑิต แขนงวิชาสาธารณสุขศาสตร์วิชาเอกอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช เมื่อปีการศึกษา 2553

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในหัวข้อเรื่อง Removal of *Staphylococcus epidermidis* Using Photocatalytic Air Purifier Sheet ในการประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9 จัดที่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม วันที่ 6-7 เดือนธันวาคม ปี 2555