



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดจุลินทรีย์
ในอากาศของโรงพยาบาลด้วยนาโนเทคโนโลยี

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การดี ช่วยบำรุง และคณะ

31 กรกฎาคม 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ใน
อากาศของโรงพยาบาลด้วยนาโนเทคโนโลยี

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร.ภารดี ช่วยบำรุง	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
2. ดร.ศิริพร ลาภเกียรติถาวร	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุ
3. Assoc.Prof.Dr.Chang-Yu Wu	Dept. of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, USA.

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก นางสาวจตุติ โชติกาวิรินทร์ นางสาวยุพรัตน์ หลิมมงคล และนางสาวชุลีวัลย์ ธัญญศิริพันธ์ นักศึกษาปริญญาเอก หลักสูตรสาธารณสุขศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ช่วยงานในห้องปฏิบัติการและเก็บตัวอย่างในภาคสนาม โดยอุปกรณ์ด้านจุลชีววิทยาและสถานที่ปฏิบัติงานได้รับความอนุเคราะห์จาก คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นภายใต้การดูแลของรองศาสตราจารย์พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์ อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมได้รับความเอื้อเฟื้อจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่นภายใต้การประสานของผศ.ดร.สิริวิชัย เตชะเจษฎารังษี และอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซอินทรีย์ระเหยง่ายได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์อนามัยที่ 5 นครราชสีมา คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

แผ่นกรองอากาศที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับการอำนวยความสะดวกจากบริษัทแอโรฟิล ในการสั่งซื้อให้ได้แผ่นกรองตามลักษณะที่ต้องการ ส่วนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ตลอดจนการตรวจสอบลักษณะของแผ่นกรองที่เคลือบแล้ว ได้รับความช่วยเหลือจากดร.สิทธิสุนทร สุโพธิ์ณะ และทีมงานจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ขอแนะนำเพิ่มเติมในการศึกษาวิจัย ปฏิบัติการโฟโตคะตะไลซิสให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้รับความกรุณาจาก Dr.Jeff Johns จากคณะ เกสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ในส่วนของการเก็บตัวอย่างภาคสนามในโรงพยาบาล คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กับเครื่องฟอกอากาศชนิดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้รับการสนับสนุนเครื่องฟอกอากาศพร้อมความช่วยเหลือในการแก้ไขตัดแปลงโครงสร้างจากคุณพลศักดิ์ ปิยะทัต จากบริษัทอัลไพน์ จำกัด โดยไม่คิดมูลค่าใดๆ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง พร้อมกับขอบพระคุณเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการจุลชีววิทยาคลินิก เจ้าหน้าที่หน่วยไตและไตเทียมของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น รวมทั้งเจ้าหน้าที่หน่วยทันตกรรมของวิทยาลัยการสาธารณสุขแห่งหนึ่ง ที่ให้ความร่วมมือในการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศเป็นอย่างดี

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้จะไม่บังเกิดขึ้นได้ หากไม่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โดยผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาคัดเลือกโครงการ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ฝ่ายวิชาการผู้ดูแลโครงการและเจ้าหน้าที่การเงินทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานเป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับแผ่นกรองอากาศชนิดประสิทธิภาพสูง เพื่อผลในการกำจัดจุลินทรีย์ที่มาเกาะติดบนแผ่นกรองในระหว่างที่มีการกรองอากาศ ไม่ให้มีโอกาสแพร่กระจายออกจากแผ่นกรองนั้นไปปนเปื้อนอากาศที่ผ่านการกรองแล้ว ปฏิกิริยาดังกล่าวมาจากการเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2 ในปริมาณ $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$ แล้วฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิด A ความเข้มแสง $4.85 \pm 0.09 \text{ mW/cm}^2$ เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ทดสอบได้แก่ *Staphylococcus epidermidis*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* และ *Penicillium citrinum* ทดลองในสภาพความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$ และ $75 \pm 5\%$ และในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายโทลูอีนความเข้มข้น 100 ppm และไซลีนความเข้มข้น 50 ppm อยู่ร่วมด้วย

ผลการศึกษาพบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัด *S. epidermidis* ได้ 100% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง กำจัด *B. subtilis* ได้ 87% กำจัด *A. niger* ได้ 77% และ *P. citrinum* ได้ 83% เมื่อใช้เวลาการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่มี การฉายแสงในระยะเวลาเท่าๆกัน พบว่า *S. epidermidis* ถูกกำจัดได้เพียง 39% *B. subtilis* ถูกกำจัดได้ 24% ขณะที่ *A. niger* และ *P. citrinum* ถูกกำจัดได้เท่าๆกัน คือ 12% เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็น $75 \pm 5\%$ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัด *S. epidermidis*, *B. subtilis*, *A. niger* และ *P. Citrinum* ได้ 89%, 44%, 22% และ 42% ตามลำดับจากการฉายแสงนานเท่าเดิม ในส่วนของการมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ร่วมด้วย โทลูอีนหรือไซลีนอย่างใดอย่างหนึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองอากาศลดลงแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เฉพาะกรณีที่มีทั้งโทลูอีนและไซลีนอยู่ร่วมด้วยเท่านั้น จึงมีผลให้ความสามารถในการกำจัด *B. subtilis* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (กำจัดลดลง 10-31%) ขณะที่จุลินทรีย์ชนิดอื่น แม้ว่าจะพบการกำจัดที่ลดลง แต่ก็ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน

นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังได้นำแผ่นกรองโฟโตคะตะไลซิสไปใช้กับเครื่องฟอกอากาศเพื่อทดสอบการกำจัดแบคทีเรียรวมในอากาศของโรงพยาบาล เปรียบเทียบจำนวนของแบคทีเรียที่พบก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระหว่างเปิดเครื่องฟอกอากาศ และหลังจากที่ปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว พบว่า ทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ จำนวนแบคทีเรียรวมในอากาศลดลงได้สูงสุดถึง 78% ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศและสภาพแวดล้อมของแต่ละสถานที่ และทันทีที่ปิดเครื่องฟอกอากาศ จำนวนแบคทีเรียนั้นก็กลับมาเพิ่มจำนวนขึ้นจนใกล้เคียงกับของเดิม

Abstract

This study applied photocatalytic oxidation reactions to the high efficiency particulate air filter in order to disinfect microorganisms attached on the filter during infiltration. Microorganisms retained inside the filter, consequently, could not proliferate nor dissipate to the clean-filtered air. Photocatalysis occurs when the filter was coated with TiO_2 loading of $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$ and irradiated with ultraviolet-A, intensity of $4.85 \pm 0.09 \text{ mW/cm}^2$. Microorganisms used were *Staphylococcus epidermidis*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, and *Penicillium citrinum*. The tests were performed when relative humidity was adjusted to $45 \pm 5\%$ or $75 \pm 5\%$, and 100 ppm toluene or 50 ppm xylene was added, as well as the mixtures of them were added.

The results showed that at humidity of $45 \pm 5\% \text{RH}$, photocatalysis could disinfect 100% of *S. Epidermidis* within 2 hrs, while it could disinfect 87% of *B. subtilis*, 77% of *A. niger*, and 83% of *P. citrinum* for irradiation time of 10 hrs. In the condition of no UV-A irradiation, the disinfections were 39%, 24%, 12%, and 12% for *S. epidermidis*, *B. subtilis*, *A. niger*, and *P. citrinum*, respectively. When humidity was increased to $75 \pm 5\% \text{RH}$, photocatalysis disinfections were reduced to 89%, 44%, 22%, and 42% for *S. epidermidis*, *B. subtilis*, *A. niger*, and *P. citrinum*, respectively. In terms of interferences from toluene and xylene, it was found that either toluene or xylene could not significantly reduce the capability of photocatalysis disinfections. Only a mixture of toluene and xylene could significantly reduce *B. subtilis* for 10-31%, while other microorganisms were not significantly affected.

Moreover, this study had applied a photocatalytic filter to an air purifier and conducted its performance test in a hospital air. It revealed that after the air purifier was turned on, the total bacteria concentrations were immediately reduced (up to 78%) from the original concentration before the instrument was on. The quantity of reduction depended on the distance from the air purifier and environments in each place. Likewise, as soon as the air purifier was turned off, the total bacteria concentrations were increased to be close to the original numbers.

Executive Summary

การศึกษาการพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาลด้วยนาโนเทคโนโลยีนี้ ใช้วิธีการเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิด A เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสขึ้น การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระจำพวก hydroxyl radical ($\text{OH}^\cdot$), superoxide radical ($\text{O}_2^\cdot$), perhydroxyl radical ($\text{HOO}^\cdot$) และ hydrogen peroxide (H_2O_2) ที่มีอำนาจในการทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่เกาะติดบนแผ่นกรอง ดังนั้น ในระหว่างที่มีการกรองอากาศ จุลินทรีย์ก็就会被ทำลายจนไม่มีโอกาสเจริญเติบโตและแพร่กระจายออกจากแผ่นกรองไปปนเปื้อนอากาศที่ผ่านการกรองแล้วได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *Staphylococcus epidermidis* และ *Bacillus subtilis* และเชื้อราอีก 2 ชนิด คือ *Aspergillus niger* และ *Penicillium citrinum* ซึ่งเป็นเชื้อที่พบมากที่สุด ในบรรยากาศของโรงพยาบาล ในสภาพความชื้นสัมพัทธ์ $45\pm 5\%$ และ $75\pm 5\%$ และในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายโทลูอินความเข้มข้น 100 ppm และไซลีนความเข้มข้น 50 ppm อยู่ร่วมด้วย หลังจากนั้นได้ทดลองนำแผ่นกรองดังกล่าวไปใช้กับเครื่องฟอกอากาศ และทดสอบความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียรวมออกจากกระแสอากาศของโรงพยาบาล โดยเปรียบเทียบจำนวนแบคทีเรียรวมก่อนที่จะเปิดเครื่องฟอกอากาศ กับจำนวนแบคทีเรียที่พบในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ และจำนวนที่พบหลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว

ทั้งนี้ก่อนที่จะทำการเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2 จำเป็นต้องมีการกำจัดการกีดกันน้ำที่บริษัทผู้ผลิตเคลือบไว้ที่ผิวหน้าของแผ่นกรองก่อน ในการศึกษาเลือกใช้วิธีการล้างด้วยสารละลาย 0.08 M sodium dodecyl sulfate 2 ครั้ง แล้วผึ่งให้แห้งก่อนนำไปจุ่มในสารละลาย TiO_2 2% นาน 10 นาที จะได้เป็นปริมาณ TiO_2 ที่เกาะติดบนแผ่นกรอง $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$ ของแผ่นกรอง เมื่อทดสอบความต้านลดยของแผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 แล้ว พบว่าการเคลือบทำให้ความต้านลดยเพิ่มขึ้นจากแผ่นกรองปกติที่ไม่มีการเคลือบเล็กน้อย กล่าวคือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $45\pm 5\%$ พบความต้านลดยเพิ่มขึ้น 0.26 นิ้วน้ำ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75\pm 5\%$ พบความต้านลดยเพิ่มขึ้น 0.43 นิ้วน้ำ เมื่อใช้ความเร็วลมตั้งแต่ 0.1, 0.3 และ 0.5 เมตร/วินาทีในการทดสอบ โดยความเร็วลมยิ่งเพิ่ม ความต้านลดยก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และความชื้นสัมพัทธ์ที่มากขึ้นทำให้ความต้านลดยเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในแง่ของการหลุดล่อนของ TiO_2 ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน การศึกษานี้มีการทดสอบโดยใช้ blower เป่าลมผ่านแผ่นกรองด้วยความเร็ว 0.3 เมตร/วินาทีนาน 10 ชั่วโมง พบว่า น้ำหนักของ TiO_2 ลดลงไปเพียง 3.5% ของน้ำหนักตั้งต้น

สำหรับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรอง กระทำโดยเปรียบเทียบจำนวนจุลินทรีย์ที่สกัดได้จากแผ่นกรอง ระหว่างช่วงที่มีการฉายแสง UV-A (มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น) กับช่วงที่ไม่มีการฉายแสง (ไม่มีปฏิกิริยา) พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $45\pm 5\%$ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัด *S. epidermidis* ได้ 100% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง

และสามารถกำจัด *B. subtilis* ได้ 87% เมื่อใช้เวลาการฉายแสง 10 ชั่วโมง และกำจัด *A. niger* ได้ 77% รวมถึงกำจัด *P. citrinum* ได้ 83% เมื่อใช้เวลาการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน กรณีที่ไม่มีการฉายแสง ในระยะเวลาเท่าๆกัน พบว่า *S. epidermidis* ที่สกัดได้จากแผ่นกรองมีจำนวนลดลงจากจำนวนตั้งต้นเพียง 39% *B. subtilis* มีจำนวนลดลง 24% ขณะที่ *A. niger* และ *P. citrinum* มีจำนวนลดลงเท่าๆกัน คือ 12% แสดงให้เห็นว่า แผ่นกรองที่มีปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่ติดอยู่บนแผ่นกรองได้มากกว่าแผ่นกรองปกติที่ไม่มีปฏิริยาเกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น $75 \pm 5\%$ ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรองลดลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ กำจัด *S. epidermidis* ได้เพียง 89% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนการกำจัด *B. subtilis*, *A. niger* และ *P. citrinum* เหลือเพียง 44%, 22% และ 42% ตามลำดับจากการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมงเช่นเดิม

ในส่วนของผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองของปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส พบว่าการมี toluene ความเข้มข้น 100 ppm อยู่ร่วมด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ลดลง 0.8-11.8% แต่เมื่อทดสอบทางสถิติ พบว่าการลดลงนั้นไม่มีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการมี xylene ความเข้มข้น 50 ppm อยู่ร่วมด้วย มีผลให้การกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิริยาลดลง 0.6-15.9% ซึ่งไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การมีทั้ง toluene และ xylene ในความเข้มข้นดังกล่าวอยู่ร่วมด้วยพร้อมๆกัน พบว่ามีผลทำให้การกำจัด *Bacillus subtilis* บนแผ่นกรองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ลดลง 10-31%) ส่วนจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆแม้ว่าพบการกำจัดที่ลดลง (0.7-20%) แต่ก็ยังคงไม่มีนัยสำคัญทางสถิติอยู่นั่นเอง

สุดท้าย การนำแผ่นกรองที่มีปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสไปประยุกต์ใช้กับเครื่องฟอกอากาศเพื่อกำจัดแบคทีเรียรวมในบรรยากาศของโรงพยาบาลนั้น พบว่าทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศจำนวนแบคทีเรียรวมภายในห้องนั้นลดจำนวนลงอย่างทันที (สูงสุด 78%) และหลังจากที่ปิดเครื่องฟอกอากาศแล้ว จำนวนแบคทีเรียก็กลับมาทวีจำนวนขึ้นดังเดิม ซึ่งการลดลงของแบคทีเรียจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนตั้งต้นที่มีอยู่ก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างนั้นด้วย กล่าวคือ ถ้าเป็นจุดที่มีกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายตัวของแบคทีเรีย เช่นตำแหน่งประตูที่มีการเดินเข้า-ออกตลอดเวลา หรือมีช่องทางเข้าของอากาศจากภายนอก โอกาสที่เครื่องฟอกอากาศจะช่วยลดจำนวนแบคทีเรีน้นก็น้อยลงตามไปด้วย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
Abstract	iii
Executive summary	iv
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	8
3.1 การเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2	8
3.2 Chamber ทดลอง	9
3.3 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์	10
3.4 การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	12
3.5 การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	14
3.6 การศึกษาในโรงพยาบาล	15
บทที่ 4 ผลการศึกษา	22
4.1 แผ่นกรองเคลือบ TiO_2	22
4.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	25
4.3 ผลกระทบของความชื้น	26
4.4 ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	28
4.5 การกำจัดจุลินทรีย์ในสภาวะจริงของโรงพยาบาล	31
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	49
Output ที่ได้จากโครงการ	52
ภาคผนวก	53

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การกำจัดสารกันน้ำและปริมาณ TiO_2 ที่เคลือบได้จากวิธีต่างๆ	23
2	ความดันลด (นิ้วน้ำ) ของแผ่นกรองที่ความเร็วลมต่างกัน	24
3	ร้อยละของการกำจัดแบคทีเรียบนแผ่นกรอง HEPA filter ที่เคลือบ TiO_2	25
4	ร้อยละของการกำจัดเชื้อราบนแผ่นกรอง HEPA filter ที่เคลือบ TiO_2	26
5	จำนวนเชื้อรา (cfu/m^3) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องเตรียมอาหาร	33
6	จำนวนเชื้อรา (cfu/m^3) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องล้างอุปกรณ์	35
7	จำนวนเชื้อรา (cfu/m^3) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา	38
8	จำนวนเชื้อรา (cfu/m^3) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องฟอกไต	40
9	จำนวนเชื้อรา (cfu/m^3) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องชำระล้างของหน่วยไต	42

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 Chamber ทดลอง	8
2 Nebulizer สำหรับพ่นจุลินทรีย์	9
3 ขั้นตอนการสกัดเชื้อจุลินทรีย์ออกจากแผ่นกรอง HEPA filter	11
4 จุลินทรีย์ที่สกัดได้จากแผ่นกรอง HEPA filter	12
5 เครื่องฟอกอากาศที่ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	13
6 Single-stage impactor และปั๊มเก็บตัวอย่าง	14
7 การเก็บตัวอย่างในห้องเตรียมอาหารหน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์	15
8 การเก็บตัวอย่างในห้องล้างอุปกรณ์หน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์	16
9 การเก็บตัวอย่างในห้องปฏิบัติการหน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์	17
10 การเก็บตัวอย่างในห้องฟอกไตของหน่วยไตและไตเทียมโรงพยาบาลศรีนครินทร์	18
11 การเก็บตัวอย่างในห้องชำระล้างของหน่วยไตและไตเทียมโรงพยาบาลศรีนครินทร์	19
12 การเก็บตัวอย่างในห้องทันตกรรม	20
13 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย	21
14 เส้นใย HEPA filter ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดและที่ผ่านการกำจัดสารกันน้ำ	23
15 อนุภาค TiO_2 บนเส้นใย HEPA filter ที่ผ่านการกำจัดสารกันน้ำด้วยวิธีต่างๆ	24
16 อนุภาค TiO_2 บนเส้นใย HEPA filter ที่ผ่านการเป่าลมนาน 10 ชั่วโมง	25
17 ผลของความชื้นต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรอง	27
18 ผลของ toluene ต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2	28
19 ผลของ xylene ต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2	29
20 ผลของ toluene และ xylene ในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2	30
21 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องเตรียมอาหาร ก่อน-ระหว่าง และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	31
22 ช่องลมเหนือจุดเก็บตัวอย่างจุดที่ 4	32
23 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องเตรียมอาหารเรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ	32
24 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องล้างอุปกรณ์ ก่อน-ระหว่างเปิด และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	34
25 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องล้างอุปกรณ์เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
26	จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ก่อน-ระหว่างเปิด และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	36
27	จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาเรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ	37
28	จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องฟอกไต ก่อน-ระหว่างเปิด และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	39
29	จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องฟอกไต เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ	40
30	จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องชำระล้าง ก่อน-ระหว่างเปิด และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	41
31	จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยทันตกรรมช่วงเวลาราชการ ก่อน-ระหว่างเปิดและหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	43
32	จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยทันตกรรมช่วงเวลาราชการ เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ	44
33	จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยทันตกรรมช่วงนอกเวลาราชการ ก่อน-ระหว่างเปิด และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ	45
34	จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยทันตกรรมช่วงนอกเวลาราชการ เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ	46

บทที่ 1

บทนำ

โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคของแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงพยาบาลที่มีปัญหาการติดเชื้อ และมีความต้องการคุณภาพอากาศที่ดี โดยใช้หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีความสามารถในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นกรองอากาศแล้วฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 365 นาโนเมตรให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว รายละเอียดของปัญหาที่นำมาสู่การศึกษาวิจัย วัตถุประสงค์ รวมถึงขอบเขตในการศึกษามีดังต่อไปนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โรงพยาบาลเป็นสถานที่ที่ผู้ป่วยจำนวนมากมาขอรับการบำบัดและตรวจรักษา การแพร่กระจายของเชื้อโรคจากผู้ป่วยต่างๆ เหล่านั้นจึงเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาในอากาศที่ทุกคนใช้หายใจร่วมกัน โดยในการจามแต่ละครั้งอนุภาคขนาด 10-100 ไมครอนจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วขนาด 100 เมตรต่อวินาที และแห้งได้อย่างรวดเร็วจนมีขนาดเพียง 1-4 μm ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถเข้าถึงปอดได้ (Deacon, 2004) ทั้งนี้ อนุภาคขนาด 10 μm โดยทั่วไปมักถูกกักไว้ที่จมูกได้ถึง 100% ส่วนอนุภาคขนาด 5 μm จะถูกกักไว้เพียง 75% เมื่อหายใจปกติทางจมูก (Hinds, 1982) อนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 6 μm ส่วนใหญ่จะสามารถหลบหนีกลไกการกำจัดสิ่งแปลกปลอมของระบบทางเดินหายใจส่วนต้นและเข้าสู่ปอดได้ (Hidy, 1984) อนุภาคที่เข้าสู่ถุงลมปอดมักมีขนาดตั้งแต่ 0.1 μm ลงมา โดยพบว่าอนุภาคที่ละเอียดมากขนาด 0.01 μm สะสมอยู่ที่ถุงลมปอด 50% แต่พบอยู่ที่จมูกเพียง 15% เท่านั้น (Newhouse and Ruffin, 1978) ถ้าอนุภาคเหล่านี้มีเชื้อโรคเจือปนอยู่ด้วย การก่อให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ นอกเหนือไปจากหอบหืดและภูมิแพ้จึงมีโอกาสมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ที่อยู่ในสภาวะที่ร่างกายกำลังอ่อนแอและมีภูมิคุ้มกันบกพร่องไปกว่าสภาวะปกติ การฉวยโอกาสก่อให้เกิดโรคของเชื้อเหล่านี้จึงมีสูงกว่าภาวะทั่วไป

ในแง่ของระบาดวิทยา พบว่าเชื้อวัณโรคจำนวน 1-10 อนุภาคอาจก่อให้เกิดการติดเชื้อได้ ขณะที่เชื้อ Rhinovirus จำนวน 200 อนุภาคอาจทำให้เกิดโรคหวัดขึ้น ผู้ป่วยวัณโรคสามารถแพร่กระจายเชื้อได้ 1-249 อนุภาคในหนึ่งชั่วโมง ผู้ป่วยโรคหวัดแพร่เชื้อได้ 6200 อนุภาค/ชั่วโมง โดยเชื้อเหล่านี้ยังคงมีชีวิตอยู่ในอากาศได้นานเกิน 10 นาที ขณะที่ผู้ป่วยโรคหัด แพร่เชื้อได้ 5480 อนุภาค/ชั่วโมง (Kowalski and Bahnfleth, 1998) ในการจามของผู้ป่วยหนึ่งครั้ง สามารถปล่อยอนุภาคออกมาได้มากกว่า 100,000 อนุภาค ขณะที่การไอแต่ละครั้ง จะก่อให้เกิดการแพร่กระจายของอนุภาคได้มากกว่า 1,000 อนุภาค (Kowalski and Bahnfleth, 1998) แม้ว่าการไอจะก่อให้เกิดอนุภาคน้อยกว่าการจาม แต่ความถี่ของการไอก็สูงกว่าการจามถึง 10 เท่า (Kowalski and Bahnfleth, 1998) และจากการศึกษาพบว่า *A. flavus* ในอากาศจำนวน 1.1-1.2 cfu/m³ (colony forming units per cubic meter of air) สัมพันธ์กับอัตราการติดเชื้อ 4% ส่วน *A. fumigatus* 0.9 cfu/m³ สัมพันธ์กับอัตราการติดเชื้อ 5% (Streifel, 2004) นอกจากนี้ยังพบอัตราการติดเชื้อของผู้ป่วยหลังการผ่าตัดเกิดขึ้น 1.5-3% ทั้งๆที่มีการ

ฆ่าเชื้อโรคเป็นอย่างดี โดยพบว่าเชื้อรา *Aspergillus* เป็นตัวการในอัตราการตายของผู้ป่วยปลูกถ่ายไขกระดูกสูงถึง 95% ซึ่งในผู้ป่วยโรค leukemia มีอัตราการตายจาก Aspergillosis ได้ 13-80% และผู้ป่วยเปลี่ยนถ่ายไตมีอัตราการตายจากเชื้อนี้ 8-30% (MS Hospital Consulting, 2004) ในประเทศฝรั่งเศสมีการศึกษาที่พบว่าเมื่อใดก็ตามที่ปริมาณเชื้อ *Aspergillus* spp ในอากาศของโรงพยาบาลมีมากกว่า 2 cfu/m^3 ขึ้นไปจะสัมพันธ์กับการพบการติดเชื้อในผู้ป่วยที่พักฟื้นอยู่ โดยพบปริมาณเชื้อ *Aspergillus* spp เฉลี่ย $1.5\text{-}2.3 \text{ cfu/m}^3$ ในแผนกปลูกถ่ายไขกระดูก และสูงถึง 4 cfu/m^3 ในห้องโถงของแผนก โดย 71% จะเป็นชนิด *Aspergillus fumigatus* (Alberti et al., 2001) สำหรับประเทศไทย จากการสำรวจโรงพยาบาลขนาด 700 เตียงในจังหวัดขอนแก่นพบว่า *Aspergillus* spp นั้นมีปริมาณสูงสุดในกลุ่มของเชื้อราด้วยค่าเฉลี่ย 31 CFU/m^3 (พบได้ตั้งแต่ 0 จนถึง 152 CFU/m^3) หรือ 8% จากจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ศึกษา โดยจุดที่พบสูงสุดคือแผนกผู้ป่วยไฟไหม้น้ำร้อนลวก (การดี ช่วยบำรุงและคณะ, 2548)

การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในบรรยากาศของโรงพยาบาลทำได้โดยใช้รังสี UV (ultraviolet germicidal irradiation: UVGI) ระบบระบายอากาศที่เหมาะสม และการกรองอากาศผ่านแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบคือ รังสี UV นั้นไม่สามารถฆ่าสปอร์ของเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kowalski and Bahnfleth, 1998; Montz, 2004) ส่วนการระบายอากาศนั้นเป็นการเจือจางความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาหมุนเวียนแทนที่เท่านั้นไม่ใช้การกำจัดจุลินทรีย์แต่อย่างใด นอกจากนี้ แผ่นกรองที่ประสงค์จะใช้กรองเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งกำหนดประสิทธิภาพ 99.97% สำหรับอนุภาคขนาด $0.3 \mu\text{m}$ ยังกลับกลายเป็นแหล่งเพาะเชื้อที่ดีที่สุดถ้ามีความชื้นเพียงพออีกด้วย (Kowalski and Bahnfleth, 1998) โดยพบว่าการดักจับอนุภาคแบคทีเรียมีเพียง 67% ภายใต้สภาวะความชื้น $<80\%$ และอุณหภูมิ $>12^\circ\text{C}$ และแทบจะไม่สามารถดักจับแบคทีเรียขนาด $1.1\text{-}2.1 \mu\text{m}$ ไปได้เลย ส่วนเชื้อราที่ดักจับได้ในช่วง 50-90% แต่ถ้าความชื้นมี $>80\%$ จำนวนแบคทีเรียหลังผ่านแผ่นกรอง (269 CFU/m^3) กลับมีมากกว่าก่อนผ่านแผ่นกรอง (256 CFU/m^3) อันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนบนแผ่นกรองนั้นนั่นเอง (Möriz et al., 2001)

โครงการนี้จึงเสนอการพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ด้วยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบบนเส้นใยของแผ่นกรอง เพื่อผลในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาล เนื่องจาก TiO_2 สามารถก่อให้เกิด hydroxyl radical และ superoxide radical ที่มีอำนาจในการทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้เมื่อถูกกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสง UV อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของ TiO_2 นั้นอาจลดลงได้ถ้าความชื้นสูงถึง 22000 ppmv เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจะไปแย่งเกาะติดบนพื้นผิวของ TiO_2 ทำให้พื้นที่ว่างสำหรับให้จุลินทรีย์ไปเกาะติดลดลง (Li et al., 2005) นอกเหนือไปจากการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาจากสารอินทรีย์อื่นๆ ในกลุ่มของ VOCs ในอากาศอีกด้วย (Ollis, 2000) ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนชื้น จึงเป็นที่น่าสนใจว่าประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงที่เคลือบด้วย TiO_2 ในโรงพยาบาลจะมีมากน้อยเพียงใด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้ามีตัวแปรทั้งความชื้น ก๊าซมลพิษ และตัวแปรอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องตามสภาพความเป็นจริง ทั้งนี้งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศนั้นยังคงแปรผลเฉพาะชนิดของเชื้อจุลินทรีย์อยู่ โดยยังไม่เริ่มหันมาสนใจกับตัวแปรของสภาพแวดล้อมมากนัก และในประเทศ

ไทยยังไม่มีการวิจัยในลักษณะนี้เกิดขึ้นมาก่อน จึงคาดว่าโครงการนี้น่าจะเป็นโครงการต้นแบบที่นำไปสู่การพัฒนางานในลักษณะเดียวกันได้ อีกทั้งองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีกับประสิทธิภาพของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาลยังคงมีอยู่ไม่มากนักทั้งระดับประเทศและนานาชาติ เนื่องจากเทคโนโลยีส่วนใหญ่มุ่งเน้นการบำบัดมลพิษทางน้ำหรือน้ำสะอาด และการกำจัดองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในกลุ่มของ VOCs ในอากาศมากกว่า จึงเชื่อได้ว่า องค์ความรู้ที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อสาธารณชนจำนวนมาก นอกเหนือไปจากประโยชน์เฉพาะหน้า ที่มีต่อประชาชนที่มาใช้บริการของโรงพยาบาลและคุณภาพชีวิตของบุคลากรที่เกี่ยวข้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจาก TiO_2
2. เพื่อศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อม (ความชื้นและสารอินทรีย์ระเหยง่าย) ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงที่เคลือบด้วย TiO_2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นบนแผ่นกรอง โดยมุ่งเน้นที่การกำจัดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรองเท่านั้น ไม่ได้รวมไปถึงการศึกษาความสามารถในการกรองจุลินทรีย์หรือการหลุดลอดออกไปจากแผ่นกรองแต่อย่างใด จุลินทรีย์ที่ทดสอบเลือกมาจากกลุ่มที่พบมากและก่อให้เกิดปัญหาในโรงพยาบาล แต่เป็นสายพันธุ์ที่ค่อนข้างปลอดภัยสำหรับการศึกษาวิจัย ได้แก่ *Staphylococcus epidermidis*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, *Penicillium citrinum* ทดสอบใน chamber ที่กำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ $45\pm 5\%$ และ $75\pm 5\%$ ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่มของ VOCs ทดสอบเฉพาะ xylene และ toluene ในความเข้มข้น 50 และ 100 ppm ตามลำดับ โดยศึกษาในห้องปฏิบัติการของคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นตั้งแต่เดือนมีนาคม 2550 จนถึง ธันวาคม 2551

ในส่วนของการศึกษาในโรงพยาบาล การกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรอง HEPA filter ที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้น กระทำในรูปของเครื่องฟอกอากาศ โดยเปรียบเทียบจำนวนแบคทีเรียรวมและเชื้อรารวมจากการเก็บตัวอย่างอากาศในห้องต่างๆตั้งแต่ก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ-ระหว่างเปิดเครื่องฟอกอากาศ-และหลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศ ช่วงละ 90-120 นาทีต่อเนื่องกันไป สถานที่เก็บตัวอย่างได้แก่ หน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จำนวน 3 ห้อง หน่วยไตและไตเทียมของโรงพยาบาลศรีนครินทร์จังหวัดขอนแก่นจำนวน 2 ห้อง หน่วยทันตกรรมของวิทยาลัยการสาธารณสุขแห่งหนึ่ง โดยศึกษาในช่วงเดือนพฤษภาคม – มิถุนายน 2552 ตามสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานั้นๆ

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือนาโนไทเทเนียม (TiO_2) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 385 nm จะก่อให้เกิด hole (h^+) ใน valence band และ e^- ใน conduction band ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ที่รุนแรง โดย h^+ จะรวมตัวกับ OH^- ในโมเลกุลของน้ำกลายเป็น hydroxyl radical ($\text{OH}^\bullet$) ขณะที่ e^- รวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็น superoxide ion (O_2^-) (Fujishima et al., 2000; Zhao and Yang, 2003) ซึ่งมีอำนาจในการทำลายเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้ (Ibáñez et al., 2003) โดยความไวต่อการถูกทำลายของไวรัสจะมีมากกว่าเซลล์แบคทีเรียและสปอร์ของแบคทีเรียตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างที่ต่างกันและความหนาของเซลล์ที่ต่างกัน ทำให้จุลินทรีย์แต่ละชนิดถูกกำจัดในอัตราที่ต่างกัน (Huang et al., 2000) ทั้งๆที่ในอดีต Block et al., 1997 ระบุไว้ว่าไม่มีความแตกต่างในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการทำลายแบคทีเรียแกรมลบที่มีผนังเซลล์หนากับแบคทีเรียแกรมบวกที่มีผนังเซลล์บางแต่อย่างใด ทั้งนี้ ตัวการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ที่แท้จริงนั้นเป็นไปได้ทั้งจาก superoxide anion (O_2^-), perhydroxyl radical ($\text{HOO}^\bullet$) และ hydrogen peroxide (H_2O_2) โดยมีรายงานวิจัยที่แสดงว่า hydrogen peroxide (H_2O_2) เป็นตัวการสำคัญมากกว่า $\text{OH}^\bullet$ เนื่องจาก $\text{OH}^\bullet$ ไม่สามารถซึมผ่านเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์เหมือนที่ H_2O_2 ทำได้ (Kikuchi et al., 1997) แต่เนื่องจากความเข้มข้นของ H_2O_2 ในงานวิจัยของ Kikuchi et al., 1997 มีค่าเพียง 2×10^{-7} mol/L ซึ่งไม่สูงพอที่จะทำลายเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้ คณะผู้วิจัยจึงคาดว่า H_2O_2 นั้นทำปฏิกิริยาต่อกับ O_2^- ได้เป็น $\text{OH}^\bullet$, OH^- และ O_2 ภายในเซลล์ของแบคทีเรียที่นำไปสู่การทำลายองค์ประกอบภายในเซลล์จนมันตายไปในที่สุด

การทดสอบประสิทธิภาพของ TiO_2 ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์นั้นส่วนใหญ่จะกระทำในน้ำดื่ม (Rincón and Pulgarin, 2004a; Coleman et al., 2005; Lonnen et al., 2005) หรือน้ำเสียในระบบบำบัด (Ibáñez et al., 2003; Rincón and Pulgarin, 2004b) มีบ้างที่ทดสอบในอาหาร (Kim et al., 2003; Hur et al., 2005) และน้อยมากที่ทดสอบในอากาศ (Goswami et al., 1997; Vohra et al., 2005) เชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกนำมาทดสอบส่วนใหญ่คือ *Escherichia coli* เช่นในงานวิจัยของ Maness et al. (1999) ใช้ malondialdehyde (MDA) เป็นดัชนีบ่งบอกถึงการถูกทำลายเซลล์เมมเบรนของ *E. coli* โดยพบว่า MDA เพิ่มขึ้นจนถึง 1.1-2.4 nmol/mg cell (dry weight) ภายในเวลา 30 นาที ร่วมกับการสูญเสียกิจกรรมการหายใจของเซลล์ 77-93% ส่วนงานวิจัยของ Huang et al. (2000) ใช้ o-nitrophenol β -D-galactopyranoside (ONPG) เป็นตัวชี้วัดการแตกของผนังเซลล์ของ *E. coli* โดยพบ ONPG เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังการฉายแสง UV บน TiO_2 ขณะที่การรั่วไหลของโมเลกุลขนาดใหญ่เช่นเอนไซม์ β -D-galactosidase เกิดขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที ซึ่งคณะผู้วิจัยสรุปว่าหลังจากผนังเซลล์ของ *E. coli* ถูกทำลาย จะเกิดการทำลายเซลล์เมมเบรนจนทำให้องค์ประกอบภายในเซลล์รั่วไหลออกมาจนเป็นสาเหตุของการตายของเชื้อ *E. coli* ขึ้น นอกเหนือไปจากการทำลายองค์ประกอบภายในเซลล์ด้วย ส่วน Saito et al. (1992) พบว่าความเข้มข้นของผง TiO_2 1 mg/ml มีประสิทธิภาพในการกำจัด *Streptococcus sobrinus* ปริมาณ 10^5 CFU/ml มากที่สุดภายในระยะเวลา 1 นาที โดยผู้วิจัยพบการรั่วไหลของ K^+ ออกจากเซลล์อย่างรวดเร็ว ขณะที่โปรตีนและ RNA รั่วออกมาภายนอกเซลล์อย่างช้าๆภายในช่วงเวลา 120 นาที อันแสดงถึงการทำลายของผนังเซลล์อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของ TiO_2 ในการกำจัดเชื้อราชนิด *Candida albicans*, *Pseudomonas aeruginosa* และ *Fusarium solani* และ โปรโตซัวชนิด *Acanthamoeba polyphaga* (trophozoite stage) ซึ่งทนต่อความร้อนและแสง UV ได้ดีรวมถึงสปอร์ของแบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Bacillus subtilis* ในน้ำดื่มยังถูกนำมาทดสอบด้วยเช่นกัน โดย Lonnen et al. (2005) ใช้ความเข้มข้นของแสง UV ขนาดใกล้เคียงกับธรรมชาติที่ 200 W/m^2 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* นั้นไม่ดีเท่าที่ควรโดยลดจำนวนสปอร์ได้เพียง 1.7 log unit ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ขณะที่จุลินทรีย์อื่น ๆ ลดปริมาณได้ 4.2-5.5 log unit ในระยะเวลา 2-4 ชั่วโมงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม cysts ของ *A. polyphaga* ไม่ถูกกำจัดเลยในช่วงระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยภาพรวมพบว่าความยากง่ายของการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เรียงตามลำดับจากง่ายไปยากได้ดังนี้ *E. coli DH5 α* > *P. aeruginosa* > *A. polyphaga*(trophozoite) > *C. albicans* > *F. solani* > *B. subtilis* (spore) > *A. polyphaga* (cyst)

ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ของ TiO_2 นั้นอาจลดลงได้จากการสะสมตัวของสิ่งเจือปนในตัวกลางนั้นๆ เช่น toluene, trichloroethylene, dimethylsulfide, trichloropropane หรือสารบางตัวเช่น S และ N ที่เกิดปฏิกิริยา photooxidation ได้ง่ายกลายเป็น inorganic form สะสมตัวอยู่บนพื้นผิวของ TiO_2 นั้น (Ollis, 2000) ในงานวิจัยของ Rincón and Pulgarin (2004) พบว่า HCO_3^- , HPO_4^{2-} ความเข้มข้น 0.2 mmol/L ขัดขวางประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำอย่างมากด้วยการเข้าแย่งทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ หรือไปเกาะติดบน active site ของ TiO_2 ขณะที่ Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ K^+ ที่ความเข้มข้นเดียวกันขัดขวางประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์เล็กน้อย ส่วน dihydroxy-benzenes isomers ที่เป็นสารอินทรีย์ตามธรรมชาติในน้ำส่งผลต่อประสิทธิภาพของ TiO_2 เช่นกัน โดย Coleman et al. (2005) ได้ทำการศึกษาในลักษณะเดียวกันและสนับสนุนว่า HCO_3^- จาก NaHCO_3 buffer เป็นตัวการในการรับประจุจาก h^+ ที่พื้นผิวของ TiO_2 กลายเป็น $\text{HCO}_3^{\cdot-}$ ขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่า TiO_2 Degussa P25 ความเข้มข้น 1 g/L ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* สูงสุด รองมาคือ hydrothermal catalyst ในความเข้มข้นเดียวกัน ส่วน magnetic photocatalyst ความเข้มข้น 2 g/L ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าสองชนิดแรก แต่เมื่อมีการเติม Ag ไปใน TiO_2 การกำจัด *E. coli* จะดีกว่าที่ไม่มี Ag ในส่วนของการกำจัดสารอินทรีย์ในอากาศภายในอาคาร พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มถึง 22000 ppmv ประสิทธิภาพในการกำจัด benzene, toluene, ethylbenzene และ o-xylene ลดลงเหลือ 2%, 15%, 28%, และ 35% จาก 27%, 67%, 76%, และ 80% ตามลำดับ (Li et al., 2005) ซึ่งผู้วิจัยสรุปว่าโมเลกุลของน้ำในปฏิกิริยา photocatalytic ของก๊าซนั้นจะไปแย่งเกาะติดบนพื้นผิวของ TiO_2 ทำให้การเกาะติดและทำลายของสารอินทรีย์ลดลง นอกจากนี้การมีก๊าซ NO ในระบบยังส่งผลต่อการลดลงของการทำลายสารอินทรีย์อีกด้วย ส่วนการกำจัด SO_2 ในอากาศ Ao and Lee (2004) พบว่า SO_2 ถูกกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 77% เป็น 80% เมื่อความชื้นเพิ่มจาก 2100 ppmv ไปเป็น 22000 ppmv เนื่องจากสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็น SO_4^{2-} บนแผ่นกรองใยแก้วได้โดยง่าย ทั้งนี้ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในบรรยากาศนั้นขึ้นกับสภาพแวดล้อมเป็นสำคัญ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 25-30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70% และความเร็วลมที่น้อยกว่า 1 m/s จะพบความเข้มข้นเชื้อราสูงที่สุด (Lin and Li, 2000) ขณะที่ แบคทีเรียมันเจริญได้ดีในความชื้นสูงๆและจะมีการลดปริมาณลงภายใน 1 ชั่วโมงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 30-60% (Maus et al., 1997)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการนี้มีระยะเวลาในการวิจัย 2 ปี ในปีแรกเป็นการพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงโดยการเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2 แล้วฉายด้วยแสง UV-A เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของแผ่นกรองดังกล่าวใน chamber ทดลองในห้องปฏิบัติการ ข้อบกพร่องของการทดสอบในแต่ละครั้งถูกนำไปปรับปรุงเปลี่ยนแปลงวิธีการเคลือบ รวมถึงวิธีการสร้างรูปแบบในการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นกรองจนกระทั่งได้สภาวะที่ดีที่สุด โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศใน chamber ทดลอง กำหนดไว้ที่ 25°C และ $45\pm 5\%$ ตามลำดับ ส่วนในปีที่ 2 เป็นการทดสอบตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นกรอง ได้แก่ อิทธิพลของความชื้น และไอระเหยของ toluene และ xylene ที่อยู่ในกลุ่มของ VOCs ที่มีผลต่อการกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส รวมถึงมีการนำไปทดสอบจริงในโรงพยาบาลด้วย

3.1 การเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2

การเคลือบแผ่นกรองในการศึกษานี้ใช้วิธี dip-coat ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นกรองนั้นถูกเคลือบไว้ด้วยสารกันน้ำจากโรงงานผู้ผลิต การเคลือบด้วย TiO_2 จึงไม่สามารถกระทำได้โดยตรง ในที่นี้จึงทดลองกำจัดสารกันน้ำด้วยวิธีต่างๆกัน ได้แก่ การเผาที่อุณหภูมิ 200°C , 300°C , 450°C และ 550°C การแช่ในตัวทำละลาย 95% ethyl alcohol, acetone, chloroform และ n-hexane นาน 10 นาที ก่อนล้างออกด้วยน้ำกลั่น การล้างด้วย 0.1% hydrogen fluoride และการล้างด้วย 0.08 M sodium dodecyl sulfate (SDS) 1 ครั้งและ 2 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงไว้ในหัวข้อ 4.1 โดยในที่นี้เลือกใช้การล้างแผ่นกรองด้วย SDS แล้วผึ่งให้แห้ง ก่อนจุ่มลงในสารละลาย TiO_2 (Degussa P-25) ความเข้มข้น 2% นาน 10 นาที ทิ้งให้แห้ง ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นกรองใส่ไว้ใน desiccator อย่างน้อย 12 ชั่วโมงก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก ปริมาณ TiO_2 loading บนแผ่นกรองทราบได้จากความแตกต่างของน้ำหนักของแผ่นกรองก่อนการเคลือบ กับน้ำหนักของแผ่นกรองหลังการเคลือบ (ที่ปรับอุณหภูมิและความชื้นในตู้ desiccator ทั้งก่อนเคลือบและหลังเคลือบแล้ว) น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคือปริมาณ TiO_2 บนแผ่นกรอง ซึ่งปริมาณ TiO_2 loading ในการศึกษานี้อยู่ที่ $3140\pm 67 \text{ mg/m}^2$

ลักษณะเส้นใยทั้งที่เคลือบและไม่ได้เคลือบสังเกตจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความดันลดของแผ่นกรองที่เกิดจากการเคลือบ TiO_2 โดยใช้ U-tube manometer วัดความแตกต่างของความดันที่ด้านหน้าแผ่นกรองเทียบกับที่ด้านหลังของแผ่นกรองเมื่อใช้ความเร็วลม (วัดที่ผิวหน้าแผ่นกรอง) 0.1, 0.3 และ 0.5 เมตร/วินาที และมีการศึกษาการหลุดร่วงของ TiO_2 ด้วยการใส่แผ่นกรองที่เคลือบแล้วใน chamber และเปิด blower ให้ดูดอากาศหมุนวนอยู่ภายในผ่านแผ่นกรองนาน 10 ชั่วโมงด้วยความเร็วลมหน้าแผ่นกรอง 0.3 เมตร/วินาที โดยไม่มีการเปิดไฟหรือฟั่นเชื้อจุลินทรีย์ น้ำหนักของ TiO_2 บนแผ่นกรองที่หายไปหลังจากถูกเป่าอากาศเทียบกับน้ำหนักก่อนเป่าอากาศคือ ปริมาณของ TiO_2 ที่หลุดร่วงออกไป

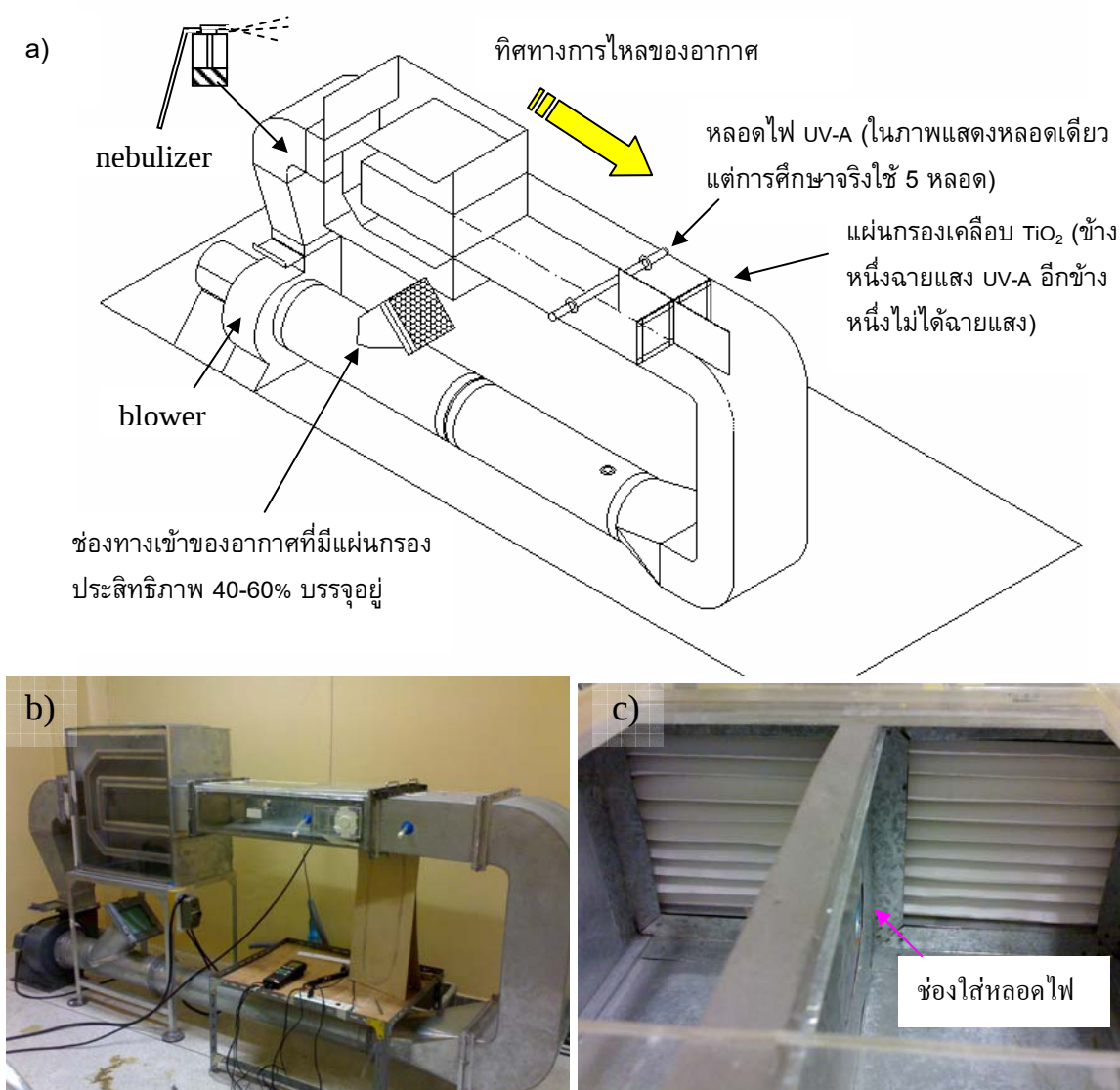
หลังจากทดสอบลักษณะสมบัติของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2 ดังวิธีที่กล่าวไปแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงเป็นการทดสอบความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์ใน chamber โดยแผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 ที่ใช้มีการนำไปฆ่าเชื้อด้วยแสง UV-C นาน 10 นาทีก่อนนำมาใช้ในการทดลองทุกครั้ง

3.2 Chamber ทดลอง

Chamber ที่ใช้ในการทดลองมีการออกแบบให้อากาศหมุนวนอยู่ภายในอยู่ตลอดเวลาด้วยแรงดูดจาก blower โดยช่องทางเข้าของอากาศทางด้านล่างมีแผ่นกรองประสิทธิภาพ 40-60% บรรจุอยู่เพื่อกรองอนุภาคที่อาจติดเข้ามากับกระแสอากาศ การพ่นจุลินทรีย์เข้าไปใน chamber กระทำโดยใช้ nebulizer (BGI, Incorp., model MRE-CN 25) ที่ต่อเข้ากับเครื่อง compressor ที่อยู่ต้นทางของกระแส (รูปที่ 1) ความเร็วลมที่ผ่านแผ่นกรองนั้นกำหนดไว้ที่ 0.3 เมตร/นาที วัดที่หน้าแผ่นกรองด้วย hot wire anemometer (Airflow Developments Ltd., model TA5-Flexible probe) ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปสำหรับแผ่นกรอง HEPA filter ในโรงพยาบาล จุลินทรีย์หลังจากถูกพ่นออกมาจาก nebulizer นั้นถูกทำให้แห้งในระหว่างที่ไหลไปตามส่วนที่วกไปมาก่อนเข้าสู่แผ่นกรองด้วยลมจาก blower ทั้งนี้ก่อนหน้าแผ่นกรอง มีหลอดไฟ UV-A ขนาด 36 W (Sylvania F36W-T8/BLB) จำนวน 5 หลอดวางห่างจากแผ่นกรองประมาณ 10 เซนติเมตร ความเข้มแสงวัดด้วย radiometer (Cole Palmer, model LW09811-50) ที่ผิวหน้าแผ่นกรองอยู่ที่ $4.85 \pm 0.09 \text{ mW/cm}^2$ เมื่อจุลินทรีย์ในกระแสอากาศไหลมาถึงส่วนของแผ่นกรอง กระแสอากาศได้ถูกแบ่งออกเป็นสองสาย สายแรกนั้นเข้าสู่ส่วนควบคุมที่ไม่มีการฉายแสง UV-A บนแผ่นกรอง (หลอดไฟถูกหุ้มไว้ด้วยท่อพลาสติก PVC) ขณะที่สายที่สองไหลเข้าสู่ส่วนทดลองที่มีแสง UV-A ฉายบนแผ่นกรอง

การทดสอบการรั่วของ chamber กระทำโดยหยดน้ำฟองสบู่ที่บริเวณรอยต่อหรือตะเข็บของ chamber เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของฟองสบู่ ในส่วนของการทดสอบการรั่วรอบๆแผ่นกรองอากาศภายใน chamber ได้มีการพ่นสารละลายไอโอดีนที่มีสีน้ำตาลแดงด้วย nebulizer แล้วใช้สำลี swab ผึ่งของ chamber ทั้งส่วนด้านหน้าแผ่นกรอง และด้านหลังแผ่นกรอง ตลอดจนแนวตะเข็บด้านข้างเพื่อตรวจสอบการรั่วของอากาศ ซึ่งก็ไม่พบการรั่วแต่อย่างใด

ในส่วนของการป้องกันการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์และการหลุดลอดออกนอก chamber ของเชื้อจุลินทรีย์ กระทำโดยติดหลอดไฟ UV-C ที่ด้านในของ chamber และเปิดฆ่าเชื้อก่อนการทดลองและหลังการทดลองเสร็จสิ้นทุกครั้ง



รูปที่ 1 Chamber ทดลอง a) diagram, b) chamber ใช้งานจริง, c) กระแสอากาศที่แบ่งเป็นสองสาย

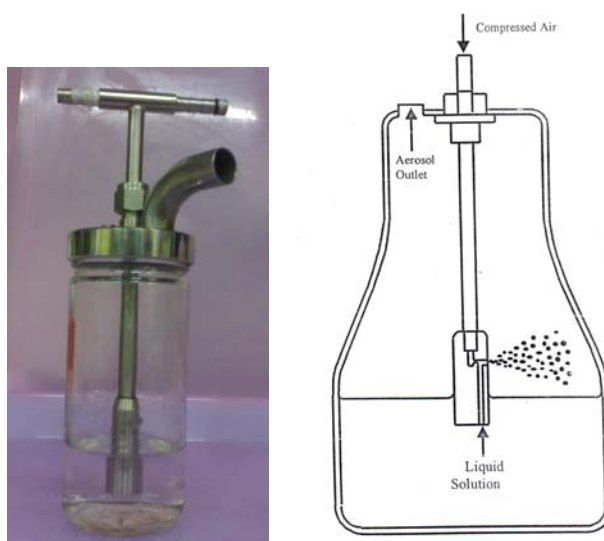
3.3 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่แบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* (TISTR 518) และ *Bacillus subtilis* (TISTR 687) และเชื้อรา *Aspergillus niger* (TISTR 3012) และ *Penicillium citrinum* (TISTR 3437) ซึ่งเป็นชนิดที่พบมากที่สุดในห้องอันดับแรกจากการสำรวจข้อมูลของอากาศในโรงพยาบาลขนาดใหญ่ (การดี ช่วยบำรุงและคณะ, 2548) โดยเชื้อเหล่านี้จัดซื้อจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยในรูปของผงแห้ง ขั้นตอนการเตรียมเชื้อแบคทีเรียทำโดยนำเชื้อแบคทีเรียมาผสมกับน้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อให้เข้ากันดี แล้วใช้ปิเปตหยดเชื้อมา 1 หยดลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Blood agar สำหรับ *Staphylococcus epidermidis* เกลี่ยให้ทั่ว แล้วนำไปบ่มเพาะเชื้อที่ 35-37°C นาน 1 วัน หรือในกรณีที่เป็น *Bacillus subtilis* ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Trypticase Soy Agar (TSA) แล้วนำไปบ่มเพาะเชื้อที่ 37°C นาน 7 วัน

โคโลนีของ *Staphylococcus epidermidis* ที่ขึ้นใหม่จากการเพาะเชื้อ หลังจากถูกเจือจางด้วยน้ำกลั่นปราศจากเชื้อให้มีความเข้มข้น 10^4 - 10^7 cfu/mL แล้ว สามารถนำไปใส่ขวด nebulizer เพื่อใช้พ่นใน chamber ได้เลย แต่โคโลนีของ *Bacillus subtilis* หลังจากเจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้ว ต้องนำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนที่ 80°C นาน 10 นาทีเพื่อกำจัด vegetative cell ให้เหลือแต่สปอร์ก่อน โดยนำสปอร์ที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายไปปั่นด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็ว 2000 รอบ/นาทีนาน 5 นาที จากนั้นจึงถ่ายสปอร์ไปผสมกับน้ำกลั่นปราศจากเชื้อให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10^4 - 10^7 cfu/mL ก่อนนำไปใส่ในขวด nebulizer ได้ (Lin and Li, 2003; Vohra et al., 2006)

ในส่วนของการเพาะเชื้อ หลังจากผสมผงเชื้อราแห้งกับน้ำกลั่นปราศจากเชื้อให้เข้ากันดีแล้ว จึงหยดสารละลายลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Sabouraud Dextrose Agar (SDA) เกลี่ยให้ทั่ว แล้วนำไปอบเพาะเชื้อ โดย *Penicillium citrinum* เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 25°C นาน 7 วัน จากนั้นจึงแยกสปอร์ที่ได้ นำไปผสมกับน้ำกลั่นและนำไปปั่นด้วยเครื่อง centrifuge ความเร็ว 2000 รอบ/นาทีนาน 5 นาที ก่อนจะนำเฉพาะสปอร์ไปผสมกับน้ำกลั่นปราศจากเชื้อให้มีความเข้มข้น 10^4 - 10^7 cfu/mL (Lin and Li, 2003) เพื่อนำไปใช้พ่นเชื้อด้วย nebulizer ได้ ส่วน *Aspergillus niger* หลังจากหยดสารละลายลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อและเกลี่ยให้ทั่วแล้ว นำไปอบเพาะเชื้อที่ 37°C จนกว่า mycelia ขึ้นจนเต็มเพลท (ใช้เวลาประมาณ 3 วัน) จากนั้นจึงแยกสปอร์ไปผสมกับน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10^4 - 10^7 cfu/mL เพื่อนำไปใช้พ่นใน chamber ด้วย nebulizer เช่นกัน (Vohra et al., 2006)

เชื้อจุลินทรีย์ใน nebulizer (รูปที่ 2) ถูกพ่นออกมาใน chamber ด้วยการใช้ compressor อัดอากาศเข้าไปในช่องทางเข้าของ nebulizer ด้วยแรงดัน 20-30 psig ความดันดังกล่าวจะสร้างแรงสุญญากาศขึ้นที่ส่วนปลายของ nebulizer ที่จมอยู่ในสารละลายที่มีจุลินทรีย์อยู่ทำให้ดูดสารละลายขึ้นมาตามท่อได้ และสารละลายนั้นถูกทำให้เป็นละอองฝอยจากอากาศที่อัดเข้าไป โดยละอองฝอยจุลินทรีย์ที่พ่นออกมาใน chamber ถูกทำให้แห้งได้ด้วยลมจาก blower ในระหว่างที่ไหลวกไปมาก่อนเข้าสู่ส่วนของแผ่นกรองอากาศดังที่กล่าวไปแล้ว



รูปที่ 2 Nebulizer สำหรับพ่นจุลินทรีย์

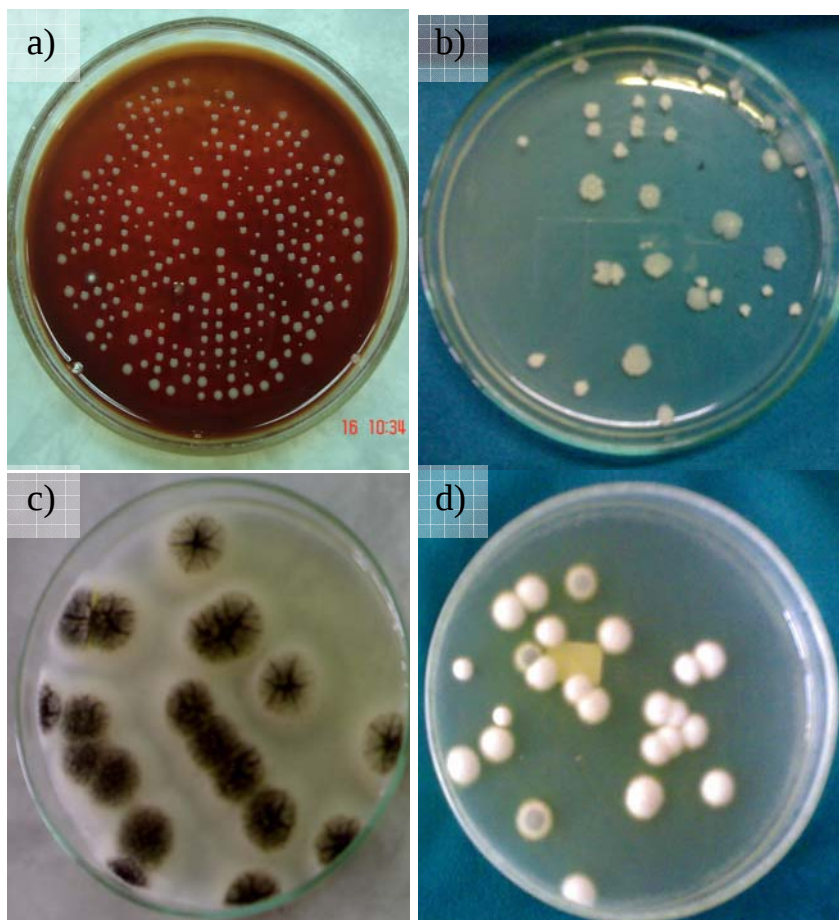
3.4 การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

การศึกษาเริ่มจากการฟุ้งจุลินทรีย์ที่ละชนิดใน chamber นาน 20 นาที ซึ่งระหว่างนั้น blower มีการดูดอากาศให้ไหลวนอยู่ภายใน อากาศที่มีจุลินทรีย์ปนอยู่ด้วยจึงไหลผ่านแผ่นกรองอยู่ตลอดเวลา เมื่อครบ 20 นาทีจึงปิด nebulizer และ blower แล้วซักแผ่นกรองทั้งคู่ออกมาสกัดหาจำนวนจุลินทรีย์ตั้งต้นที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรองตามวิธีของ Wang et al. (2001) ซึ่งทำโดยตัดแผ่นกรองเป็นชิ้นเล็กๆลงในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่อง vortex นาน 2 นาที ตามด้วยการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง sonicator นาน 15 นาที ก่อนจะใช้ปิเปตดูดสารละลาย 0.1 มิลลิลิตรมาเกลี่ยบนอาหารเลี้ยงเชื้อ SDA สำหรับเชื้อรา และ blood agar สำหรับแบคทีเรีย (รูปที่ 3) อาหารเลี้ยงเชื้อที่ได้นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37°C นาน 18-24 ชั่วโมงสำหรับแบคทีเรีย และนาน 24-36 ชั่วโมงสำหรับ *A. niger* ส่วน *P. citrinum* เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 25°C นาน 36-48 ชั่วโมง จากนั้นนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏ (รูปที่ 4) แล้วคูณด้วยค่า dilution factor ที่ทำการเจือจาง โดยอุปกรณ์ทุกชิ้นมีการฆ่าเชื้อโรคแล้วทุกครั้งเพื่อป้องกันการปนเปื้อน

หลังจากที่มีการดึงแผ่นกรองเพื่อนำไปสกัดหาจำนวนจุลินทรีย์ตั้งต้นที่มีอยู่บนแผ่นกรองแล้วต่อไปเป็นการศึกษาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนแผ่นกรอง การศึกษาเริ่มจากการเปลี่ยนแผ่นกรองชุดใหม่แล้วทำการฟุ้งเชื้อพร้อมเปิด blower ในลักษณะเดียวกับที่ศึกษาจุลินทรีย์ตั้งต้นทุกประการ โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในขวด nebulizer ยังคงเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ฟุ้งเชื้อตั้งต้น เมื่อฟุ้งเชื้อจนครบ 20 นาทีแล้วจึงเปิดไฟ UV-A ให้ส่องบนแผ่นกรองนาน 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจึงดึงแผ่นกรองออกไปสกัดหาจำนวนจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่บนแผ่นกรองอีกครั้งหนึ่ง จำนวนจุลินทรีย์ที่ลดลงไปจากจำนวนตั้งต้นแสดงถึงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองนั้น โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างด้านที่ไม่มีการเปิดไฟ UV-A กับด้านที่มีการเปิดไฟ และศึกษาระยะเวลาการเปิดไฟที่ต่างกันออกไปคือ นาน 3, 4, 5, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองเริ่มจากการเปลี่ยนแผ่นกรองเป็นชุดใหม่และฟุ้งเชื้อจุลินทรีย์ใหม่ทุกครั้ง และเมื่อครบระยะเวลาของการเปิดไฟตามที่กำหนดแล้ว จึงนำแผ่นกรองไปสกัดหาจำนวนจุลินทรีย์ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ดังรายละเอียดตามที่ได้กล่าวไป



รูปที่ 3 ขั้นตอนการสกัดเชื้อจุลินทรีย์ออกจากแผ่นกรอง HEPA filter



รูปที่ 4 จุลินทรีย์ที่สกัดได้จากแผ่นกรอง HEPA filter a) *Staphylococcus epidermidis*, b) *Bacillus subtilis*, c) *Aspergillus niger*, d) *Penicillium citrinum*

3.5 การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ในส่วนของตัวแปรที่ศึกษาในปีที่ 2 ประกอบไปด้วยความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มจาก $45 \pm 5\%$ ไปเป็น $75 \pm 5\%$ โดยใช้เครื่อง ultrasonic humidifier (Microfrog, model T10) เป็นตัวพ่นละอองไอน้ำให้มีความชื้นตามต้องการ ซึ่งอุณหภูมิยังคงกำหนดไว้ที่ 25°C เช่นเดิม การตรวจสอบระดับความชื้นกระทำโดยใช้เครื่องมือ digital hygrometer (Testo, model 400) วัดความชื้นที่หน้าแผ่นกรอง ซึ่งในการทดลองได้รอจนความชื้นอยู่ในระดับที่ต้องการจนคงที่แล้ว จึงเริ่มทำการทดลองซ้ำใหม่ถึงประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงอิทธิพลของสารอินทรีย์ระเหยหลักในกลุ่มของ VOCs ได้แก่ toluene และ xylene ที่มีต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สารละลาย toluene และ xylene บรรจุในขวด nebulizer ชนิดละขวด แล้วใช้ compressure อัดอากาศด้วยความดัน 2.5-3 psi สำหรับ toluene และ 1 psi สำหรับ xylene ได้เป็นไอระเหยของ toluene 100 ppm และไอระเหยของ xylene 50 ppm ซึ่งตรวจสอบความเข้มข้นโดยใช้ VOCs analyzer (Miran, model 1-BX) ทั้งนี้ความเข้มข้นที่ใช้ดังกล่าวกำหนดจากค่า Threshold limit values (TLVs) สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมง ซึ่ง ACGIH/NIOSH/OSHA กำหนดค่า TLVs สำหรับ xylene ชนิด o, p, m-isomers ไว้ที่ 100 ppm ส่วน toluene นั้น NIOSH กำหนดไว้ที่ 100 ppm ขณะที่ OSHA กำหนดที่ 200 ppm ในที่นี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้น toluene ที่ 100

ppm เพื่อความปลอดภัยในการศึกษาทดลอง จากนั้นจึงทดสอบความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนแผ่นกรองในการกำจัดจุลินทรีย์ในกรณีที่มี toluene หรือ xylene อยู่ร่วมด้วย (ใช้การปน toluene และ xylene พร้อมๆกัน โดยบรรจุแยกกันชนิดละขวด) ตามวิธีที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น

3.6 การศึกษาในโรงพยาบาล

นอกจากการศึกษาอิทธิพลของความชื้นและสารอินทรีย์ระเหยง่ายในห้องปฏิบัติการแล้ว ในปี 2562 ยังได้มีการนำแผ่นกรองอากาศชนิดประสิทธิภาพสูงที่เคลือบ TiO_2 ไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาล โดยจัดทำในรูปของเครื่องฟอกอากาศที่ภายในมีแผ่นกรองอากาศเคลือบ TiO_2 (loading 3140 mg/m^2) และใช้หลอดไฟ Sylvania F18W-T8/BLB จำนวน 4 หลอดวางห่างจากแผ่นกรองประมาณ 3 เซนติเมตร วัดความเข้มแสงบนแผ่นกรองได้ $3.18 \pm 0.75 \text{ mW/cm}^2$ (รูปที่ 5) โดยเครื่องฟอกอากาศมีอัตราการดูดอากาศ 270 ลูกบาศก์ฟุต/นาที่ (วัดจากความเร็วลมที่ช่องทางเข้าของอากาศแล้วคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดช่องทางเข้าของเครื่องฟอกอากาศ)



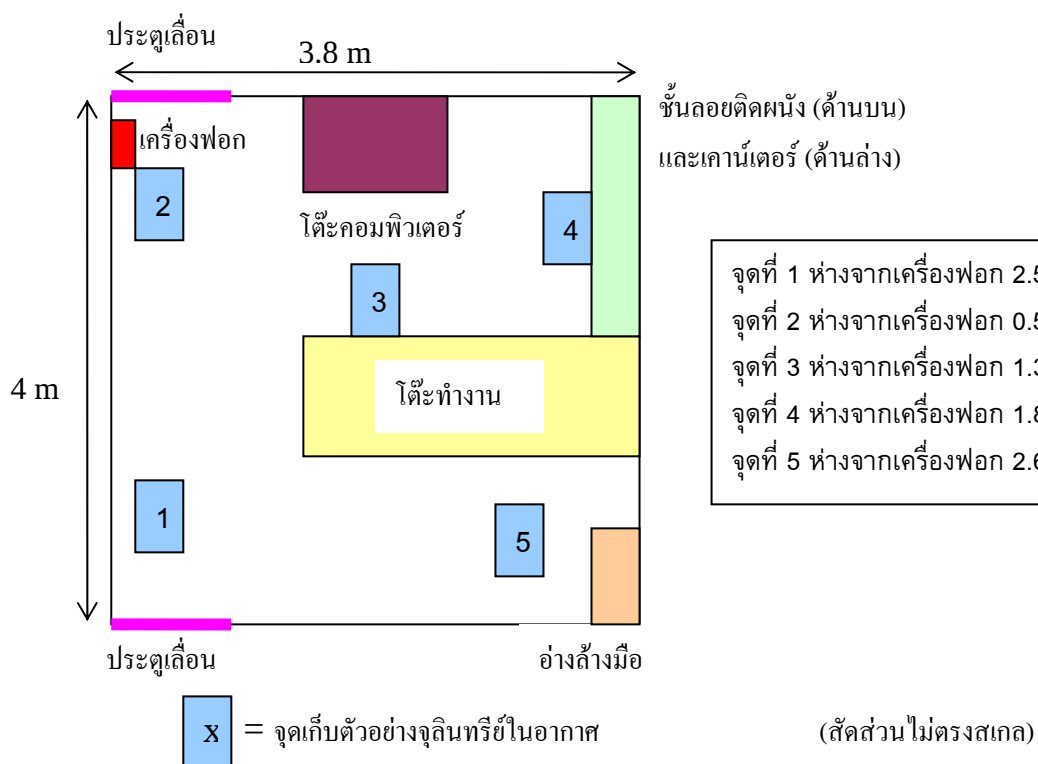
รูปที่ 5 เครื่องฟอกอากาศที่ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

การทดสอบการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของเครื่องฟอกอากาศที่มีแผ่นกรองโฟโตคะตะไลซิสบรรจุอยู่ กระทำโดยเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องของหน่วยจุลชีววิทยาคลินิกจำนวน 3 ห้อง และหน่วยไตและไตเทียมจำนวน 2 ห้องของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ (ขนาด 770 เตียง) โดยทุกห้องใช้ระบบการปรับอากาศแบบรวม (central air unit) นอกจากนี้ยังมีการเก็บตัวอย่างที่หน่วยทันตกรรมของวิทยาลัยการสาธารณสุขแห่งหนึ่งซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศแบบติดผนังจำนวน 1 เครื่อง ภายในห้องมีเก้าอี้ทำฟัน 7 ตัว โดยในช่วงเวลาราชการ (8.30-16.30 น.) จะเปิดให้บริการ 5 ตัว โดยใช้ผ้ามาปกกันส่วนที่ไม่ได้เปิดให้บริการไว้ ในช่วงนอกเวลาราชการ (16.30-19.30 น.) จึงจะเปิดให้บริการทั้งหมด ในแต่ละห้องนั้นเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3-5 จุด ให้มีการกระจายจุดเก็บตัวอย่างให้ทั่วห้องและเป็นตัวแทนจุลินทรีย์ในอากาศให้มากที่สุด โดยเก็บที่ระดับความสูงประมาณ 1.5 เมตร ด้วยเครื่องมือ single-stage impactor (SKC Inc., model Standard Biostage)(รูปที่ 6) ที่ภายในบรรจุอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy

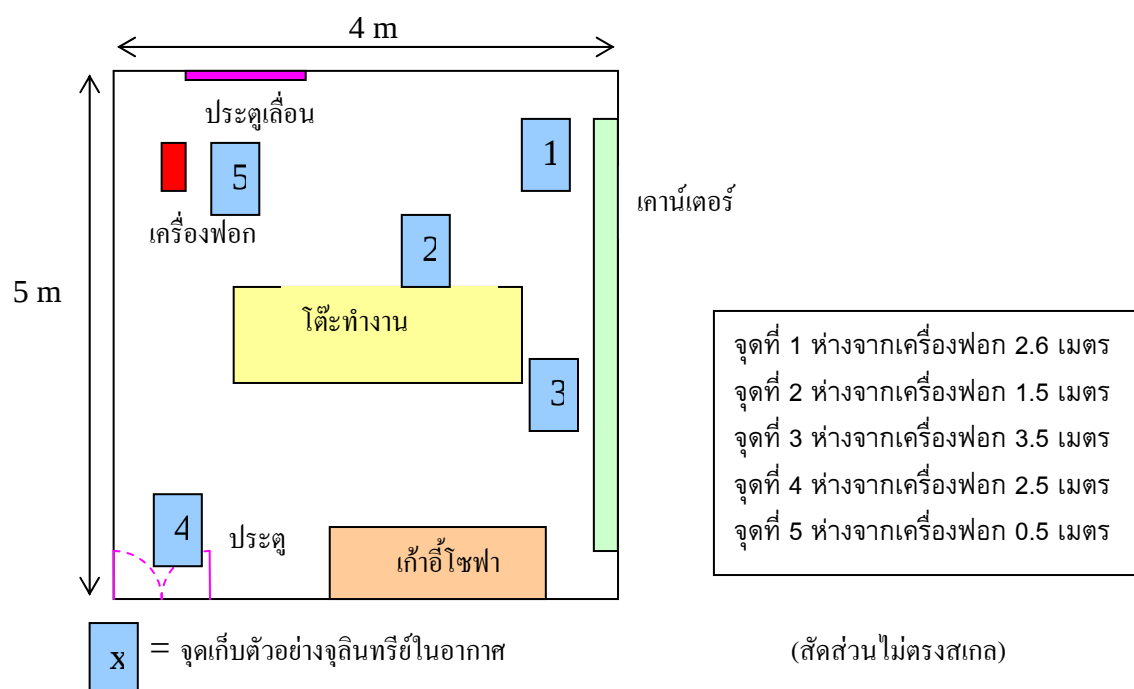
Agar (TSA) สำหรับแบคทีเรีย และอาหารเลี้ยงเชื้อ Saubouraud Dextrose Agar (SDA) สำหรับเชื้อรา ใช้อัตราการดูดอากาศ 28.3 ลิตร/นาที่ นาน 3 นาทีในแต่ละจุด โดยเริ่มต้นเป็นการเก็บตัวอย่างอากาศภายในห้องที่ยังไม่มีการเปิดเครื่องฟอกอากาศนาน 90 นาที จากนั้นจึงเปิดเครื่องฟอกอากาศและเก็บตัวอย่างอากาศนาน 120 นาที และทำการปิดเครื่องฟอกอากาศแล้วเก็บตัวอย่างต่อไปอีก 120 นาทีเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของจำนวนจุลินทรีย์ก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระหว่างเปิดเครื่องฟอกอากาศ และหลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศ โดยทั้งหมดนี้เก็บตัวอย่างต่อเนื่องกันไปโดยไม่มีการเว้นระยะพัก เพื่อให้เป็นตัวแทนของอากาศภายในช่วงเวลาเดียวกัน (ทั้งหมดประมาณ 5-6 ชั่วโมง) เมื่อเสร็จสิ้นการเก็บตัวอย่าง อาหารเลี้ยงเชื้อถูกนำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 ± 1 °C นาน 24 ชั่วโมงสำหรับแบคทีเรียและนาน 48 ชั่วโมงสำหรับเชื้อรา จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียและเชื้อรานั้นถูกนับรวมเป็นจำนวนทั้งหมดโดยไม่มีการแยกชนิดของเชื้อ ซึ่งจำนวนโคโลนีหารด้วยปริมาตรอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องมือจะอยู่ในหน่วยของ cfu (colony forming unit)/m³ ของอากาศ ทั้งนี้หน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลนั้นมีทั้งหมด 3 ห้อง คือห้องเตรียมอาหาร ห้องล้างอุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการ ลักษณะองค์ประกอบภายในห้องพร้อมจุดที่เก็บตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 7-9 ส่วนหน่วยไตและไตเทียมนั้นเก็บตัวอย่างที่ห้องฟอกไตผู้ป่วย (รูปที่ 10) และห้องชำระล้าง (รูปที่ 11) หน่วยทันตกรรมนั้นแสดงในรูปที่ 12



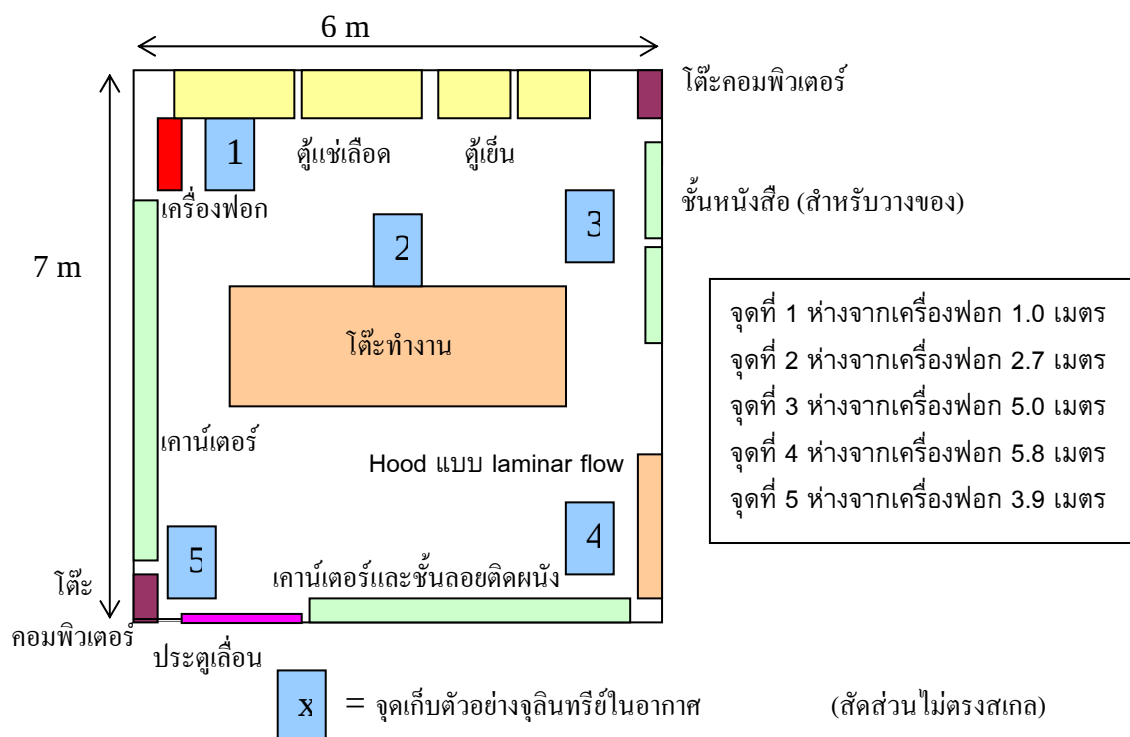
รูปที่ 6 Single-stage impactor และปั๊มเก็บตัวอย่าง (SKC, Inc, 2009)



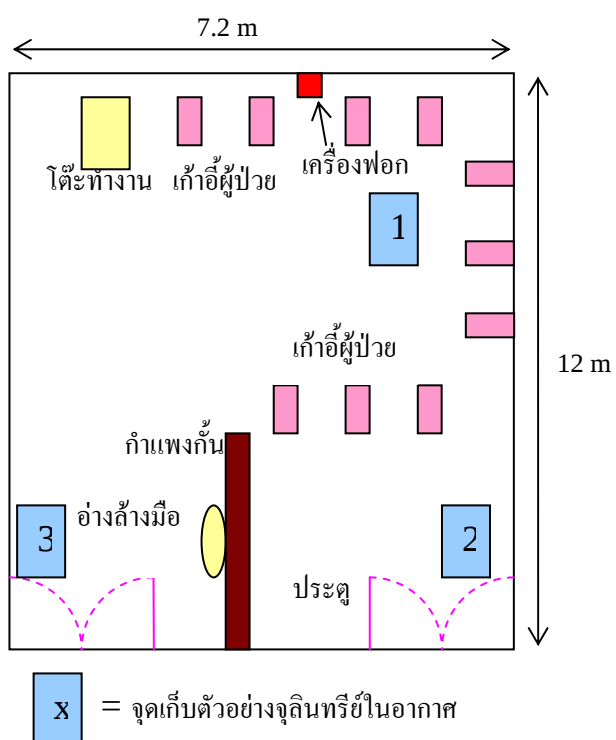
รูปที่ 7 การเก็บตัวอย่างในห้องเตรียมอาหาร หน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์



รูปที่ 8 การเก็บตัวอย่างในห้องล้างอุปกรณ์หน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์



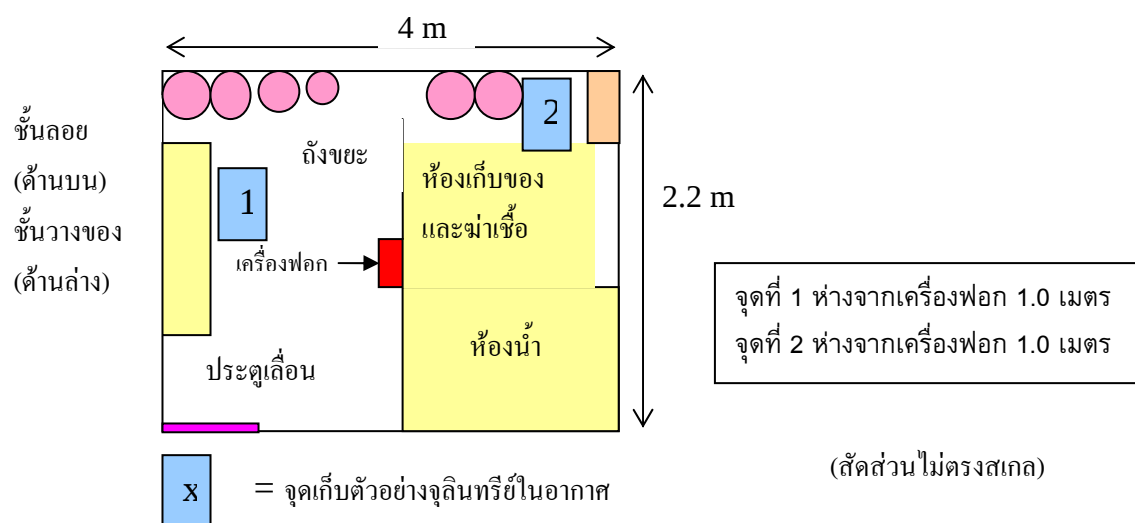
รูปที่ 9 การเก็บตัวอย่างในห้องปฏิบัติการหน่วยจุลชีววิทยาคลินิกของโรงพยาบาลศรีนครินทร์



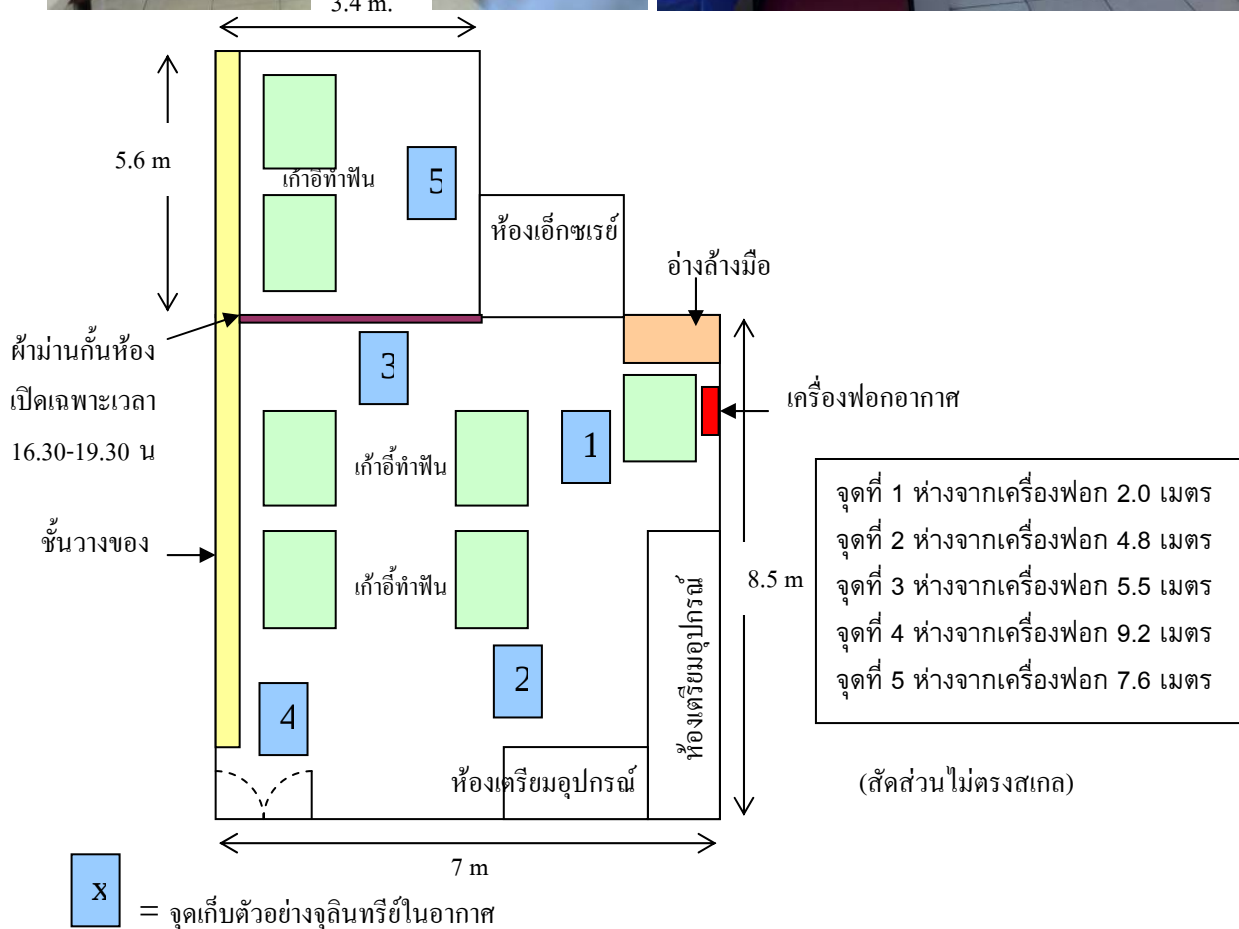
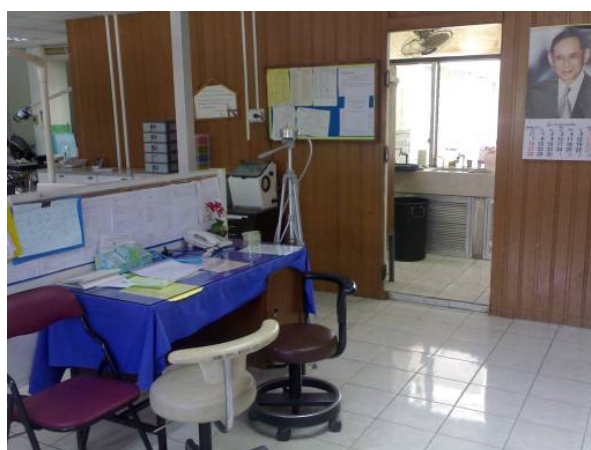
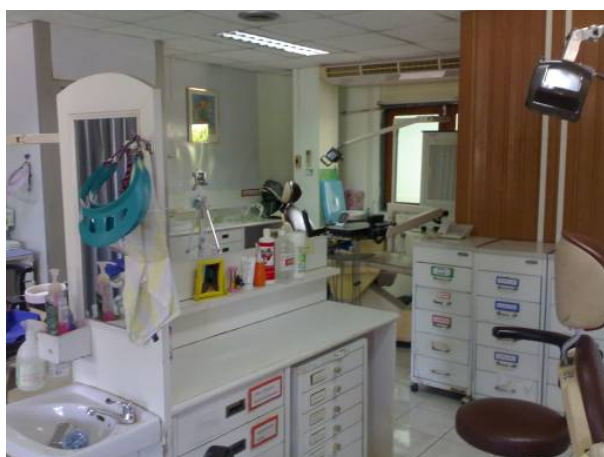
จุดที่ 1 ห่างจากเครื่องฟอก 2.0 เมตร
จุดที่ 2 ห่างจากเครื่องฟอก 6.5 เมตร
จุดที่ 3 ห่างจากเครื่องฟอก 8.0 เมตร

(สัดส่วนไม่ตรงสเกล)

รูปที่ 10 การเก็บตัวอย่างในห้องฟอกไตของหน่วยไตและไตเทียมโรงพยาบาลศรีนครินทร์

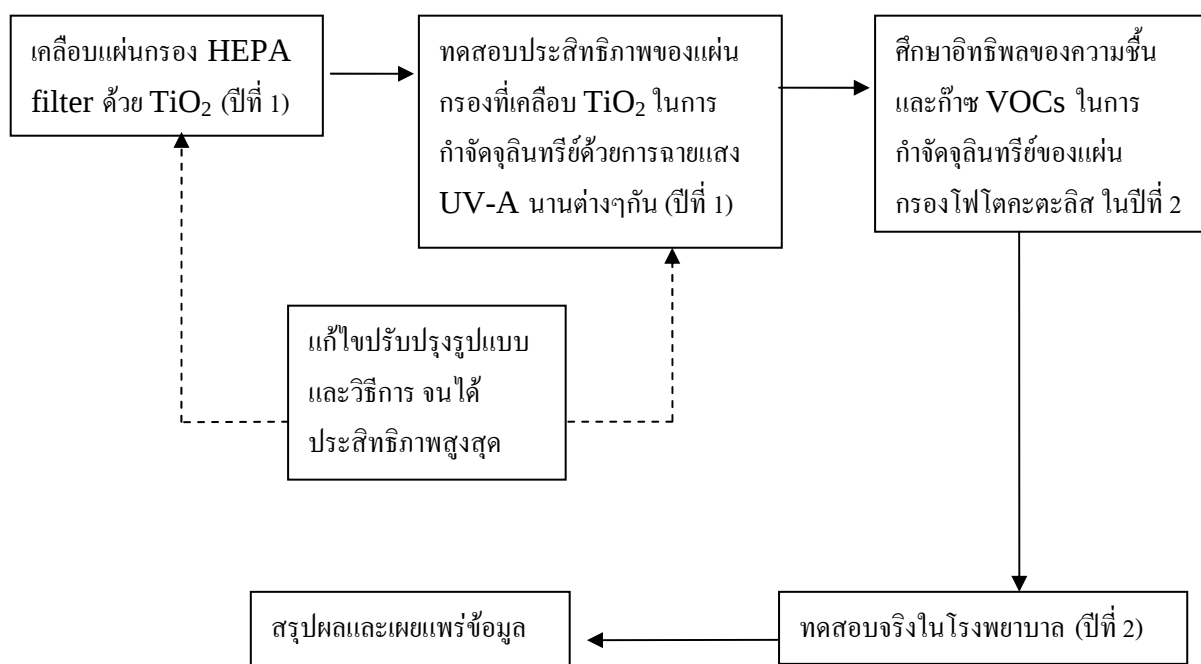


รูปที่ 11 การเก็บตัวอย่างในห้องชำระล้างของหน่วยไตและไตเทียมโรงพยาบาลศรีนครินทร์



รูปที่ 12 การเก็บตัวอย่างในห้องทันตกรรม

โดยในภาพรวมของการศึกษาวิจัย สามารถสรุปลำดับขั้นตอนการวิจัยได้ดังรูปที่ 13 ดังนี้



รูปที่ 13 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาลด้วยนาโนเทคโนโลยี ได้แบ่งเป็นหัวข้อต่างๆตามวัตถุประสงค์และวิธีการศึกษา ซึ่งได้แก่ การเคลือบ TiO_2 ที่เหมาะสม การกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ปัจจัยด้านความชื้นและสารอินทรีย์ระเหยง่าย toluene และ xylene ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองโฟโตคะตะไลซิส ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 แผ่นกรองเคลือบ TiO_2

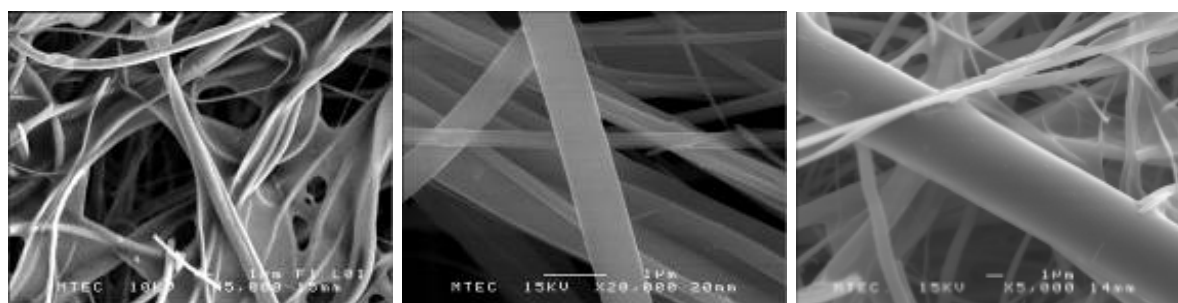
การทดลองกำจัดสารกันน้ำที่เคลือบบนแผ่นกรอง HEPA filter จากกรรมวิธีการผลิต ด้วยการแช่ในตัวทำละลาย ethanol, methanol, n-hexane และ chloroform นาน 10 นาที ก่อนล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วอบให้แห้งที่ 120°C นาน 60 นาที ล้วนไม่สามารถกำจัดสารกันน้ำออกนอกแผ่นกรองได้ โดยเมื่อจุ่มแผ่นกรองที่ผ่านกรรมวิธีดังกล่าวลงในสารละลาย TiO_2 สารละลายไม่สามารถเกาะติดบนผิวของแผ่นกรอง เฉพาะกรณีที่แผ่นกรองนั้นยังคงเปียกอยู่ แล้วนำมาจุ่มในสารละลาย TiO_2 ทันทีโดยไม่ต้องทำให้แห้งเสียก่อน สารละลาย TiO_2 จึงสามารถเกาะติดได้ แต่วิธีนี้จะไม่ทราบปริมาณ TiO_2 loading บนแผ่นกรอง เนื่องจากไม่สามารถทราบน้ำหนักที่แท้จริงของแผ่นกรองที่เปียกชุ่ม รวมถึงไม่สามารถควบคุมน้ำหนักแผ่นกรองให้คงที่เท่ากันทุกครั้งได้

การล้างด้วย hydrogen fluoride ความเข้มข้น 0.1% ก่อนจุ่มลงในสารละลาย TiO_2 ไม่ได้ช่วยในการเคลือบแผ่นกรองเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ วิธีที่ได้ผลดีคือ การล้างด้วย sodium dodecyl sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.08 M โดยจำนวนครั้งของการล้าง (1 ครั้ง หรือ 2 ครั้ง) มีผลต่อปริมาณ TiO_2 loading บนเส้นใย ส่วนการอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ $200-400^\circ\text{C}$ ไม่สามารถกำจัดสารกันน้ำบนแผ่นกรองได้ ทั้งยังทำให้แผ่นกรองนั้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอีกด้วย โดยการอบที่อุณหภูมิ 450°C นั้นกำจัดสารกันน้ำได้เป็นบางส่วนทำให้เคลือบ TiO_2 บนแผ่นกรองได้ แต่ยังคงพบปัญหาแผ่นกรองเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอยู่ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 550°C อบนาน 120 นาที ปัญหาดังกล่าวจึงจะหมดไปและใช้วิธีการเคลือบแบบ dip-coat ได้ ผลการทดลองของการล้างด้วย SDS และการอบที่ $450-550^\circ\text{C}$ และปริมาณ TiO_2 ที่ติดบนแผ่นกรองแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำจัดสารกันน้ำและปริมาณ TiO_2 ที่เคลือบได้จากวิธีต่างๆ

วิธีการกำจัดสารกันน้ำบนแผ่นกรอง	TiO_2 loading บนแผ่นกรอง (mg/m^2)
การล้างด้วย 0.08 M SDS - ล้าง 1 ครั้ง แล้วจุ่มในสารละลาย TiO_2 2% 10 นาที - ล้าง 2 ครั้ง แล้วจุ่มในสารละลาย TiO_2 2% 10 นาที	1870 $\pm$ 169 3140 $\pm$ 67
การอบที่อุณหภูมิ 450°C - อบ 30 นาที แล้วจุ่มในสารละลาย TiO_2 1% 10 นาที - อบ 60 นาที แล้วจุ่มในสารละลาย TiO_2 1% 10 นาที - อบ 120 นาที แล้วจุ่มในสารละลาย TiO_2 1% 10 นาที	3577 $\pm$ 143 4496 $\pm$ 287 4445 $\pm$ 252
การอบที่อุณหภูมิ 550°C นาน 120 นาที แล้วจุ่มในสารละลาย TiO_2 1% 10 นาที	4825 $\pm$ 681

เมื่อเทียบปริมาณ TiO_2 loading บนแผ่นกรองที่ได้จากวิธีการล้างด้วย 0.08 M SDS 2 ครั้งกับการอบที่อุณหภูมิ 550°C นาน 120 นาที พบว่า การอบแผ่นกรองที่ 550°C ก่อนจุ่มลงในสารละลาย TiO_2 ให้ผลของปริมาณ TiO_2 loading บนแผ่นกรองสูงกว่าการล้างด้วย 0.08 M SDS อย่างมีนัยสำคัญ ($p = 0.0001$) ทั้งๆที่ความเข้มข้นของ TiO_2 ที่ใช้ในวิธีการอบ น้อยกว่าในวิธีการล้างด้วยซ้ำ และเมื่อนำแผ่นกรองที่นำไปกำจัดสารกันน้ำด้วยวิธีทั้งสองไปส่องกล้อง scanning electron microscope พบว่าการอบที่ 550 °C สามารถกำจัดสารกันน้ำได้อย่างหมดสิ้นกว่าการล้าง (รูปที่ 14) แต่อย่างไรก็ตาม การล้างด้วย 0.08 M SDS นั้นให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานมากกว่า อีกทั้ง TiO_2 loading ในปริมาณสูงๆนั้นพบการหลุดล่อนออกจากแผ่นกรองได้ง่ายกว่า (รูปที่ 15) ในที่นี้จึงใช้การล้างแผ่นกรองด้วย 0.08 M SDS 2 ครั้งแล้วผึ่งให้แห้ง ก่อนจุ่มแผ่นกรองลงในสารละลาย TiO_2 ความเข้มข้น 2% นาน 10 นาที ซึ่งได้ปริมาณ TiO_2 loading บนแผ่นกรองเป็นจำนวน 3140 $\pm$ 67 mg/m^2 สำหรับใช้ในการทดลองทั้งหมด

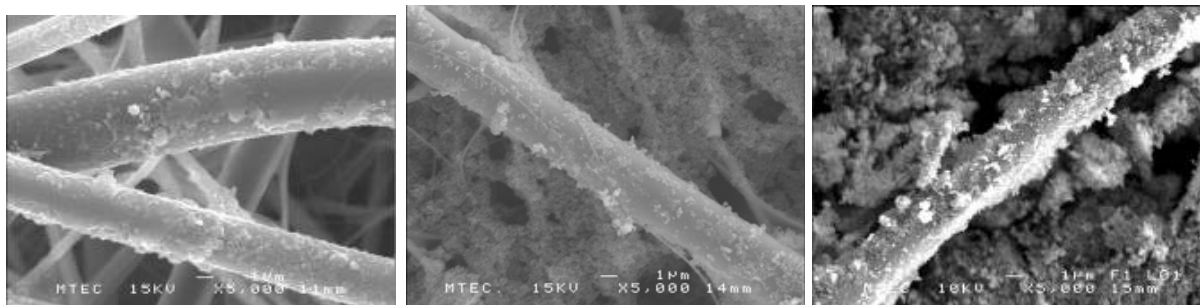


HEPA filter จากโรงงานผลิต

HEPA filter ที่อบที่ 550 °C

HEPA filter ที่ล้างด้วย SDS

รูปที่ 14 เส้นใย HEPA filter ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดและที่ผ่านการกำจัดสารกันน้ำ



ล้างด้วย 0.08 M SDS 1 ครั้ง

ล้างด้วย 0.08 M SDS 2 ครั้ง

อบที่ 550 °C 120 นาที่

รูปที่ 15 อนุภาค TiO_2 บนเส้นใย HEPA filter ที่ผ่านการกำจัดสารกันน้ำด้วยวิธีต่างๆ

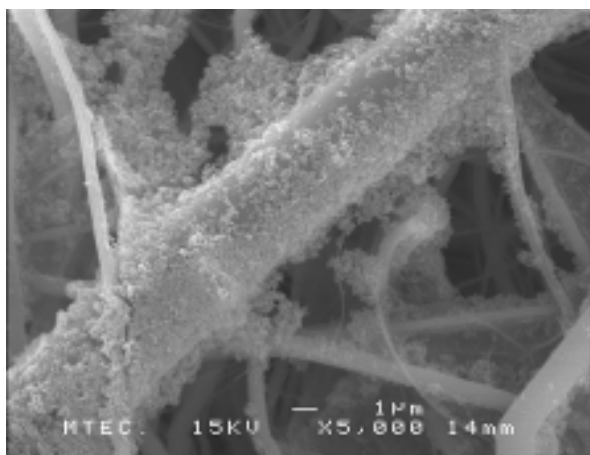
ทั้งนี้ แผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 loading $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$ เมื่อนำไปทดสอบความดันลดใน chamber วัดด้วย U-tube manometer ที่มีน้ำอยู่ภายใน สายข้างหนึ่งของ U-tube manometer อยู่ด้านหน้าแผ่นกรอง ส่วนอีกข้างหนึ่งอยู่ด้านหลังของแผ่นกรอง ใช้ความเร็วลม (วัดที่ผิวหน้าของแผ่นกรอง) 3 ระดับ คือ 0.1, 0.3 และ 0.5 เมตร/วินาที ระหว่างแผ่นกรองที่ไม่ได้เคลือบกับแผ่นกรองที่เคลือบทั้งด้านที่มีแสงและด้านที่ไม่มีแสง ทดสอบที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$ และ $75 \pm 5\%$ ผลปรากฏดังตารางที่ 2 ในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2 ความดันลด (นิ้วน้ำ) ของแผ่นกรองที่ความเร็วลมต่างกัน

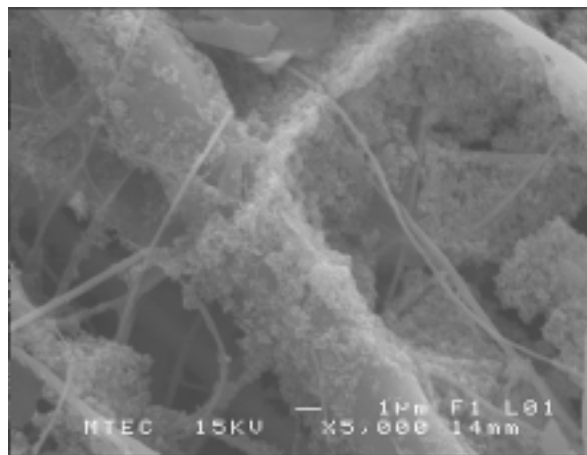
แผ่นกรอง	ความเร็วลม m/s	ความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$		ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 5\%$	
		ด้านที่ไม่มีแสง	ด้านที่มีแสง	ด้านที่ไม่มีแสง	ด้านที่มีแสง
ไม่ได้เคลือบ	0.1	1.00 ± 0.00	0.97 ± 0.06	1.17 ± 0.06	1.13 ± 0.06
	0.3	2.00 ± 0.10	2.00 ± 0.00	2.10 ± 0.00	2.13 ± 0.06
	0.5	2.97 ± 0.06	3.00 ± 0.00	3.10 ± 0.10	3.13 ± 0.06
เคลือบ TiO_2	0.1	1.00 ± 0.00	0.93 ± 0.06	1.27 ± 0.06	1.30 ± 0.00
	0.3	2.23 ± 0.00	2.20 ± 0.60	2.53 ± 0.06	2.50 ± 0.00
	0.5	3.23 ± 0.06	3.23 ± 0.06	3.35 ± 0.07	3.37 ± 0.06

การเคลือบ TiO_2 ทำให้ความดันลดของแผ่นกรองมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (สูงสุด 0.26 นิ้วน้ำ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$ และ 0.43 นิ้วน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 5\%$) โดยความเร็วลมยิ่งเพิ่ม ความดันลดก็จะเพิ่มตามไปด้วย และความชื้นสัมพัทธ์ที่มากขึ้นทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในแง่ของการหลุดร่วงของ TiO_2 ที่อาจเกิดขึ้นได้เมื่อผ่านระยะเวลาการใช้งานไปซักระยะหนึ่งนั้น ในการศึกษานี้ได้ทดลองให้ blower เป่าลมต่อเนื่องใน chamber ผ่านแผ่นกรองเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมงที่ระดับความเร็วลมหน้าแผ่นกรอง 0.3 เมตร/วินาที โดยชั่งน้ำหนักแผ่นกรองก่อนและหลังการทดลอง ผลปรากฏว่า น้ำหนักของ TiO_2 บนแผ่นกรองหลังเป่าลม 10 ชั่วโมงลดลงไป $103 \pm 2.41 \text{ mg/m}^2$ ในข้างที่ไม่มีการฉายแสง และลดลงไป $110 \pm 2.77 \text{ mg/m}^2$ ในข้างที่มีการฉายแสง หรือคิดเป็น 3.5% ของน้ำหนัก TiO_2 ตั้งต้น

($3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่น้อยมากจนถือได้ว่าไม่กระทบกับประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยภาพถ่ายของ TiO_2 ที่เคลือบบนเส้นใย HEPA filter จากกล้อง scanning electron microscope ของแผ่นกรองที่ผ่านการเป่าลมด้วย blower นั้นยังคงอยู่ในสภาพที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 16



แผ่นกรองในด้านที่ไม่มีแสง



แผ่นกรองในด้านที่มีแสง

รูปที่ 16 อนุภาค TiO_2 บนเส้นใย HEPA filter ที่ผ่านการเป่าลมนาน 10 ชั่วโมง

4.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

แผ่นกรอง HEPA filter ที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการเคลือบด้วย TiO_2 loading $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$ ฉายด้วยแสง UV-A ความเข้มแสง $4.85 \pm 0.09 \text{ mW/cm}^2$ มีความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียและเชื้อราที่ติดอยู่บนแผ่นกรอง ต่างจากแผ่นกรองที่ไม่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (ใช้แผ่นกรองเคลือบ TiO_2 เหมือนกัน แต่ไม่ได้ฉายแสง UV-A) อย่างเห็นได้ชัด (ตารางที่ 3 และ 4)

ตารางที่ 3 ร้อยละของการกำจัดแบคทีเรียบนแผ่นกรอง HEPA filter ที่เคลือบ TiO_2

เวลา (ชั่วโมง)	<i>Staphylococcus epidermidis</i>		<i>Bacillus subtilis</i>	
	ไม่มีแสง UV-A	มีแสง UV-A	ไม่มีแสง UV-A	มีแสง UV-A
0.5	28.8	89.8	-	-
1	36.4	96.2	7.1	43.3
1.5	44.7	97.6	-	-
2	39.0	100	-	-
3	48.2	100	9.9	61.0
4	43.3	100	7.6	64.9
5			15.6	78.7
6			20.7	79.3
8			21.6	82.9
10			23.7	86.8

ในกรณีของ *Staphylococcus epidermidis* การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในเวลา 2 ชั่วโมงสามารถกำจัดเชื้อดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ 100% ขณะที่ *Bacillus subtilis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สร้างสปอร์และมีความทนทานในสิ่งแวดล้อมสูงนั้น ไม่สามารถกำจัดสปอร์ได้อย่างสมบูรณ์ถึงแม้จะใช้เวลานานถึง 10 ชั่วโมงแล้วก็ตาม ซึ่งใกล้เคียงกับการกำจัดเชื้อราที่สร้างสปอร์เช่นเดียวกัน

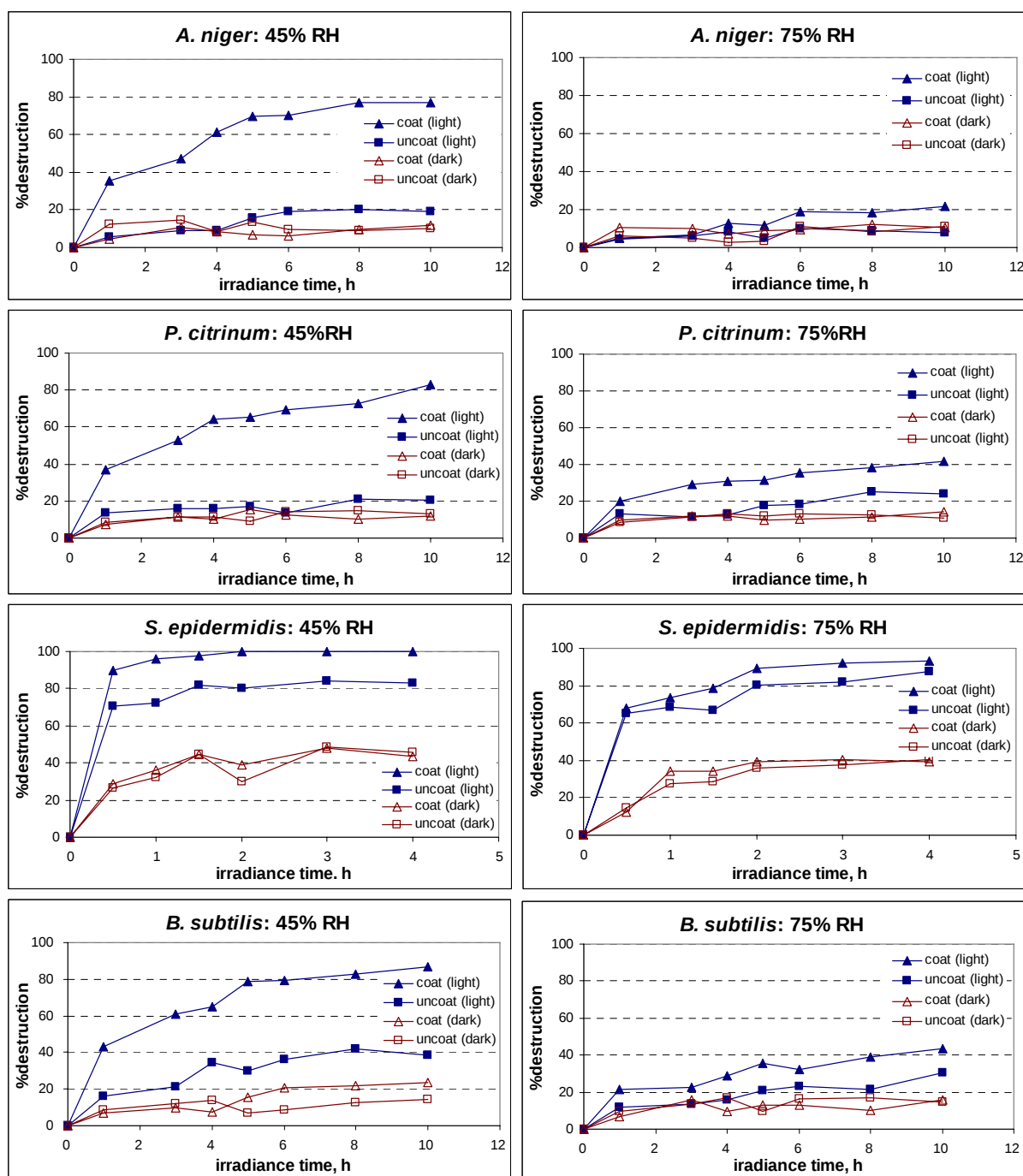
ตารางที่ 4 ร้อยละของการกำจัดเชื้อราบนแผ่นกรอง HEPA filter ที่เคลือบ TiO_2

เวลา (ชั่วโมง)	<i>Aspergillus niger</i>		<i>Penicillium citrinum</i>	
	ไม่มีแสง UV-A	มีแสง UV-A	ไม่มีแสง UV-A	มีแสง UV-A
1	4.3	35.3	7.4	37.0
3	10.4	47.1	11.4	52.8
4	8.3	61.4	10.0	64.4
5	6.6	69.4	15.4	65.4
6	6.2	70.1	12.5	69.4
8	9.6	77.0	10.4	72.7
10	11.6	77.1	12.0	82.7

4.3 ผลกระทบของความชื้น

ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจาก $45 \pm 5\%$ เป็น $75 \pm 5\%$ มีผลต่อความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองอากาศอย่างเห็นได้ชัด โดยในรูปที่ 17 แสดงเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการจัดจุลินทรีย์ที่ $45 \pm 5\%$ (ซ้ายมือ) กับการกำจัดจุลินทรีย์ที่ $75 \pm 5\%$ (ขวามือ) ทั้งนี้ ในรูปนั้นเส้นกราฟเส้นบนสุด (สัญลักษณ์ ▲) เป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยแผ่นกรองนั้นเคลือบ TiO_2 แล้วฉายแสงด้วยไฟ UV-A ส่วนเส้นที่สอง (สัญลักษณ์ ■) เป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองที่ไม่ได้เคลือบ TiO_2 แต่ฉายแสงด้วย UV-A หรือเกิดปฏิกิริยา photolysis ซึ่งจุลินทรีย์นั้นถูกกำจัดจากการฉายแสงอย่างเดียว ขณะที่เส้นที่สาม (สัญลักษณ์ △) เป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 แต่ไม่ได้ฉายแสงด้วย UV-A และเส้นสุดท้าย (สัญลักษณ์ □) เป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองที่ไม่ได้เคลือบ TiO_2 และไม่ได้ฉายแสงด้วย UV-A ซึ่งจะเห็นได้ว่า เฉพาะปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเท่านั้นที่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มความชื้น ขณะที่ปฏิกิริยา photolysis (ฉายแสงอย่างเดียว ไม่มีการเคลือบ) และแผ่นกรองที่ไม่มีการฉายแสง (ทั้งที่เคลือบและไม่ได้เคลือบ) แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย ซึ่ง Goswami et al. (1997) รายงานไว้เช่นกันว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% การกำจัด *Serratia marcescens* เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลาประมาณ 13 ชั่วโมง แต่ถ้าความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 85% พบว่าจุลินทรีย์ดังกล่าวยังคงหลงเหลือรอดชีวิตอยู่ 10% โดยเป็นไปได้ว่าความชื้นสูงๆนั้นอาจจะเหนียวน้ำให้ออกประกอบภายในเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงจนทำให้กำจัดได้ยากกว่าปกติ หรือโมเลกุลของน้ำไปเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของ TiO_2 จนทำให้เหลือพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์สัมผัสได้น้อยลง ซึ่ง Li et al. (2005) ก็อธิบายปรากฏการณ์ในทำนองเดียวกันว่า ถึงแม้ว่าโมเลกุลของน้ำจะช่วยในการสร้าง hydroxyl radical ในการ

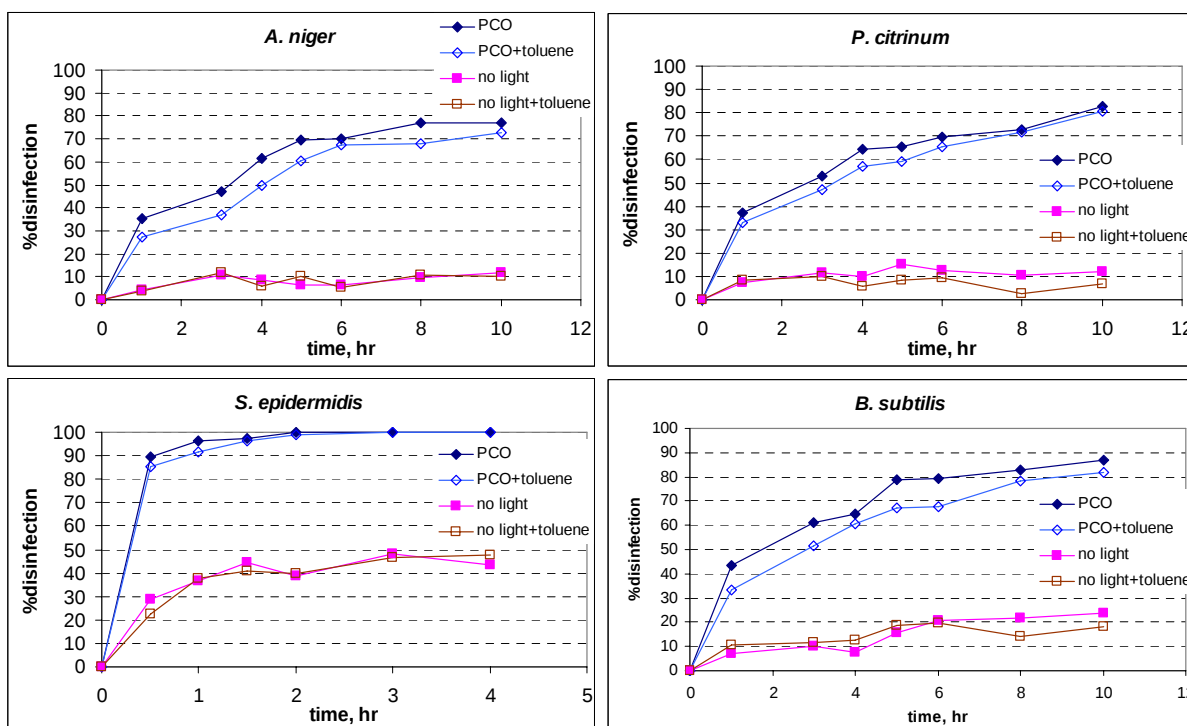
เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่เมื่อถึงจุดๆหนึ่ง จำนวน hydroxyl radical นั้นจะคงที่และไม่เพิ่มจำนวนอีกต่อไปถึงแม้ว่าจะเพิ่มโมเลกุลของน้ำอีกเท่าใดก็ตาม



รูปที่ 17 ผลของความชื้นต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรอง

4.4 ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

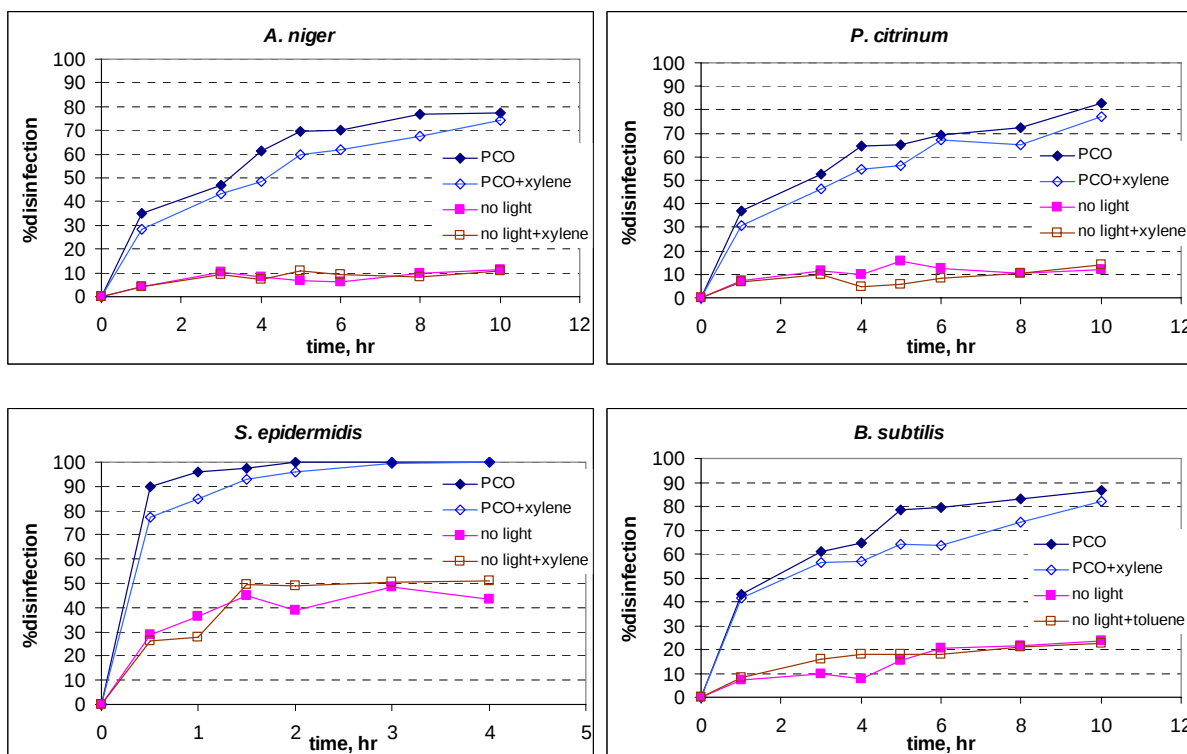
ไอระเหยของ toluene ทำให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ทุกชนิดของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลงประมาณ 0.8-11.8% (รูปที่ 18) แต่ความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.662$ สำหรับ *A. niger*, $p = 0.636$ สำหรับ *P. citrinum*, $p = 0.533$ สำหรับ *S. epidermidis* และ $p = 0.353$ สำหรับ *B. subtilis*) โดยในรูปที่แสดงนั้นเป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (PCO) เปรียบเทียบกับสถานะที่มี toluene 100 ppm อยู่ร่วมด้วย (PCO+toluene) ขณะที่เส้นกราฟสองเส้นล่างนั้นเป็นความสามารถของแผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 ข้างที่ไม่มีการเปิดไฟ UV-A ในกรณีที่ไม่มี toluene และมี toluene ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองที่ไม่มีแสง UV-A ไม่ว่าจะไม่มีหรือมี toluene นั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน ($p = 0.980$ สำหรับ *A. niger*, $p = 0.116$ สำหรับ *P. citrinum*, $p = 0.662$ สำหรับ *S. epidermidis* และ $p = 0.768$ สำหรับ *B. subtilis*) แสดงว่าถึงแม้ว่า toluene นั้นเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่ที่ระดับความเข้มข้น 100 ppm ภายในเวลา 10 ชั่วโมง toluene นั้นไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆต่อจำนวนจุลินทรีย์ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 18 ผลของ toluene ต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2

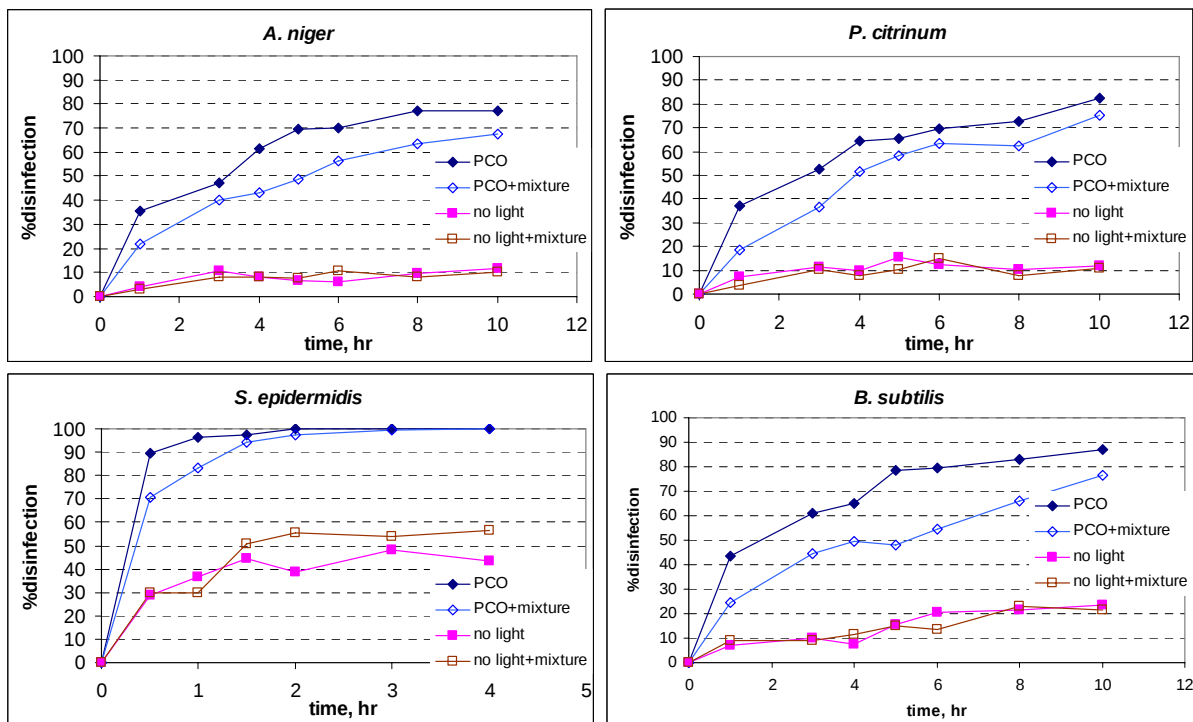
ในส่วนของไอระเหย xylene ความเข้มข้น 50 ppm ต่อการกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนแผ่นกรอง พบว่า xylene ทำให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ทุกชนิดลดลง 0.6-15.9% (รูปที่ 19) แต่เมื่อทดสอบทางสถิติ ผลปรากฏว่าการมี xylene (PCO+xylene) ไม่ได้ทำให้การกำจัดนั้นต่างจากสถานะปกติ (PCO อย่างเดียว) อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($p = 0.376$ สำหรับ *A. niger*, $p = 0.415$ สำหรับ *P. citrinum*, $p = 0.201$ สำหรับ *S. epidermidis* และ $p = 0.284$ สำหรับ *B. subtilis*) เช่นเดียวกับที่ xylene ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนจุลินทรีย์บนแผ่นกรองเคลือบ TiO_2 ที่ไม่มี

การฉายแสง UV-A ($p = 0.767$ สำหรับ *A. niger*, $p = 0.107$ สำหรับ *P. citrinum*, $p = 0.704$ สำหรับ *S. epidermidis* และ $p = 0.497$ สำหรับ *B. subtilis*)



รูปที่ 19 ผลของ xylene ต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการปนละอองของ toluene พร้อมกับ xylene เข้าไปใน chamber ความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์นั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ *Bacillus subtilis* ($p = 0.046$) (รูปที่ 20) แต่สำหรับจุลินทรีย์ที่เหลือ ความแตกต่างระหว่าง PCO กับ PCO+mixture ของ toluene และ xylene นั้นยังไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ($p = 0.126$ สำหรับ *A. niger*, $p = 0.244$ สำหรับ *P. citrinum* และ $p = 0.226$ สำหรับ *S. epidermidis*) ขณะที่แผ่นกรองที่ไม่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสซึ่งเป็นแผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 เหมือนกันแต่ไม่มีการฉายแสง UV-A นั้น ความแตกต่างระหว่างสภาวะปกติและสภาวะที่มี toluene+xylene ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติอย่างเห็นได้ชัด ($p = 0.893$ สำหรับ *A. niger*, $p = 0.258$ สำหรับ *P. citrinum*, $p = 0.327$ สำหรับ *S. epidermidis* และ $p = 0.862$ สำหรับ *B. subtilis*)

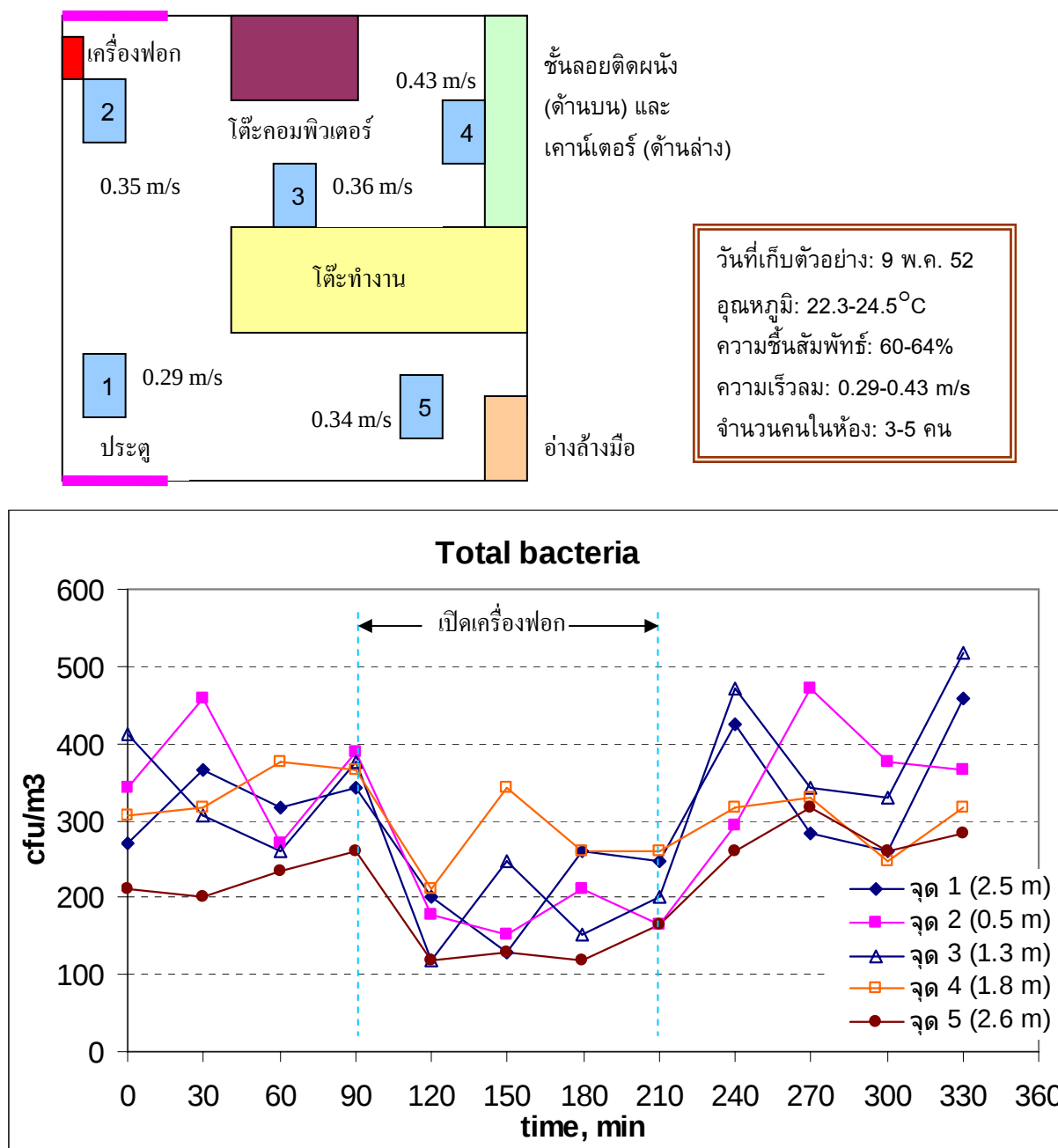


รูปที่ 20 ผลของ toluene และ xylene ในการกำจัดจุลินทรีย์ของแผ่นกรองเคลือบ TiO_2

4.5 การกำจัดจุลินทรีย์ในสภาวะจริงของโรงพยาบาล

1. หน่วยจุลชีววิทยาคลินิก

เมื่อนำเครื่องฟอกอากาศที่มีแผ่นกรองโฟโตคะตะลิสต์ไปทดสอบกับจุลินทรีย์ในอากาศของหน่วยจุลชีววิทยาคลินิก โรงพยาบาลศรีนครินทร์ จำนวน 3 ห้อง คือ ห้องเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ ห้องล้างอุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ที่มีระบบการปรับอากาศแบบรวม (central air) ผลปรากฏว่าในห้องเตรียมอาหารนั้น ทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศหลังเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้นในนาฬิกาที่ 90 จำนวนแบคทีเรียรวมลดจำนวนลงในนาฬิกาที่ 120 จากทุกจุดเก็บตัวอย่าง 41-69% (รูปที่ 21)



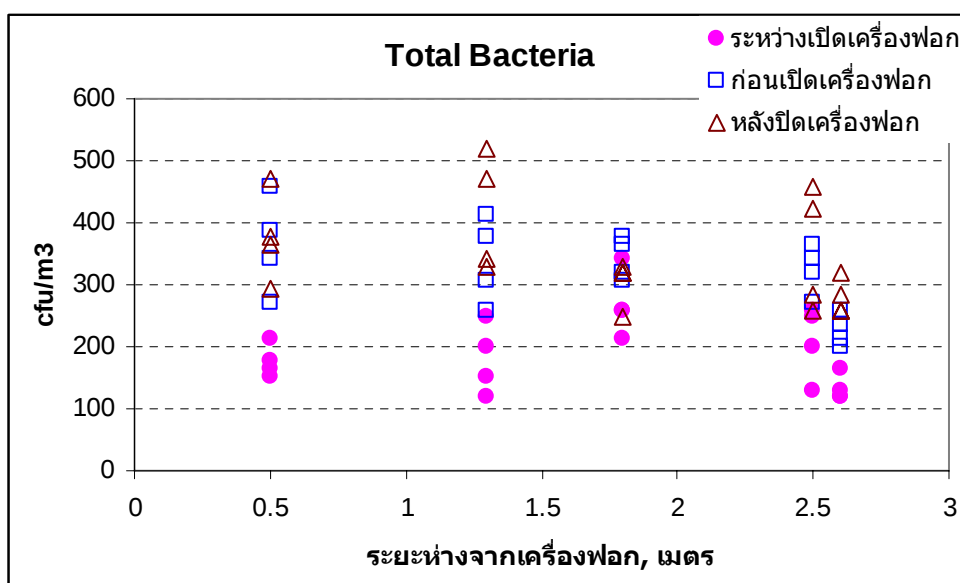
รูปที่ 21 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องเตรียมอาหาร ก่อน-ระหว่าง-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ

อย่างไรก็ตาม จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 4 พบจำนวนแบคทีเรียในนาที่ที่ 150 เพิ่มจากนาที่ที่ 120 โดยเมื่อเทียบกับนาที่ที่ 90 แล้วมีการลดลงเพียง 34% และ 6% โดยเฉพาะในจุดที่ 4 ทั้งนี้ เป็นไปได้ว่า จุดที่ 4 นั้นตรงกับช่องลมที่เป่าลมเข้ามาในห้อง (รูปที่ 22) ซึ่งอากาศที่เข้ามาใหม่นั้นอาจมีแบคทีเรียปนเปื้อนอยู่ จึงทำให้การเก็บตัวอย่างบริเวณดังกล่าวมีแบคทีเรียสูงขึ้นตามไปด้วย และอีกประการหนึ่ง ระหว่างการเก็บตัวอย่างนั้นมีเจ้าหน้าที่กำลังปฏิบัติงานอยู่ ณ ตำแหน่งดังกล่าว จึงเป็นไปได้อีกเช่นกันว่า จุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นมาตรงตำแหน่งของจุดที่ 3 และ 4 นั้นมาจากกิจกรรมภายในห้อง โดยในผังองค์ประกอบของห้องได้แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างเอาไว้ด้วย



รูปที่ 22 ช่องลมเหนือจุดเก็บตัวอย่างจุดที่ 4

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนแบคทีเรียรวมในช่วงที่เปิดเครื่องฟอกอากาศกับจำนวนในช่วงก่อนเปิดเครื่องฟอกและหลังปิดเครื่องฟอก พบว่า จำนวนนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p = 0.0001$) โดยระยะห่างใกล้-ไกลของจุดเก็บตัวอย่างกับตำแหน่งที่ตั้งเครื่องฟอกอากาศนั้นไม่แสดงความสัมพันธ์กัน (รูปที่ 23) แต่น่าจะสัมพันธ์กับจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่แล้ว ณ จุดนั้นๆ มากกว่า



รูปที่ 23 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องเตรียมอาหารเรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ

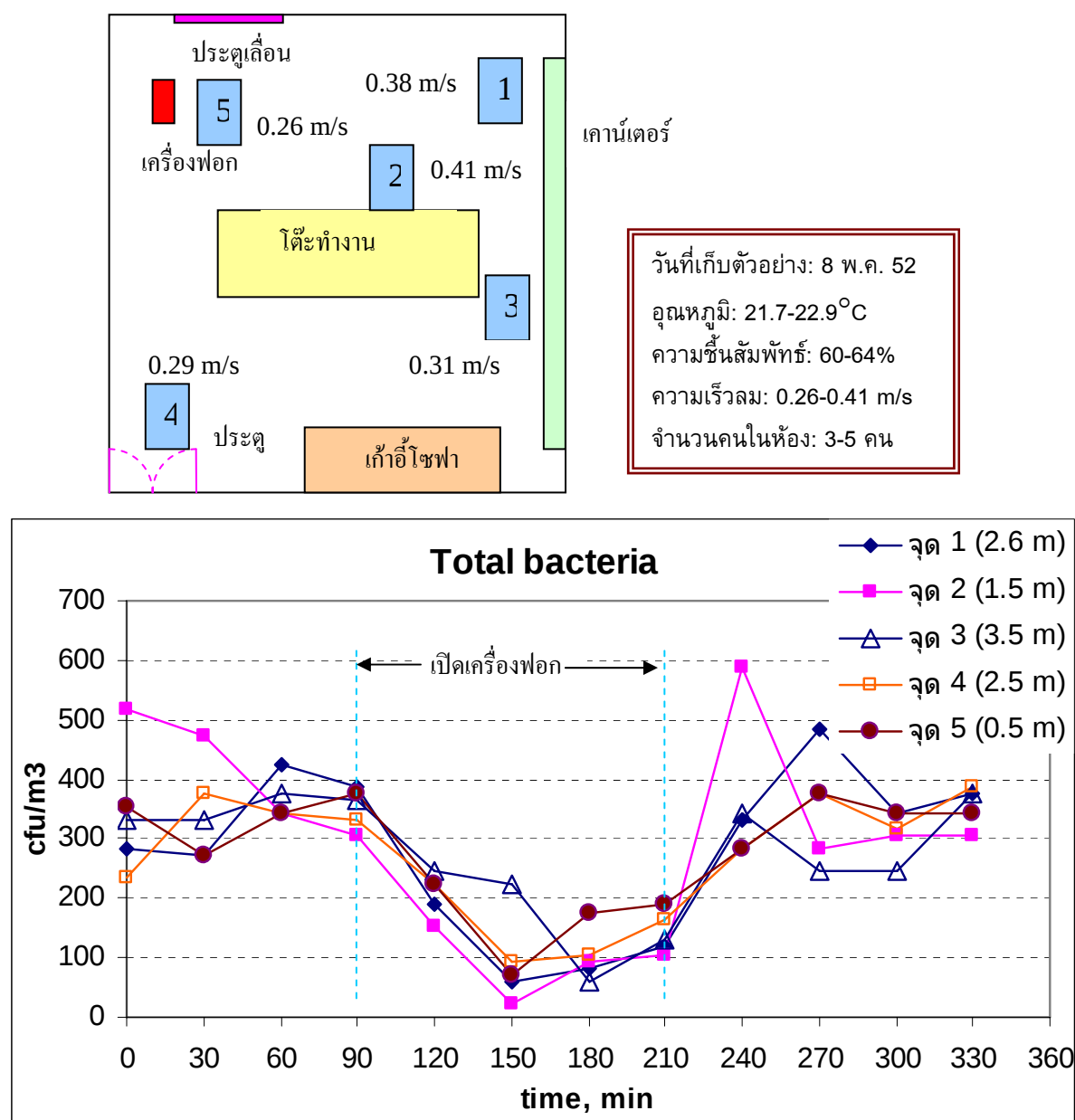
จากรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่า ระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศอยู่ จำนวนแบคทีเรียรวมที่ระยะห่าง 0.5 เมตรนั้นไม่ได้น้อยไปกว่าที่ระยะห่าง 2.6 เมตรเลย และการลดลงของแบคทีเรียก็สอดคล้องกับจำนวนแบคทีเรียตั้งต้นก่อนที่จะเปิดเครื่องฟอก โดยเมื่อปิดเครื่องฟอกแล้ว จำนวนของแบคทีเรียรวมก็กลับเข้าสู่สภาวะของก่อนเปิดเครื่องฟอกอีกด้วย แสดงว่าภายในรัศมี 2.6 เมตรที่ทำการเก็บตัวอย่างนี้ เครื่องฟอกอากาศเครื่องนี้สามารถลดจำนวนแบคทีเรียได้คล้ายกัน ส่วนจำนวนเชื้อราภายในห้องนั้น แสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยพบว่าเมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศหลังนาฬิกาที่ 90 จำนวนเชื้อรานั้นลดลงเป็นศูนย์ในทันที และยังคงเป็นศูนย์อยู่กระทั่งปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว ยกเว้นบางจุดเท่านั้นที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นมาใหม่หลังปิดเครื่องฟอกอากาศ อย่างไรก็ตาม ในจุดที่ 5 ที่เวลา 210 นาทีระหว่างการเปิดเครื่องฟอกนั้น พบเชื้อรา 1 โคโลนีบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ หรือคิดเป็นความเข้มข้นในอากาศได้ 11.8 cfu/m^3 ซึ่งจุดที่ 5 นั้นเป็นจุดที่อยู่ใกล้กับอ่างล้างมือและอยู่ไกลจากเครื่องฟอกอากาศมากที่สุด ซึ่งระหว่างเก็บตัวอย่างมีการปฏิบัติงานอยู่ด้วย อย่างไรก็ตาม จำนวนเชื้อราในอากาศที่เก็บตัวอย่างได้นั้นมีน้อยเกินไป จนยากที่จะสรุปได้ว่า จำนวนที่ไม่พบนั้นมาจากการทำงานของเครื่องฟอกอากาศหรือมาจากลักษณะของอากาศภายในห้องนั่นเอง

ตารางที่ 5 จำนวนเชื้อรา (cfu/m^3) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องเตรียมอาหาร

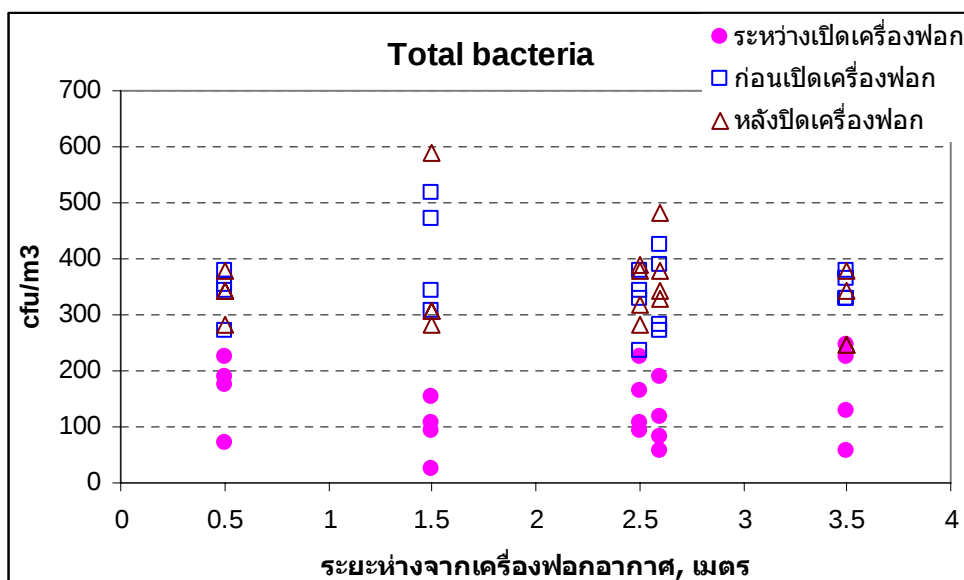
นาฬิกาที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
0	11.8	47.1	0	23.6	0
30	47.1	23.6	0	0	0
60	23.6	0	23.6	11.8	23.6
90	11.8	23.6	35.3	0	0
120	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	11.8
240	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0
300	0	0	23.6	0	0
330	0	0	11.8	0	0

สำหรับห้องล้างอุปกรณ์ของหน่วยจุลชีววิทยาคลินิก ทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศหลังนาฬิกาที่ 90 จำนวนแบคทีเรียรวมนั้นลดลงไป 32-52% ในนาฬิกาที่ 120 และในนาฬิกาที่ 150 จำนวนแบคทีเรียรวมนั้นลดลงไปถึง 71-92% ยกเว้นจุดที่ 3 ที่อยู่ห่างจากเครื่องฟอกอากาศมากที่สุด (3.5 เมตร) เท่านั้นที่ลดลงเพียง 39% (รูปที่ 24) แต่อย่างไรก็ตาม ในนาฬิกาที่ 180 จำนวนแบคทีเรียรวมในจุดที่ 3 นั้นลดลงจากนาฬิกาที่ 90 ไป 84% เช่นกัน และเมื่อปิดเครื่องฟอกอากาศหลังจากนาฬิกาที่ 210 ไปแล้ว จำนวนแบคทีเรียรวมในทุกจุดก็กลับมาเพิ่มจำนวนเช่นเดิม โดยเมื่อทดสอบทางสถิติ พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ในแต่ละจุดตั้งแต่นาฬิกาที่ 0 ไปจนถึง 330 นั้นมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p = 0.424$ ในช่วงก่อนเปิดเครื่อง, p

= 0.459 ช่วงระหว่างเปิดเครื่อง และ $p = 0.689$ หลังปิดเครื่องฟอกอากาศแล้ว) แสดงว่าภายในห้องล้างอุปกรณ์นี้ จำนวนแบคทีเรียรวมมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน และภายในระยะรัศมี 3.5 เมตร เครื่องฟอกอากาศเครื่องนี้ยังคงสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกัน ยืนยันได้จากจำนวนแบคทีเรียรวมที่พบจำแนกตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ (รูปที่ 25)



รูปที่ 24 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องล้างอุปกรณ์ ก่อน-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ



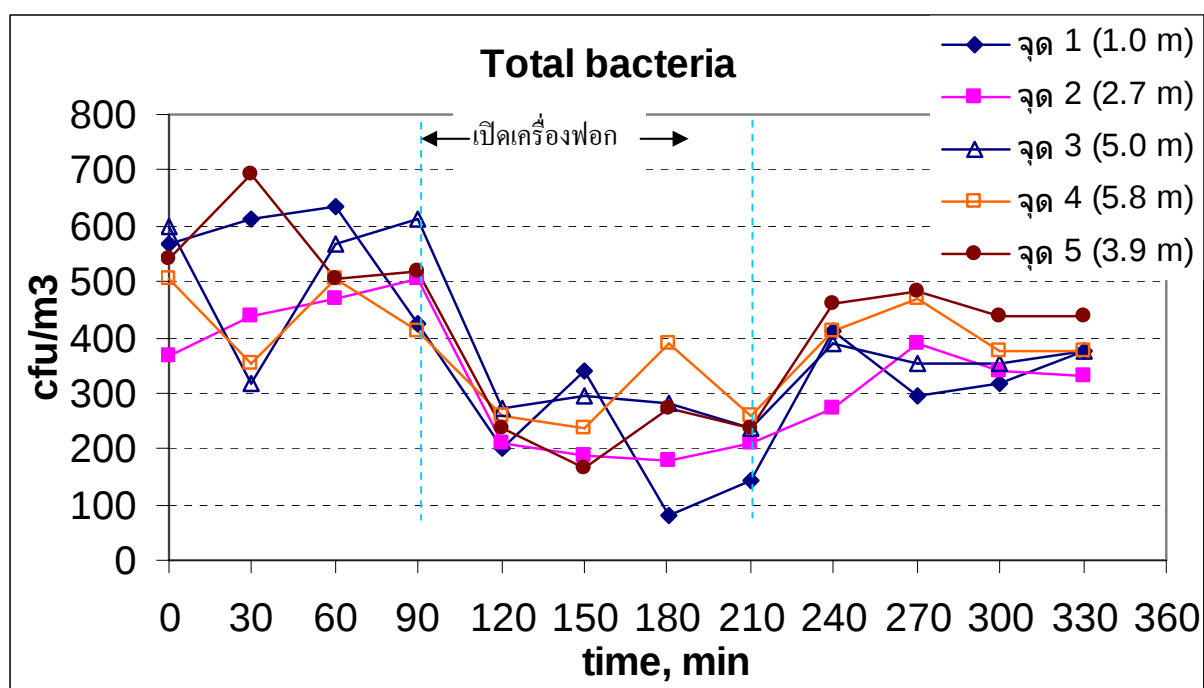
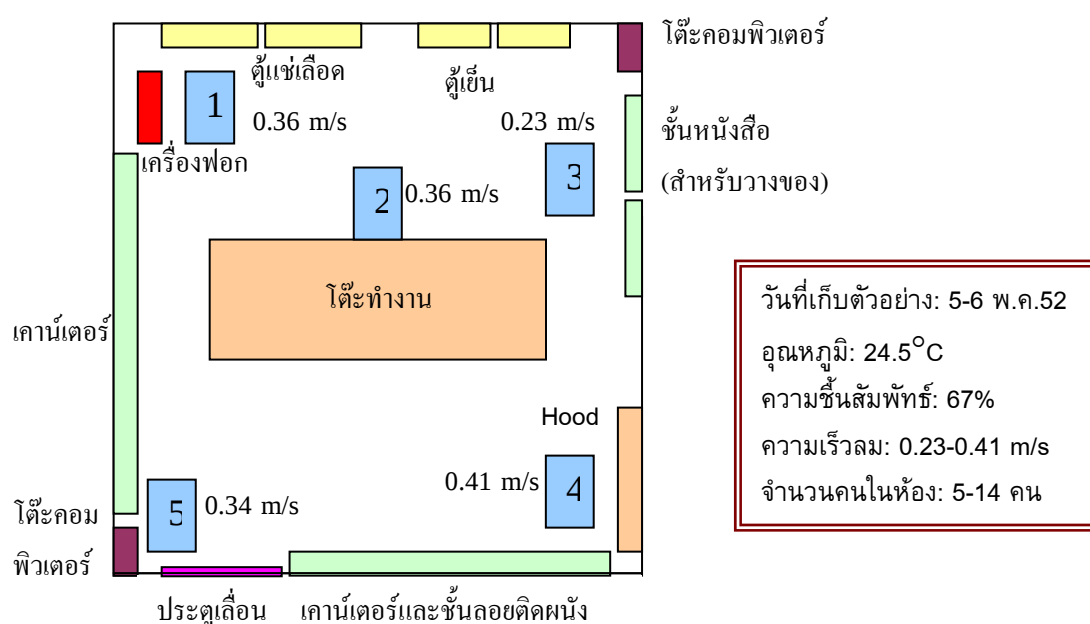
รูปที่ 25 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องล้างอุปกรณ์เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ

ในส่วนของเชื้อรา จำนวนตั้งต้นของเชื้อรารวมก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศพบได้ประมาณตั้งแต่ 1-5 โคโลนี และเมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 2, 3 และกระทั่งจุดที่ 5 ที่อยู่ใกล้เครื่องฟอกอากาศมากที่สุดก็ยังคงพบเชื้อราได้จุดละ 1 โคโลนี โดยเมื่อปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว ทุกจุดเก็บตัวอย่างยกเว้นจุดที่ 2 พบเชื้อราได้ 1-4 โคโลนี ซึ่งจำนวนต่อปริมาตรอากาศนั้นแสดงไว้ในตารางที่ 6 โดยจากผลการศึกษายากที่จะบอกได้ว่าเครื่องฟอกอากาศนั้นมีประสิทธิภาพในการทำงานมากน้อยเพียงใด เนื่องจากจำนวนเชื้อราในอากาศที่เก็บตัวอย่างได้นั้นมีน้อยจนเกินไป

ตารางที่ 6 จำนวนเชื้อรา (cfu/m³) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องล้างอุปกรณ์

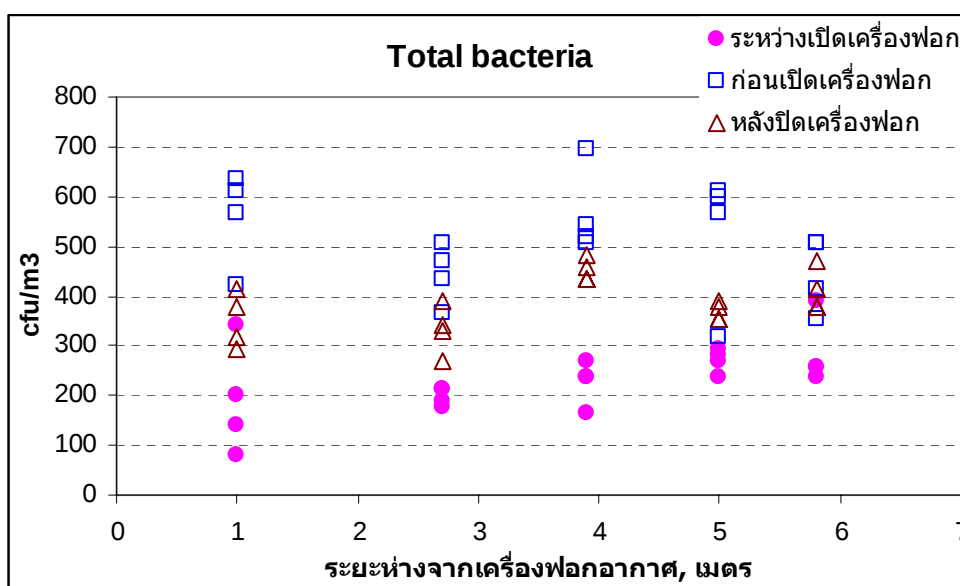
นาที่ที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
0	0	0	11.8	0	0
30	23.6	58.9	0	23.6	0
60	0	0	0	11.8	0
90	0	0	35.3	0	0
120	0	11.8	0	0	11.8
150	11.8	0	0	0	0
180	0	0	11.8	0	0
210	0	0	0	0	11.8
240	47.1	0	0	0	0
270	0	0	0	0	11.8
300	0	0	23.6	11.8	0
330	0	0	11.8	11.8	0

สำหรับห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา การเก็บตัวอย่างแบคทีเรียที่กระทำคนละวันกับการเก็บตัวอย่างเชื้อรา โดยแบคทีเรียรวมนั้นเก็บในวันที่ 5 พ.ศ. 2552 ตลอดเวลาที่ทำกรเก็บตัวอย่างทั้งสองวันมีการปรับปรุงซ่อมแซมเพดานห้อง ซึ่งจำนวนแบคทีเรียรวมที่พบในอากาศภายในห้องก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระหว่างเปิดเครื่องฟอกอากาศ และหลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 26 โดยเห็นได้ชัดเจนว่า ทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ จำนวนแบคทีเรียรวมนั้นลดลง 37-58% ในทันที และเมื่อปิดเครื่องฟอกอากาศแล้ว จำนวนแบคทีเรียนั้นก็เพิ่มจำนวนกลับขึ้นมาถึงแม้จะไม่เท่ากับจำนวนก่อนเปิดเครื่องก็ตาม โดยจำนวนแบคทีเรียในแต่ละช่วง (ก่อนเปิด-ระหว่างเปิด-หลังปิดเครื่องฟอกอากาศ) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p = 0.0001$)



รูปที่ 26 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ก่อน-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ

ในแง่ของจำนวนแบคทีเรียในแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง พบว่าในช่วงก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ทุกจุดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 233$) เช่นเดียวกับช่วงระหว่างการเปิดเครื่องฟอกที่จำนวนแบคทีเรียนั้นต่างกัน แต่ก็ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.181$) แต่หลังจากปิดเครื่องฟอกไปแล้วหลายๆจุดพบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อนำจำนวนแบคทีเรียรวมมาเรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ (รูปที่ 27) พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างจำนวนแบคทีเรียรวมในช่วงที่เปิดเครื่องฟอกอากาศกับระยะห่างจากเครื่องฟอก โดยค่า $R = 0.949$ กล่าวคือ ที่ระยะห่าง 5.8 เมตร จำนวนแบคทีเรียมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากจำนวนที่ระยะห่าง 1 เมตร



รูปที่ 27 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาเรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ

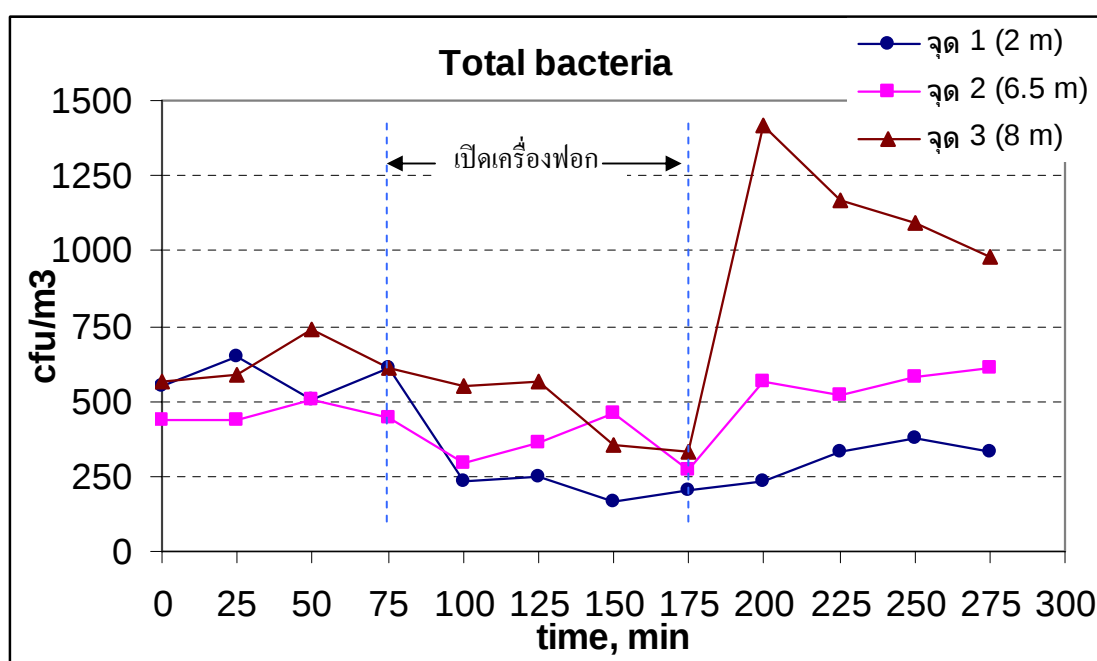
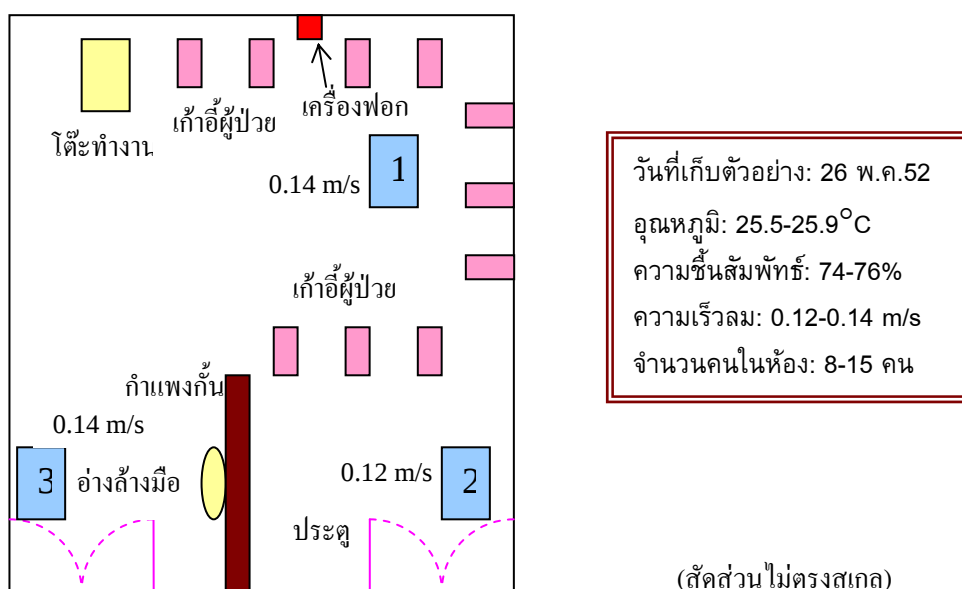
ในส่วนของเชื้อราในอากาศภายในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศนั้นพบเชื้อราอยู่ในช่วงของ 1-4 โคโลนี แต่เมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ พบว่าเชื้อรานั้นเหลือเพียงโคโลนีเดียวในจุดเก็บตัวอย่างที่ 5 และไม่พบเลยในจุดเก็บตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งหลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว พบเชื้อราได้อีกประมาณคือ 1-2 โคโลนีในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 โดยผลในหน่วยของจำนวนโคโลนีต่อปริมาตรอากาศแสดงไว้ในตารางที่ 7 อย่างไรก็ตาม เช่นเดียวกับปริมาณเชื้อราในห้องอื่นๆ ที่มีจำนวนน้อยเกินกว่าจะสรุปผลได้ว่า การลดลงของเชื้อรานั้นเป็นผลมาจากเครื่องฟอกอากาศหรือมาจากลักษณะและคุณภาพของอากาศภายในห้องนั่นเอง

ตารางที่ 7 จำนวนเชื้อรา (cfu/m³) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา

นาฬิกา	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
0	11.8	47.1	0	23.6	0
30	47.1	23.6	0	0	0
60	23.6	0	23.6	11.8	23.6
90	11.8	23.6	35.3	0	0
120	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	11.8
240	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0
300	0	0	23.6	0	0
330	0	0	11.8	0	0

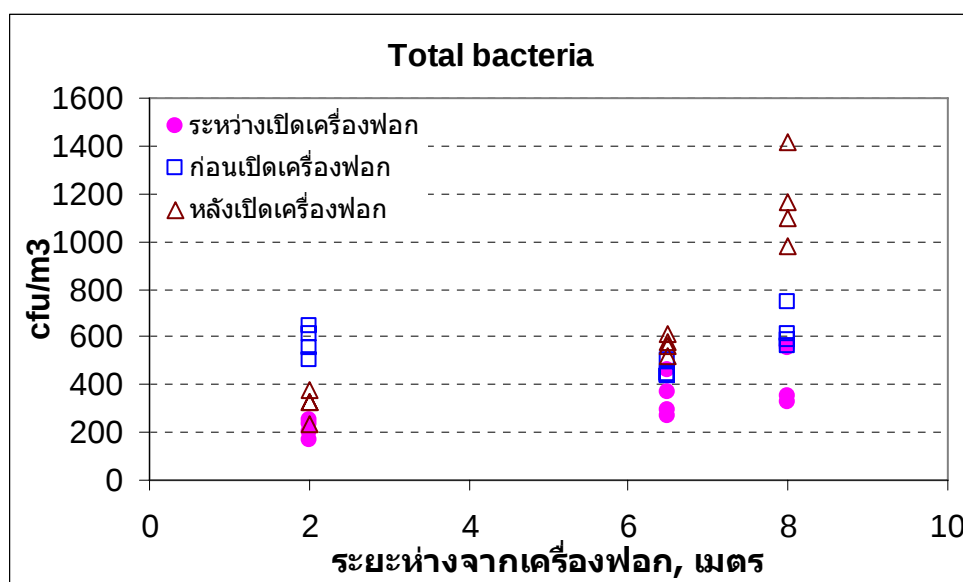
2. หน่วยไตและไตเทียม

ในหน่วยไตและไตเทียมได้ทำการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศใน 2 ห้อง คือห้องฟอกไต สำหรับผู้ป่วย และห้องชำระล้างที่อยู่ติดกับห้องฟอกไต โดยในห้องฟอกไตนั้นเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 จุด ในระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศประมาณ 2 เมตร, 6.5 เมตร และ 8 เมตรตามลำดับ ผลปรากฏว่า เฉพาะที่ระยะห่าง 2 เมตรเท่านั้นที่เห็นการลดลงของจำนวนแบคทีเรียรวมอย่างชัดเจน (รูปที่ 28) คือ ลดลง 61.5% ทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศหลังจากเวลาที่ 75 ขณะที่จุดที่มีระยะห่าง 6.5 เมตร พบการลดลงเพียง 34.2% ส่วนจุดที่อยู่ไกลที่สุดจำนวนแบคทีเรียรวมลดลงเพียง 9.6% แต่การลดลงนั้นพบ ต่อเนื่องในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศจนถึง 46.2% ก่อนปิดเครื่องฟอกอากาศหลังจากเวลาที่ 175 ซึ่ง จำนวนจุลินทรีย์นั้นทวีกลับขึ้นไปสูงกว่าเดิมก่อนที่จะเปิดเครื่องฟอกอากาศมาก



รูปที่ 28 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องฟอกไต ก่อน-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ

ทั้งนี้ ในจุดที่ 2 นั้นเป็นจุดที่อยู่หน้าประตูซึ่งมีคนเดินเข้า-ออกอยู่ตลอดเวลา และจุดที่ 3 นั้นอยู่ไกลจากเครื่องฟอกอากาศมาก ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าจำนวนแบคทีเรียก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ในจุดที่ 2 และ 3 ต่างกับจำนวนที่พบในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p = 0.036$ และ $p = 0.158$ ตามลำดับ) เฉพาะจุดที่ 1 เท่านั้นที่พบว่าจำนวนแบคทีเรียก่อนเปิดเครื่องฟอกกับระหว่างเปิดเครื่องฟอกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p = 0.001$) โดยจำนวนแบคทีเรียลดลงทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ 61.5% (จุดที่ 2 และ 3 ลดลง 34% และ 9.6% ตามลำดับ) และเมื่อทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างจำนวนแบคทีเรียที่พบในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศกับระยะห่างของจุดเก็บตัวอย่างจากเครื่องฟอก (รูปที่ 29) ผลปรากฏว่าค่า $R = 0.979$ แสดงว่าในห้องฟอกไอนี้ จำนวนแบคทีเรียรวมในอากาศเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ โดยระยะห่างตั้งแต่ 6.5 เมตรขึ้นไป เครื่องฟอกอากาศชนิดที่ใช้แผ่นกรองโฟโตคะตะไลซิสนี้อาจไม่ช่วยในการลดจำนวนแบคทีเรียลง



รูปที่ 29 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องฟอกไอนี้ เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ

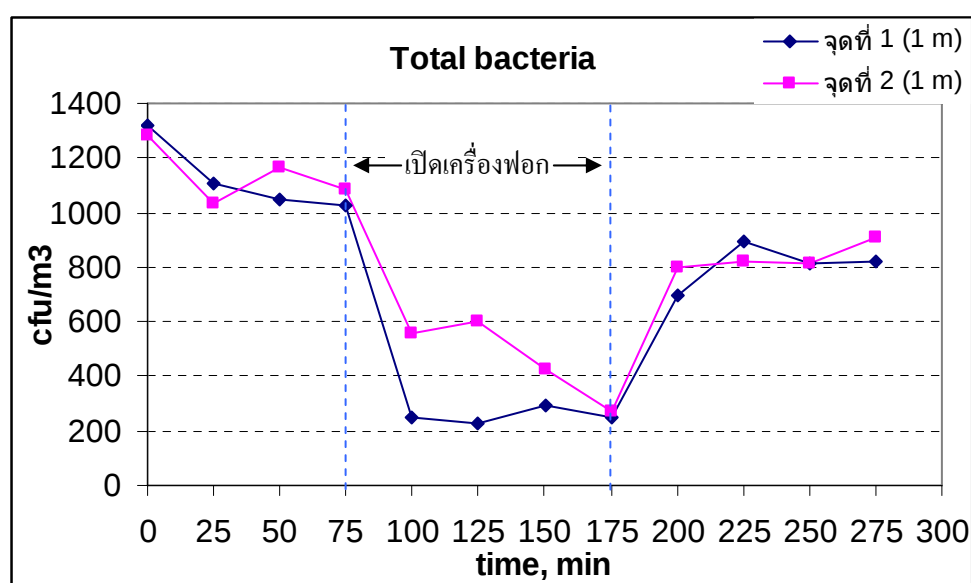
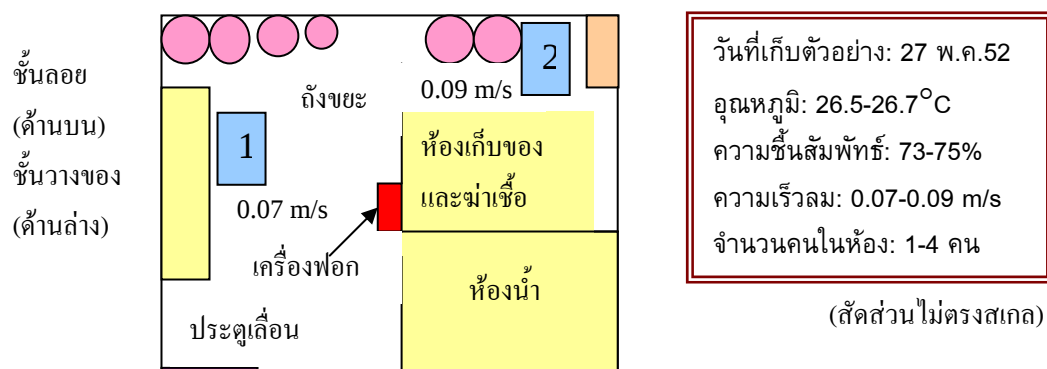
ในส่วนของเชื้อรา นั้น ยังคงพบได้ประปรายตั้งแต่ 1-3 โคโลนี ทั้งในช่วงที่กำลังเปิดเครื่องฟอกอากาศและหลังปิดเครื่องฟอก ซึ่งจำนวนที่พบนั้นน้อยเกินกว่าจะนำไปใช้ในการประเมินความสามารถของเครื่องฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อราอย่างชัดเจนได้ โดยตารางที่ 8 แสดงจำนวนของเชื้อรารวมในอากาศที่พบในหน่วยของโคโลนี/ปริมาตรอากาศที่เก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 8 จำนวนเชื้อรา (cfu/m³) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องฟอกไอนี้

นาที่ที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
0	23.6	11.8	23.6
25	23.6	23.6	23.6
50	11.8	35.3	11.8
75	23.6	11.8	23.6
100	11.8	23.6	23.6

นาทีที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
125	11.8	23.6	11.8
150	0	11.8	23.6
175	0	0	11.8
200	11.8	11.8	11.8
225	11.8	11.8	11.8
250	11.8	11.8	11.8
275	35.3	23.6	11.8

ในห้องชำระล้างที่อยู่ติดกับห้องฟอกไตนั้น ได้ทำการเก็บตัวอย่าง 2 จุดในระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศเท่าๆกัน (ห่าง 1 เมตร) พบว่าในจุดที่ 1 นั้นจำนวนแบคทีเรียรวมลดลง 76% ทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ ขณะที่จุดที่ 2 จำนวนแบคทีเรียรวมลดลง 49% และค่อยๆลดอย่างต่อเนื่องจนถึง 75% ในนาทีที่ 175 ก่อนปิดเครื่องฟอกอากาศ (รูปที่ 30) หลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว จำนวนแบคทีเรียก็กลับเพิ่มจำนวนขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 30 จำนวนแบคทีเรียรวมในห้องชำระล้าง ก่อน-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ

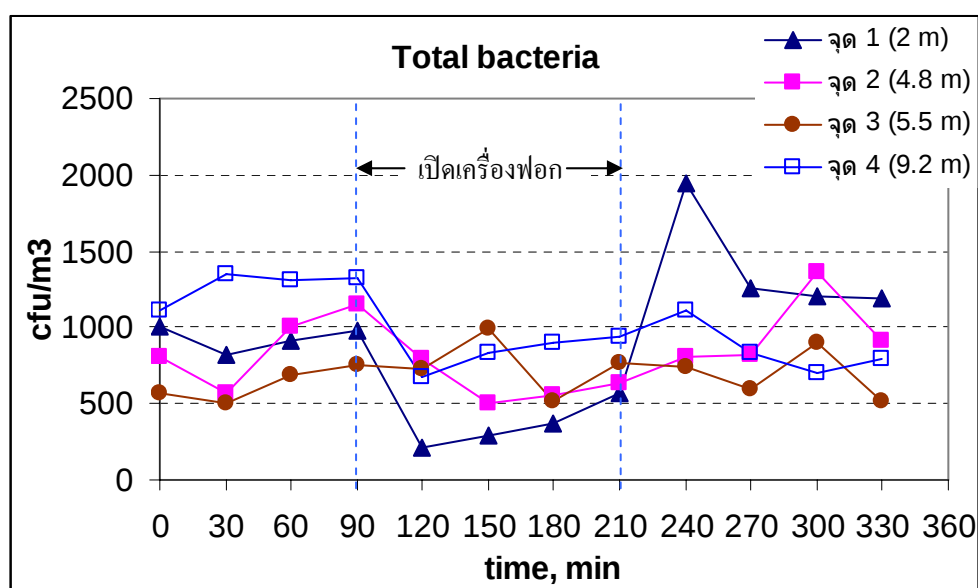
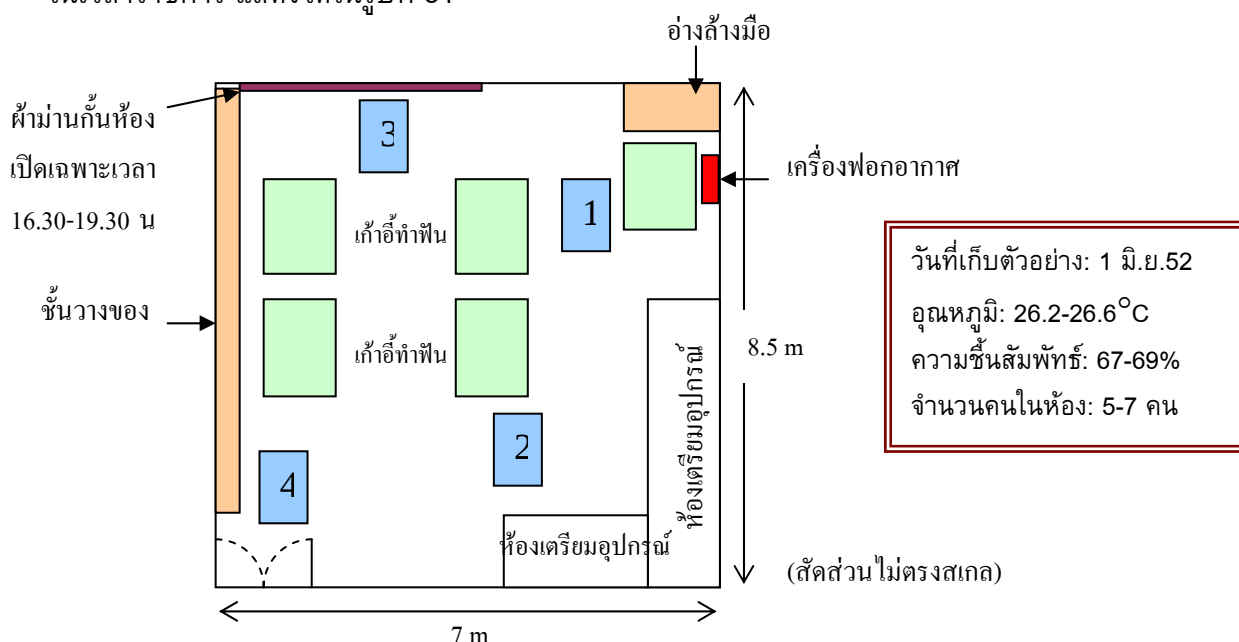
ในส่วนของจำนวนเชื้อรารวมนั้น พบจำนวนโคโลนีได้ตั้งแต่ 1-4 โคโลนี คิดเป็นจำนวน/ปริมาตรอากาศที่เก็บตัวอย่างได้ 11.8-47.1 cfu/m³ ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยจำนวนที่พบนั้นยังคงน้อยเกินไปที่จะใช้ประเมินความสามารถของเครื่องฟอกอากาศในการกำจัดเชื้อราได้

ตารางที่ 9 จำนวนเชื้อรา (cfu/m³) ที่พบในเวลาและตำแหน่งต่างๆในห้องชำระล้างของหน่วยไต

นาฬิกา	จุดที่ 1	จุดที่ 2
0	23.6	23.6
25	23.6	35.3
50	23.6	47.1
75	35.3	11.8
100	11.8	11.8
125	0	35.3
150	11.8	35.3
175	0	23.6
200	11.8	11.8
225	11.8	23.6
250	23.6	11.8
275	11.8	11.8

3. หน่วยทันตกรรม

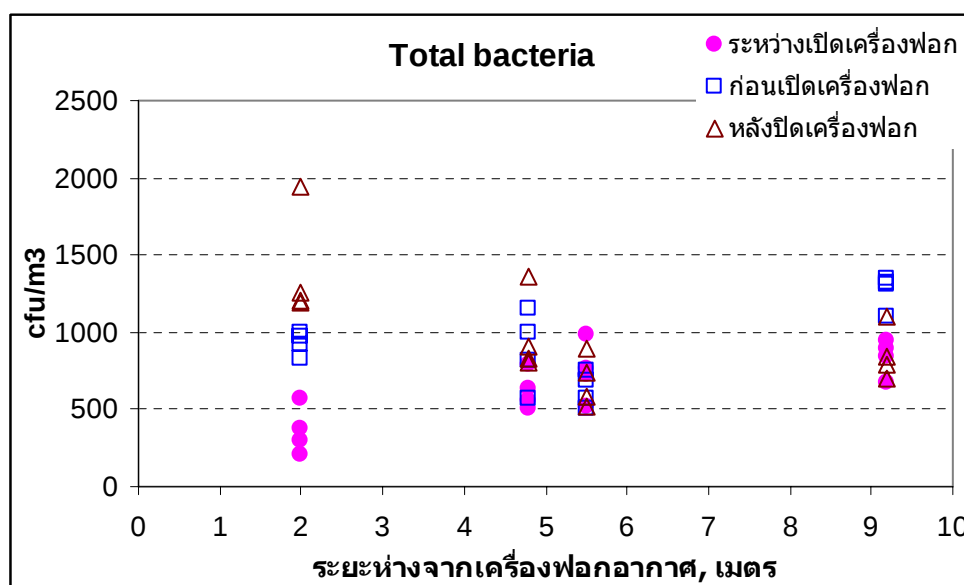
การเก็บตัวอย่างในหน่วยทันตกรรมนั้นกระทำในช่วงเวลาราชการที่มีผู้มาใช้บริการน้อย กับช่วงนอกเวลาราชการที่มีผู้มาใช้บริการมาก ซึ่งการเก็บตัวอย่างระหว่างที่ทันตแพทย์และเจ้าหน้าที่กำลังปฏิบัติงานอยู่นั้น สร้างความไม่สะดวกในการให้บริการค่อนข้างมาก ในที่นี้จึงไม่ได้ทำการศึกษาการกำจัดเชื้อราในอากาศจากการเปิดเครื่องฟอกอากาศ อย่างไรก็ตาม ได้มีการเก็บตัวอย่างเชื้อราในบรรยากาศภายในห้อง พบจำนวน 1-7 โคโลนี หรือ 11.8-82.5 cfu/m³ ซึ่งคงไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดอีกเช่นกันว่า ถ้าหากมีการลดจำนวนลงของเชื้อรา สาเหตุนั้นจะมาจากเครื่องฟอกอากาศหรือลักษณะของอากาศภายในห้องที่มีเชื้อราไม่มากนักแน่ การศึกษานี้จึงกระทำเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย โดยผลของการเก็บตัวอย่างก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระหว่างเปิด และหลังจากปิดเครื่องฟอกไปแล้วในช่วงการให้บริการในเวลาราชการ แสดงได้ในรูปที่ 31



รูปที่ 31 จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยทันตกรรมช่วงเวลาราชการ ก่อน-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ

จุดที่ 1, 2 และจุดที่ 4 นั้นพบการลดจำนวนลงของเชื้อแบคทีเรียในอากาศทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศหลังสิ้นสุดการเก็บตัวอย่างในนาที่ที่ 90 (ลดลง 78.3%, 36.1% และ 49.1% ตามลำดับ) ในขณะที่จุดที่ 3 นั้นพบการลดจำนวนลงเพียง 3.1% กระทั่งพบจำนวนแบคทีเรียในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ ในนาที่ที่ 150 มากกว่าจำนวนที่พบก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศด้วยซ้ำ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าจำนวนแบคทีเรียก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศแตกต่างกับจำนวนแบคทีเรียในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศอย่างมีนัยสำคัญในจุดที่ 1 และ 4 ($p = 0.007$ และ 0.002) ขณะที่จุดที่ 2 และ 3 นั้นความแตกต่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.132$ และ 0.316) แสดงว่าการเปิดกับไม่เปิดเครื่องฟอกอากาศไม่มีผลต่อจำนวนแบคทีเรีย โดยเป็นไปได้ว่า จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 นั้นอยู่หน้าผ้า màn ซึ่งอาจมีการสะสมตัวของแบคทีเรียและฝุ่นละอองบนผ้า การดูดอากาศในอัตรา 28.3 ลิตร/นาที่ อาจมีผลให้แบคทีเรียฟุ้งกระจายสู่อุปกรณ์เก็บตัวอย่างได้ตลอดเวลา การเปิดเครื่องฟอกอากาศจึงไม่มีผลในการช่วยลดจำนวนอย่างทันทีก็เป็นได้

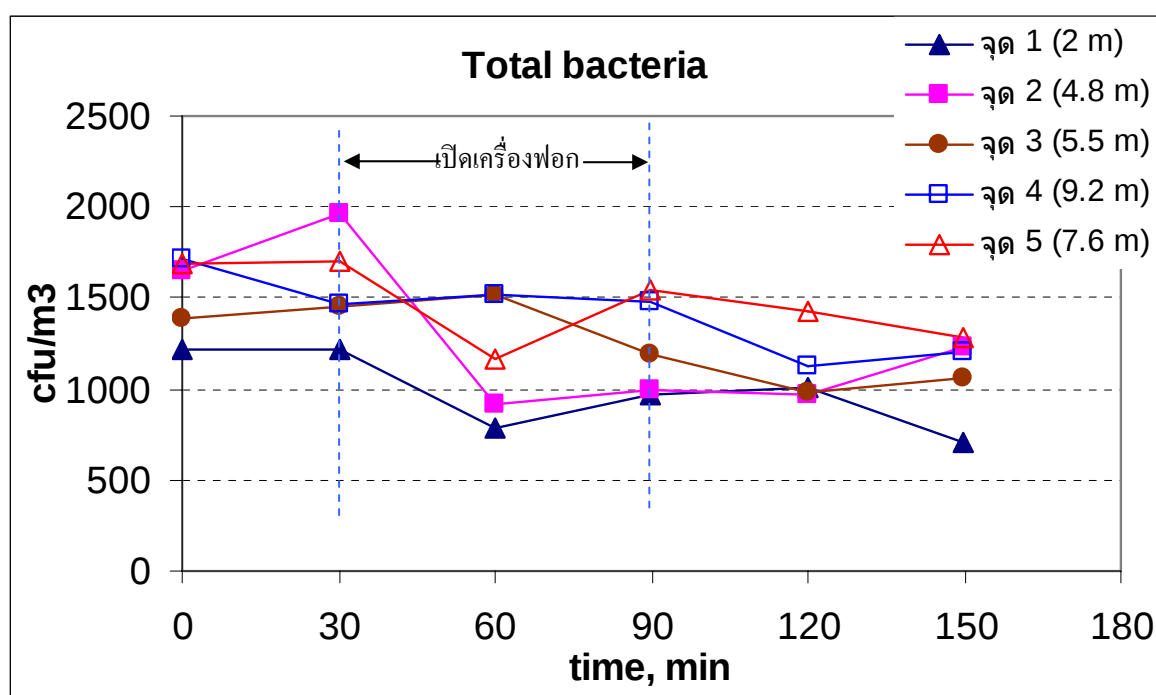
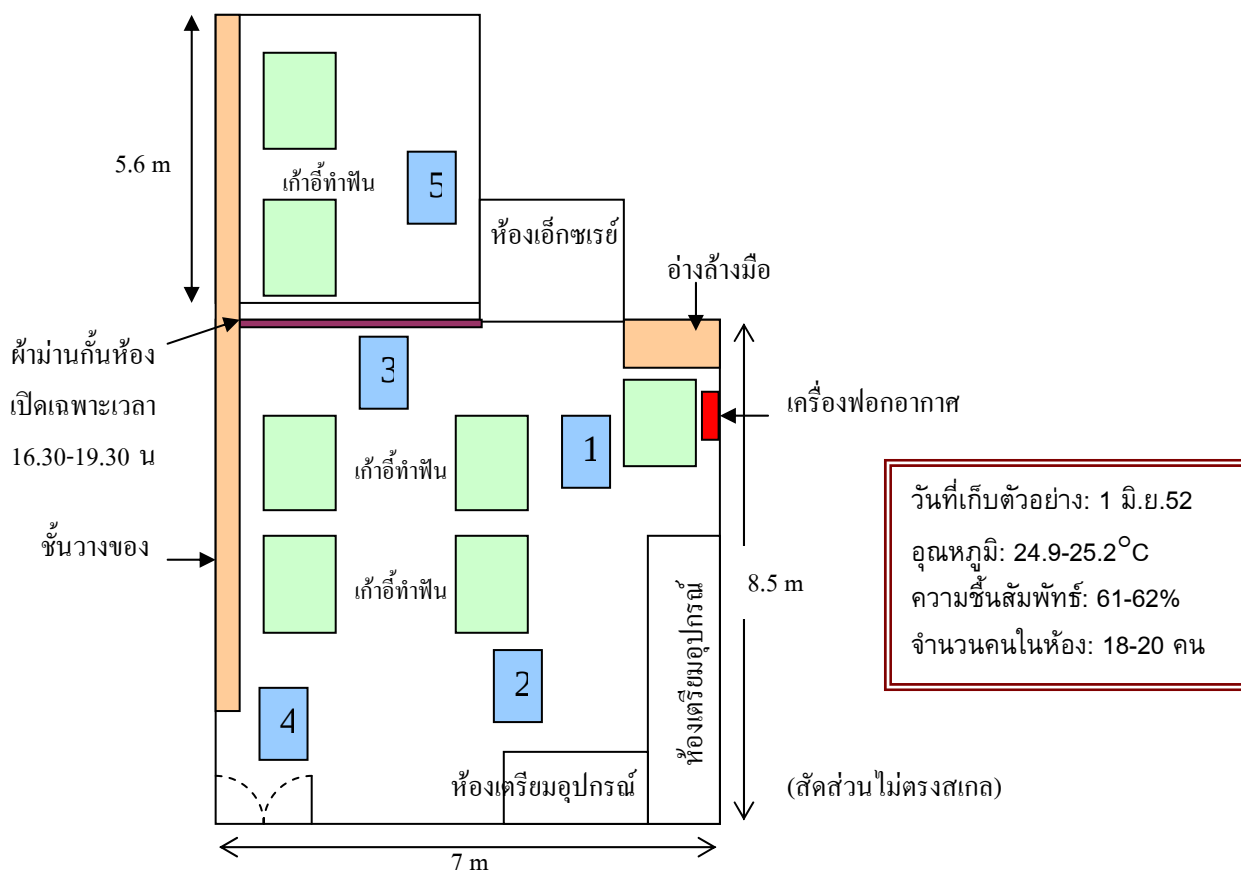
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศกับปริมาณแบคทีเรียที่พบนั้น (รูปที่ 32) พบว่าระยะห่างที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับจำนวนแบคทีเรียที่มากขึ้นตามไปด้วย ($R = 0.755$) อย่างไรก็ตาม เฉพาะที่ระยะห่าง 2 เมตรเท่านั้นที่เห็นการลดจำนวนของแบคทีเรียระหว่างที่มีการเปิดเครื่องฟอกอากาศ ต่างจากจำนวนในช่วงก่อนเปิดเครื่องฟอกและหลังจากปิดเครื่องฟอกไปแล้วอย่างชัดเจน ที่ระยะห่าง 4.8 เมตร และ 5.5 เมตรนั้น จำนวนแบคทีเรียระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกใกล้เคียงกับช่วงก่อนเปิดเครื่องฟอก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ 5.5 เมตร ยากที่จะจำแนกความแตกต่างของจำนวนแบคทีเรียได้



รูปที่ 32 จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยพันตัวต่อกรัมช่วงเวลาทำการ เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ

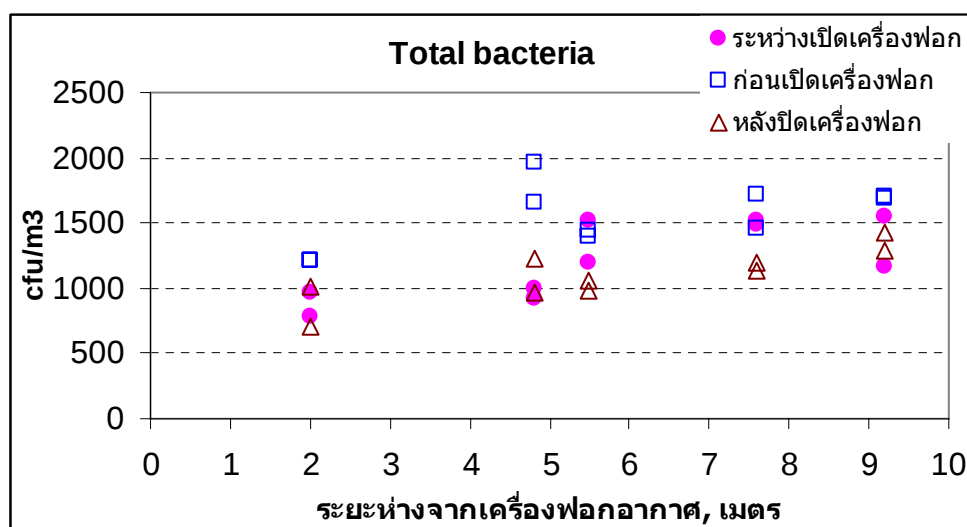
สำหรับจำนวนแบคทีเรียที่พบในช่วงทำการนอกเวลาราชการนั้น รายงานผลไว้ในรูปที่ 33 โดยการปฏิบัติงานของทันตแพทย์เริ่มตั้งแต่เวลา 16.30 น.-19.30 น. (3 ชั่วโมง) การเก็บตัวอย่างแบคทีเรียในช่วงก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระหว่างเปิดเครื่องฟอก และหลังปิดเครื่องฟอกจึงต้องลดระยะเวลา

จาก 90 นาที (4 ครั้ง) เหลือเพียง 30-60 นาที (2 ครั้ง) ในแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง โดยวันที่เก็บตัวอย่างนั้น ยังคงเป็นวันเดียวกันเพื่อสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้



รูปที่ 33 จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยพันตัวต่อกรัมช่วงนอกเวลาราชการ ก่อน-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศ

จากรูปที่ 33 เฉพาะจุดที่ 1, 2 และ 5 เท่านั้นที่พบการลดลงของจำนวนแบคทีเรียหลังเปิดเครื่องฟอกอากาศหลังเสร็จสิ้นการเก็บตัวอย่างในนาที่ที่ 30 โดยพบการลดลง 35%, 53.3% และ 31.3% ในแต่ละจุดตามลำดับ สอดคล้องกับการทดสอบทางสถิติที่พบว่าความแตกต่างของจำนวนแบคทีเรียก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศต่างกับจำนวนที่พบระหว่างเปิดเครื่องฟอกอากาศ ($p = 0.103, 0.015$ และ 0.134 ตามลำดับ) ขณะที่จุดที่ 3 และ 4 กลับพบการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียขึ้นมา 5% และ 4% ตามลำดับ ($p = 0.677$ และ 0.483) ซึ่งจุดที่ 3 นั้นยังคงเป็นจุดที่ไม่พบการลดจำนวนของแบคทีเรียเช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างในเวลาราชการอยู่เหมือนเดิม แต่สิ่งที่ต่างไปคือจุดที่ 4 ซึ่งอยู่หน้าประตูเข้าออก เป็นอีกหนึ่งจุดที่ไม่มีการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย โดยเป็นไปได้ว่า จำนวนคนที่เพิ่มขึ้นเป็น 18-20 คนซึ่งมีการเดินเข้าเดินออกอยู่ตลอดเวลา นั้นมีส่วนทำให้จุลินทรีย์นั้นมีการฟุ้งกระจายและไม่ถูกดูดเข้าสู่เครื่องฟอกอากาศ และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศกับปริมาณแบคทีเรียพบค่า $R = 0.74$ (รูปที่ 34) แสดงว่า ระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศมีผลต่อจำนวนแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจได้ก็คือ จำนวนแบคทีเรียในช่วงนอกเวลาทำการนั้นมีมากกว่าในช่วงเวลาทำการอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าจำนวนคนและกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในห้อง มีส่วนในการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในอากาศอย่างชัดเจน รวมถึงการเปิดปิดประตูบ่อยครั้งอาจเพิ่มโอกาสในการปนเปื้อนของจุลินทรีย์จากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องมากขึ้นด้วย



รูปที่ 34 จำนวนแบคทีเรียรวมในหน่วยพันตัวต่อกรัมช่วงนอกเวลาราชการ เรียงตามระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การเคลือบแผ่นกรองชนิดประสิทธิภาพสูงหรือ HEPA filter ด้วย TiO_2 นั้น จำเป็นต้องมีการกำจัดสารกันน้ำที่บริษัทผู้ผลิตเคลือบไว้เป็นการป้องกันไม่ให้เส้นใยของแผ่นกรองเสื่อมสภาพจากความชื้นได้ง่าย วิธีการกำจัดสามารถทำได้โดยใช้การอบที่อุณหภูมิ 550°C หรือ ล้างด้วยสารละลาย 0.08 M sodium dodecyl sulfate (SDS) ก่อนนำไปเคลือบด้วยวิธี dip-coat โดยในการศึกษานี้เลือกใช้วิธีการล้างด้วยสารละลาย 0.08 M SDS 2 ครั้ง แล้วผึ่งให้แห้งก่อนนำไปจุ่มในสารละลาย TiO_2 2% นาน 10 นาที ซึ่งปริมาณ TiO_2 loading บนแผ่นกรองที่ได้อยู่ที่ $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$

ความดันลดของแผ่นกรองที่เคลือบ TiO_2 $3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$ เพิ่มขึ้นจากแผ่นกรองปกติที่ไม่มี การเคลือบเล็กน้อย กล่าวคือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$ พบความดันลดเพิ่มขึ้นมากที่สุด 0.26 นิ้วน้ำ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 5\%$ พบความดันลดเพิ่มขึ้นมากที่สุด 0.43 นิ้วน้ำ เมื่อใช้ความเร็วลมตั้งแต่ 0.1, 0.3 และ 0.5 เมตร/วินาทีในการทดสอบ โดยความเร็วลมยิ่งเพิ่ม ความดันลดก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และความชื้นสัมพัทธ์ที่มากขึ้นทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ในแง่ของการหลุดร่วงของ TiO_2 มีการทดสอบโดยใช้ blower เป่าลมต่อเนื่องใน chamber ผ่านแผ่นกรองเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมงที่ระดับความเร็วลมหน้าแผ่นกรอง 0.3 เมตร/วินาที พบว่า น้ำหนักของ TiO_2 บนแผ่นกรองหลังเป่าลมลดลงไป $103 \pm 2.41 \text{ mg/m}^2$ จากน้ำหนักก่อนเป่าลม ($3140 \pm 67 \text{ mg/m}^2$) ในช่วงที่ไม่มีการฉายแสง และลดลงไป $110 \pm 2.77 \text{ mg/m}^2$ ในช่วงที่มีการฉายแสง หรือคิดเป็น 3.5% ของน้ำหนัก TiO_2 ตั้งต้น

ประสิทธิภาพของการกำจัดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรอง HEPA filter ที่เคลือบ TiO_2 กระทำโดยเปรียบเทียบจำนวนจุลินทรีย์ที่สกัดได้จากแผ่นกรอง ระหว่างช่วงที่มีการฉายแสง UV-A (ความเข้มแสง $4.85 \pm 0.09 \text{ mW/cm}^2$) กับช่วงที่ไม่มีการฉายแสง พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $45 \pm 5\%$ ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการเคลือบแผ่นกรองด้วย TiO_2 แล้วฉายด้วยแสง UV-A สามารถกำจัด *Staphylococcus epidermidis* ได้ 100% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง สามารถกำจัด *Bacillus subtilis* ได้ 87% เมื่อใช้เวลาการฉายแสง 10 ชั่วโมง และกำจัด *Aspergillus niger* ได้ 77% รวมถึงกำจัด *Penicillium citrinum* ได้ 83% เมื่อใช้เวลาการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน กรณีที่ไม่มีการฉายแสง ในระยะเวลาเท่าๆกัน พบว่า *Staphylococcus epidermidis* ที่สกัดได้จากแผ่นกรองมีจำนวนลดลงจากจำนวนตั้งต้นเพียง 39% *Bacillus subtilis* มีจำนวนลดลง 24% ขณะที่ *Aspergillus niger* และ *Penicillium citrinum* มีจำนวนลดลงเท่าๆกัน คือ 12% แสดงให้เห็นว่า แผ่นกรองที่มีปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่ติดอยู่บนแผ่นกรองได้มากกว่าแผ่นกรองปกติที่ไม่มีปฏิริยาเกิดขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น $75 \pm 5\%$ ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรองลดลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ การกำจัด *Staphylococcus epidermidis* เกิดขึ้นเพียง 89% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนการกำจัด *Bacillus subtilis*,

Aspergillus niger และ *Penicillium citrinum* เหลือเพียง 44%, 22% และ 42% ตามลำดับจากการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมงเช่นเดิม

ในส่วนของผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรองของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส พบว่าการมี toluene ความเข้มข้น 100 ppm อยู่ร่วมด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ลดลง 0.8-11.8% แต่เมื่อทดสอบทางสถิติ พบว่าการลดลงนั้นไม่มีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการมี xylene ความเข้มข้น 50 ppm อยู่ร่วมด้วย มีผลให้การกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาลดลง 0.6-15.9% แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การมีทั้ง toluene และ xylene ในความเข้มข้นดังกล่าวอยู่ร่วมด้วยพร้อมๆกัน พบว่ามีผลทำให้การกำจัด *Bacillus subtilis* บนแผ่นกรองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ลดลง 10-31%) ส่วนจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆแม้ว่าพบการกำจัดที่ลดลง (0.7-19% สำหรับ *Staphylococcus*, 7-20% สำหรับ *Aspergillus* และ 6-19% สำหรับ *Penicillium*) แต่ก็ยังคงไม่มีนัยสำคัญทางสถิติอยู่นั่นเอง

ในส่วนของการนำแผ่นกรองที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสไปประยุกต์ใช้กับเครื่องฟอกอากาศนั้น พบว่าทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ จำนวนแบคทีเรียรวมภายในห้องนั้นลดจำนวนลงอย่างทันที (สูงสุด 78%) และหลังจากที่ปิดเครื่องฟอกอากาศแล้ว จำนวนแบคทีเรียก็กลับมาทวีจำนวนขึ้นดังเดิม ซึ่งการลดลงของแบคทีเรียจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนตั้งต้นที่มีอยู่ก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างนั้นด้วย กล่าวคือ ถ้าเป็นจุดที่มีกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายตัวของแบคทีเรีย เช่นตำแหน่งประตูที่มีการเดินเข้า-ออกตลอดเวลา หรือมีช่องทางเข้าของอากาศจากภายนอก โอกาสที่เครื่องฟอกอากาศจะช่วยลดจำนวนแบคทีเรียนั้นก็น้อยลงไปด้วย

ทั้งนี้ การศึกษานี้พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นยังคงนานเกินไป (เช่น 10 ชั่วโมง-- ในส่วนของการศึกษาใน chamber) จึงควรต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติม เช่น เติมน้ำที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาจำพวกเงินหรือวัสดุอื่นร่วมด้วย รวมถึงควรทดสอบกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายอื่นๆให้ครอบคลุมมากกว่านี้ โดยเฉพาะในสภาวะที่มีหลายๆชนิดผสมรวมกัน ในแง่ของการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องฟอกอากาศ ควรมีการศึกษา by-products ที่อาจเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ รวมถึงรูปแบบของการใช้งานที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นระยะห่างที่ต้องการ อัตราการดูดอากาศที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ตำแหน่งที่ตั้ง ฯลฯ ซึ่งรายละเอียดเหล่านี้จะช่วยให้การปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- การดี ช่วยบำรุง, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, เนสินี ไชยเอีย (2548) ชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในอากาศของโรงพยาบาลจากวิธีการเก็บตัวอย่างที่ต่างกัน. รายงานการวิจัยเสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) รหัสโครงการ 47-01111, 74 หน้า
- Alberti C., Bouakline A., Ribaud P., Lacroix C., Rousselot P., Leblanc T., and Derouin F. (2001) Relationship between environmental fungal contamination and the incidence of invasive aspergillosis in haematology patients. *Journal of Hospital Infection* **48**: 198-206.
- Ao C.H. and Lee S.C. (2004) Combination effect of activated carbon with TiO₂ for the photodegradation of binary pollutants at typical indoor air level. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **161**: 131-140.
- Block S.S., Seng V.P., and Goswami D.W. (1997) Chemically enhanced sunlight for killing bacteria. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* **119**: 85- 92 (DOI:10.1115/1.2871858)
- Coleman H.M., Marquis C.P., Scott J.A., Chin S.S., and Amal R. (2005) Bactericidal effects of titanium dioxide-based photocatalysts. *Chemical Engineering Journal* **113**: 55-63.
- Deacon J. (2004) "The Microbial World: Airborne Microorganisms." Institute of Cell and Molecular Biology, The University of Edinburgh. <http://helios.bto.ed.ac.uk/bto/microbes/airborne.htm> (Accessed on Jan 12, 2004).
- Fujishima A., Rao T., and Tryk D.A. (2000) Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* **1**: 1-21.
- Goswami D.Y., Trivedi D., and Block S.S. (1997) Photocatalytic disinfection of indoor air. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* **119**: 92-96.
- Hidy G. (1984) *Aerosols, an industrial and environmental science*. Academic Press, Inc., FL., 744 p.
- Hinds W. (1982) *Aerosol technology*. John Wiley & Son, NY., 424 p.
- 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.
- Hur J-S., Oh S-O., Lim K-M., Jung J.S., Kim J-W., and Koh Y.J. (2005) Novel effects of TiO₂ photocatalytic ozonation on control of postharvest fungal spoilage of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology* **35**: 109-113.
- Ibàñez J.A., Litter M.I., and Pizarro R.A. (2003) Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ on *Enterobacter cloacae* comparative study with other gram (-) bacteria. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **157**: 81-85.

- Kikuchi Y., Sunada K., Iyoda T., Hashimoto K., and Fujishima A. (1997) Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ thin films: dynamic view of the active oxygen species responsible for the effect. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **106**: 51-56.
- Kim B., Kim D., Cho D., and Cho S. (2003) Bactericidal effect of TiO₂ photocatalyst on selected food-borne pathogenic bacteria. *Chemosphere* **52**: 277-281.
- Kowalski W.J. and Bahnfleth W. (1998) Airborne Respiratory Diseases and Mechanical Systems for Control of Microbes. *Heating/Piping/Air Conditioning Engineering* **70**:34-52.
- Li F.B., Li X.Z., Ao C.H., Lee S.C., and Hou M.F. (2005) Enhanced photocatalytic degradation of VOCs using Ln³⁺-TiO₂ catalysts for indoor air purification. *Chemosphere* **59**: 787-800.
- Lin W-H. and Li C-S. (2000) Associations of fungal aerosols, air pollutants and meteorological factors. *Aerosol Science and Technology* **32**: 359-368.
- Lin, C-Y. and Li, C-S. (2003) Inactivation of microorganisms on the photocatalytic surfaces in air, *Aerosol Science and Technology* **37**: 939-946.
- Lonnen J., Kilvington S., Kehoe S.C., Al-Touati F., and McGuigan K.G. (2005) Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water. *Water Research* **39**: 877-883.
- Maness P.C., Smolinski S., Blake D.M., Huang Z., Wolfrum E.J., and Jacoby W.A. (1999) Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism. *Applied and Environmental Microbiology* **65**: 4094-4098.
- Maus R. and Umhauer, H. (1997) Collection efficiencies of coarse and fine dust filter media for airborne biological particles. *Journal of Aerosol Science* **28**: 401-415.
- Montz W.E. (2004) "Contamination Control in Hospital (June 2000)".
www.esmagazine.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,2503,3232,00.html (Accessed on Jan 12'2004).
- Möritz M., Peters H., Nipko B., and Rüdén H. (2001) Capability of air filters to retain airborne bacteria and molds in heating, ventilating and air-conditioning (HVAC) systems. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* **203**: 401-409.
- MS Hospital Consulting (2004) "Indoor Air Quality in Health Care Settings".
www.mshospitalconsulting.com (Accessed on Jan 12'2004).
- Newhouse M.T. and Ruffin R.E. (1978) Deposition and fate of aerosolized drugs. *Chest* **73**: 936-943.
- Ollis D.F. (2000) Photocatalytic purification and remediation of contaminated air and water. *C.R.Acad.Sci.Paris, Série IIc, Chimie/Chemistry* **3**: 405-411.

- Rincón A-G and Pulgarin C. (2004a) Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E.coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂ implications in solar water disinfection. *Applied Catalysis B: Environmental* **51**: 283-302.
- Rincón A-G and Pulgarin C. (2004b) Bactericidal action of illuminated TiO₂ on pure *Escherichia coli* and natural bacterial consortia: post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time. *Applied Catalysis B: Environmental* **49**: 99-112.
- Saito T., Iwase T., Horie J., and Morioka T. (1992) Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO₂ on mutants streptococci. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **14**: 369-379.
- Streifel, A.J. (2004) "Hospital Air-Quality Monitoring". www.infectioncontrolday.com (Accessed on Jan 14, 2004).
- Vohra A., Goswami D.Y., Deshpande D.A., and Block S.S. (2005) Enhanced photocatalytic inactivation of bacterial spores on surfaces in air. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* **32**: 364-370.
- Vohra A., Goswami D.Y., Deshpande D.A., and Block S.S. (2006) Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air, *Applied Catalyst B: Environmental* **32**, 364-370.
- Wang Z., Reponen T., Grinshpun S.A., Górny R.L., and Willeke K. (2001) Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection. *Journal of Aerosol Science* **32**: 661-674.
- Zhao J. and Yang X. (2003) Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. *Building and Environment* **38**: 645-654.

Output ที่ได้จากโครงการ

1. ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 เรื่อง

Chuaybamroong P., Chotigawin R., Supothina S., Sribenjalux P., Larpiattaworn S., Wu C.Y. "Efficacy of photocatalytic HEPA filter on microorganism removal". Submitted to Indoor Air.

2. นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2 เรื่อง

Chuaybamroong, P., Chotigawin, R., Sribenjalux, P., Supothina, S. "Microorganism Disinfection Using TiO₂ Impregnated HEPA Filter" *the 19th Asian Conference of Occupational Health (ACOH)*, Suntec Singapore, September 17-19, 2008. (Oral presentation)

Chotigawin R., Chuaybamroong P., Supothina S., Johns J. "Titanium dioxide immobilized on pretreated air filters". *the Asian-Pacific Regional Conference on Practical Environmental Technologies (APRC 2007)*, Khon Kaen, Thailand, August 1-2, 2007. (Oral presentation)

3. ผลิตนักศึกษาระดับปริญญาเอก 1 คน

นางสาวรจฤดี โชติกาวิรินทร์ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาสาธารณสุขศาสตร์ (นานาชาติ) มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคผนวก

Efficacy of photocatalytic HEPA filter on microorganism removal

Paradee Chuaybamroong^{a,*}, Rotruedee Chotigawin^b, Sitthisuntorn Supothina^c, Pipat Sribenjalux^d, Siriporn Larпкиattaworn^e, and Chang-Yu Wu^f

^aDepartment of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Thailand

^bPh.D. Program in Public Health, Khon Kaen University, Thailand

^cNational Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency, Thailand

^dDepartment of Clinical Microbiology, Faculty of Associated Medical Sciences, Khon Kaen University, Thailand

^eDepartment of Material Technology, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Bangkok, Thailand

^fDepartment of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, USA

Abstract This study assessed the application of photocatalytic oxidation to the HEPA filter for disinfection of airborne microorganisms. Experiments were conducted at two TiO₂ loadings (1870±169 and 3140±67 mg/m²) on the HEPA filter irradiated with UV-A at the intensity of 0.85±0.18 or 4.85±0.09 mW/cm² under two relative humidity conditions (45±5% and 75±5%). Inactivation and penetration of four microorganisms were tested, including *Aspergillus niger*, *Penicillium citrinum*, *Staphylococcus epidermidis*, and *Bacillus subtilis*. It was found that microorganisms retained on a photocatalytic filter were inactivated around 60-80% and even 100% for *S. epidermidis* when the photocatalytic oxidation reactions occurred. Lower penetration was also found from the photocatalytic filter for all airborne microorganisms. High humidity decreased photocatalysis efficacy. Increasing TiO₂ loading or irradiance intensity did not substantially affect its disinfection capability.

Keywords: Photocatalytic oxidation (PCO); Disinfection; Bioaerosol; HEPA filter; Photolysis.

Practical Implications

The high efficiency particulate air filter (HEPA) is used widely to remove particulates and microorganisms from the air stream. However, after a period of time those retained microorganisms can proliferate and dissipate into the filtered air. A filter that is meant to remove microorganisms thus becomes a source of microbes instead. This study aims to eliminate that problem by using photocatalytic reactions. Although photocatalysis is applied to many fields lately, the evidence on a photocatalytic HEPA has not been reported before. The knowledge learned from this study allows practical applications of the technology.

Introduction

Photocatalytic oxidation (PCO) process is gaining popularity for airborne microorganism disinfection. In principle, when a photocatalyst, mainly TiO₂, is irradiated with ultraviolet light, a photon from the light excites a catalyst's electron in the valence band to jump to the conduction band, leaving a hole behind. That hole can further react with surrounding water to produce a hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$), while the electron in the conduction band reacts with oxygen and yields superoxide radical anion ($\cdot\text{O}_2^-$). These radicals can attack microorganism cell membranes and release K⁺, RNA, proteins, and other important components which cause the cells to die eventually (Wamer et al., 1997).

With this capability, researchers have applied the PCO to many substrates. For example, Goswami et al. (1997) coated TiO₂ onto fiberglass air conditioning filter, which was placed in a recirculating reactor housing with 24 UV lamps (14 W each) and used culture plates to capture viable organisms behind the filter. Wolfrum et al. (2002) sprayed TiO₂ onto 3.8-cm diameter polished quartz disks and porous quartz fritted disks. Microorganism suspension

was dropped on the disk and irradiated with a low pressure near-UV lamp at the top. Kühn et al. (2003) applied TiO₂ to a 3×3 cm Plexiglas[®] slide and observed microbial destruction on it after irradiating with UV-A. Lin and Li (2003a) observed penetration of various microorganisms through a commercial TiO₂ filter while in a follow-up study they coated TiO₂ onto a microscope glass slide and investigated its disinfection against *Bacillus subtilis* and *Penicillium citrinum* (Lin and Li, 2003b). They also tested a commercial TiO₂ filter (large 500 µm pore size) by dropping those microorganisms onto it and irradiating with UV-A light. Vohra et al. (2005) coated TiO₂ onto a 5×5 cm aluminum substrate and compared the improved destruction to a fabric (polyester) substrate for *Bacillus cereus* using UV-A irradiation. Keller et al. (2005) reported the inactivation of *E. coli* using a flowing air stream in TiO₂-coated Vigreux-like Pyrex tubular reactor (60 mm in diameter and 300 mm in length) with UV-A irradiating around the tube. Vohra et al. (2006) developed another test by recirculating microorganisms in a chamber before inserting a photocatalytic fabric filter and turning on UV-A lamps and observed microorganism destruction by swabbing filter surfaces. Li et al. (2006) coated TiO₂ on the outermost layer of surgical fabric masks and tested inhibitory effect against bacteria with no irradiation. Pal et al. (2007) impregnated bacterial suspension onto a TiO₂-loaded cellulose acetate membrane filter (0.45 µm pore size and 47-mm diameter), placed in a Petri dish and irradiated with fluorescent light compared to black light. Yu et al. (2008) coated TiO₂ onto a synthetic fiber filter and irradiated with UV-A lamp in a reactor that allowed the air flow through at a rate of 50 L/min or face velocity of 0.058 m/s.

However, none of these applied the PCO to high efficiency particulate air (HEPA) filter in a HVAC system. The HEPA filter has been mandated for use for airborne microorganism removal by many codes for health care such as the American Institute of Architects' Guidelines for Design and Construction of Hospital and Health Care Facilities (AIA Guidelines), the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers' (ASHRAE) standards, the Joint Commission on Accreditation of Healthcare Organization's "Environment of Care" standards, the Center for Disease Control and Prevention (CDC) guidelines and recommended practices (ASHRAE, 2003). While the HEPA filter can efficiently capture aerosolized microorganisms, it can become a breeding ground for microbes as well. When temperature and humidity are suitable, the microbes retained inside a filter can multiply using particulates adhered to the filter as a food source and their offspring ultimately disperses into the filtered air (Goswami, 1999; Jankowska et al., 2000; Simmons et al., 1997). Thus, instead of being an apparatus to control air quality, it becomes a source of pathogens.

In order to eliminate that problem, this study applied the PCO to a HEPA filter in an HVAC system and experiments were carried to investigate the effectiveness of the photocatalytic HEPA filter under various conditions in order to solve the breeding ground problem as stated above. Since in HVAC, the air flows through the HEPA filter all the time, with a recommended velocity at 1.5 m/s limit (ASHRAE, 2003), those studies that had no flow through do not provide practical knowledge. In addition, the velocity of 0.058 m/s in the study of Yu et al. (2008) was too low for HEPA infiltration, while the study of Vohra et al. (2006) had no filter inside when the flow was circulated in a chamber. The filter was inserted after the flow had been stopped; thus, it did not simulate the actual HVAC operation. Also, Goswami et al. (1997) collected microorganisms behind the catalyst filter, not from the filter; it could not be used as evidence of solving a breeding ground problem of HEPA filter. This present study was conducted in a closed loop chamber that circulated the flow all the time and extracted catalyst filters for microorganism concentration instead of swabbing the surface. This provides more realistic data for microorganisms retained inside the filter. Experiments were carried for 4 species, *Aspergillus niger*, *Penicillium citrinum*, *Staphylococcus epidermidis* and *Bacillus subtilis* which are the most commonly found genera in hospitals in Thailand. In addition, Thailand is in a hot and humid climate. Effect of relative

humidity would be important and was therefore also studied. Very high RH not only reduces the probability of microorganisms contacting with hydroxyl radicals, but also provides sites for microorganisms to hide and survive. Excessive water molecules could occupy the reactive sites on the filter surface; hence, the PCO efficiency could be reduced (Goswami et al., 1997, 2003; Li and Wu, 2006).

Materials and Methods

The 99.99% efficiency HEPA filters (Dumas Co. Ltd., France) were cut into pieces of 20×52 cm and dip-coated in a TiO₂ (Degussa-P 25) slurry. They were subsequently baked in an oven at 120 °C for 1 hr, and then pleated and put into a frame. Two titanium loadings on the filter were studied: low loading (1870±169 mg/m²) and high loading (3140±67 mg/m²). Determination of loading was acquired from the different weight of the filter before and after coating. Figure 1 shows a schematic design of the filter testing system. Microorganism suspensions with an initial concentration of 10⁵-10⁷ cfu/mL were introduced into the system upstream using a 6-jet nebulizer (BGI. Incorp., model MRE-CN 25). A serpentine-vane section, adapted from Griffiths et al. (2005), was used to dry out the droplet before it was divided into two parallel flows. One flow entered a control section with no irradiance or dark section (the lamp was covered with a PVC tube), while the other entered a test section with UV-A irradiance (light section) at a face velocity of 0.3 m/s, measured with a hot wire anemometer (Airflow Developments Ltd., model TA5-Flexible probe). In the light section, a 36-W UV-A lamp (Sylvania F36W-T8/BLB) was inserted for the irradiance intensity of 0.85±0.18 mW/cm² measured with a radiometer (Cole Palmer, model LW09811-50) on the filter surface. This intensity was chosen according to the TLV for UV-A which is limited to 1 mW/cm² for periods lasting 1000 seconds or more by the American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH, 2007), and it is referred to as a low irradiance intensity hereafter. For high irradiance intensity, five 36-W UV-A lamps (Sylvania F36W-T8/BLB) were inserted, and the irradiance was 4.85±0.09 mW/cm² measured on the filter surface.

In terms of microorganism characteristic, *A. niger* is a very hydrophobic spore-forming fungus (Wolfrum et al., 2002). *P. citrinum* is subspheroidal or spheroidal of 2-3 µm in diameter and also is a hardy, hydrophobic spore-forming fungus (Lin and Li, 2003a). *S. epidermidis* is a gram-positive cocci vegetative bacterium that inhabits human skin and respiratory tract (Foarde et al., 1999). *B. subtilis* is a gram-positive, rod-shaped and endospore forming bacterium that was reported resistant to photocatalysis (Pal et al., 2005). All microorganisms were purchased in freeze dried culture from Microbiological Resource Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research. To revive the microorganism, the culture was suspended in the sterile water and transferred onto agar plates following the procedures of Lin and Li (2003 b) for *B. subtilis* and *P. citrinum* and the procedures of Vohra et al. (2006) for *S. epidermidis* and *A. niger*.

After the filters were installed, the nebulizer was started to generate the bioaerosol for 20 min. Then the filters were pulled out to extract for the initial microbial concentration retained in the filter. A new set of filters were installed and the nebulizer was restarted for another 20 min. When it stopped, a UV-A lamp was turned on for a designated duration (1, 3, 4, 5, 6, 8 and 10 h). During nebulization and irradiation, the flow was circulated continuously to simulate the real situation of filtration. At the end of each exposure time, the HEPA filters were pulled out to extract for microorganism concentrations remaining in the filters. The same procedure was repeated for different durations using a new set of filters each time. The microorganism extraction follows the method of Wang et al. (2001). Briefly, the filter was cut into pieces and soaked in 25-mL distilled water. The beaker was stirred on a vortex for 2 min and sonicated in an ultrasonic bath for 15 min. An extracted suspension of 0.1 mL was drawn and spread on an agar plate and incubated at 37 °C, 18-24 hr for bacteria; 37 °C, 24-36

hr for *A. niger*; and 25 °C, 36-48 hr for *P. citrinum*. The media used were blood agar for *Staphylococcus*, TSA for *Bacillus*, and SDA for both *Aspergillus* and *Penicillium*.

The mechanical impact on microorganism viability due to the extraction procedures was also evaluated by dropping 0.1 mL of microbe suspension onto 25-mL distilled water. One was vortexed and sonicated, but the other was not. The suspensions were drawn to culture as stated above. The resultant survival ratio was $98.0 \pm 3.4\%$ for *S. epidermidis*, $93.1 \pm 5.2\%$ for *B. subtilis*, $93.9 \pm 1.9\%$ for *A. niger*, and $93.0 \pm 12.8\%$ for *P. citrinum*, indicating insignificant mechanical stress from the vortexing process. However, microbe recovery from blank HEPA filter (no TiO₂ coating) by this method was $94.8 \pm 4.5\%$ for *S. epidermidis*, $84.8 \pm 6.9\%$ for *B. subtilis*, $79.8 \pm 3.9\%$ for *A. niger*, and $73.8 \pm 18.9\%$ for *P. citrinum*. Due to an affinity to a hydrophilic catalyst surface, the recovery from the coated HEPA filter was reduced to $85.4 \pm 13.0\%$ for *S. epidermidis*, $72.9 \pm 8.4\%$ for *B. subtilis*, $70.0 \pm 5.4\%$ for *A. niger*, and $73.2 \pm 17.9\%$ for *P. citrinum*.

For the penetration study, two single stage impactors (SKC Inc., model Standard Biostage) equipped with the above mentioned agar plates were used to collect each species in front of and behind filters in both sections every ten minutes for one hour. The flow rate was 28.3 L/min and the sampling time was 1 min. The corresponding cut-size is 0.6 μm . Two levels of relative humidity were studied: $45 \pm 5\%$ and $75 \pm 5\%$, while temperature was fixed at $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Humidity was controlled by an ultrasonic humidifier (Microfrog, model T10), and its level was measured by using a digital hygrometer (Testo, model 400) at the filter's surface. Pressure drop across the filter was also monitored using a U-tube manometer under the face velocity in a range of 0.1-0.5 m/s. After finishing each set of experiments, UV-C irradiance was applied thoroughly for several hours to eliminate the remaining germs. An inside surface swab was performed to confirm the chamber sterilization. Statistics, T-test and the analysis of variance (ANOVA), were analyzed using the SPSS software version 9.

Results

Photocatalysis Efficiency

Microorganism disinfections by photocatalytic oxidation are shown in Figure 2. Since the pattern of microorganism disinfection was similar for high or low TiO₂ loading, or high or low irradiance intensity, only high TiO₂ loading with high irradiance intensity is illustrated. It can be seen that at $45 \pm 5\%$ RH, the disinfection pattern of *A. niger* was similar to that of *P. citrinum* and that the photocatalytic filter showed an obvious disinfection compared to those with no irradiance or coating ($p = 0.0001$). UV-A irradiance alone with no TiO₂ coating (or UV-A photolysis) had only a very small effect on both fungi. Statistically, the UV-A photolysis was significantly different from the coated filter in the dark section ($p = 0.047$ for *A. niger* and $p = 0.001$ for *P. citrinum*). Only 20% of photolysis disinfection occurred after 6-8 h of irradiance for *A. niger* and *P. citrinum*.

However, in *S. epidermidis*, UV-A photolysis on the uncoated HEPA filter demonstrated disinfection capability around 80% compared to that of 100% from the photocatalysis (UV-A+TiO₂) after 2 h of irradiation. The difference between photolysis and photocatalysis was significant ($p = 0.0001$); while in the dark section, the difference between coated and uncoated filters was insignificant ($p = 0.675$). A similar pattern is also seen in *B. subtilis* although photolysis was only 40%. Photolysis disinfection of *B. subtilis* was significantly different from the coated filter in the dark section ($p = 0.0001$); while in the dark section, the coated filter and uncoated filter yielded insignificantly different disinfection ($p = 0.273$).

When relative humidity increased to $75 \pm 5\%$, the efficacy of the photocatalytic filter on microorganism disinfection was dramatically reduced to around 20% for *A. niger* and around 40% for *P. citrinum* and *B. subtilis*. There was no statistical difference in coated filters between light and dark sections ($p = 0.078$) for *A. niger*. Nevertheless, for the case of *S.*

epidermidis, small reductions, 7-23%, were observed from photocatalysis at high humidity condition, while almost no changes were found at 2 h or longer from UV-A photolysis. Thus, both photocatalysis and photolysis were still effective for disinfecting *S. epidermidis* with insignificant difference ($p = 0.238$) between them. Overall, relative humidity had less effect on uncoated filters for microorganism disinfections ($p = 0.015$ for *A. niger*, $p = 0.800$ for *P. citrinum*, $p = 0.446$ for *S. epidermidis*, and $p = 0.019$ for *B. subtilis*), while on coated filters of high loadings, humidity showed strong effect on disinfection performance ($p = 0.0001$ for *A. niger*, *P. citrinum*, *B. subtilis*, and $p = 0.018$ for *S. epidermidis*).

Effects of TiO₂ loading and UV-A irradiance intensity

Figure 3 shows effects of TiO₂ loading (1870 ± 169 vs. 3140 ± 67 mg/m²) and irradiance intensity (0.85 ± 0.18 vs. 4.85 ± 0.09 mW/cm²) on microorganism disinfection. It appears that they yielded similar levels for microorganism disinfections. Statistically, the differences among those conditions were insignificant ($p = 0.248$ for *A. niger*, $p = 0.182$ for *P. citrinum*, $p = 0.093$ for *B. subtilis*, and $p = 0.517$ for *S. epidermidis*).

Pressure drop across filter

Table 1 illustrates pressure drops across HEPA filter at different face velocities and conditions. Change in pressure drop mainly depended on face velocity. At face velocity of 0.1 m/s, the pressure drops of low loading and high loading were insignificantly different from the uncoated filter ($p = 0.791$ for humidity of $45 \pm 5\%RH$). At face velocity of 0.3 m/s, the pressure drop of uncoated filter was significantly different from that of coated filter ($p = 0.0001$), but the difference between low loading and high loading was insignificant ($p = 0.08$). Similar result was found for face velocity of 0.5 m/s.

When humidity increased to $75 \pm 5\%RH$, pressure drops from uncoated filters were significantly different from coated filters for all face velocities ($p = 0.011$ for velocity of 0.1 m/s and $p = 0.0001$ for velocities of 0.3 and 0.5 m/s). However, pressure drops from low loading filters were not much different from high loading filters ($p = 0.1$ for velocity of 0.1 m/s, $p = 0.024$ for velocity of 0.3 m/s, and $p = 0.645$ for velocity of 0.5 m/s). Overall, a maximum pressure drop of 0.26 in. of water (from face velocity of 0.5 m/s) was found between a coated HEPA filter and an uncoated filter at humidity of $45 \pm 5\%$, and a maximum of 0.34 in. of water (from face velocity of 0.3 m/s) was found at humidity of $75 \pm 5\%$.

Penetration

Microorganism penetrations from regular and photocatalytic HEPA filters under relative humidity of $45 \pm 5\%$ and $75 \pm 5\%$ are shown in Figure 4. Less penetration was found from a photocatalytic filter (coat + light) in both humidity conditions for all microorganisms. It should be noted that the flow was not a single pass as it is used in the method of testing the arrestance and dust spot efficiencies. Penetration from this study should not be compared with the removal efficiency by that method.

Discussion

In this study, disinfection efficiency of 77% was achieved at 8 h of irradiation for *A. niger* at $45 \pm 5\%RH$ (Figure 2), similar to Vohra et al. (2006) that obtained less than 78% after 24 h in their conventional photocatalysis. For *P. citrinum*, 73% disinfection was observed at 8 h of irradiation and 83% was acquired from 10 h of irradiation. The 50% survival happened around 3 h of irradiation, which was similar to the study of Lin and Li (2003b) that reported 2.55 h for 50% inactivation and 8.35 h for 90% disinfection of *P. citrinum* using a 500- μ m

pore size commercial TiO₂ filter with black light (365 nm) with an intensity of 740 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Lin and Li (2003b) also pointed out that photolysis contributed less for *P. citrinum* while free radicals from photocatalysis had a stronger effect.

In case of *S. epidermidis*, a 80% disinfection from UV-A alone may result from formation of oxidative damage to cellular DNA induced by UV-A (Kühn et al., 2003). Since its qualitative and quantitative formation is prone to vary with the nature of the cells that contain different types and amount of photosensitizers (Cadet et al., 2005), the UV-A photolysis was not that important in both fungi. Our findings suggest that both fungi do not contain photosensitizers responsive to UV-A. In a dark section, the coated and uncoated filters gave similar results for *S. epidermidis* inactivation (around 40%). This should have been the nature of *S. epidermidis*, which is more sensitive and vulnerable to environmental stress than other microorganisms in this study. Meanwhile, *Bacillus subtilis*, an endospore forming bacterium, showed vulnerability to UV-A light although it was less than that of *S. epidermidis*. Kühn et al. (2003) reported that vegetative *B. subtilis* is strongly sensitive to UV-A and could be reduced by 7log₁₀ within 10 min without TiO₂ when using two 15 W UV-A lamps, but it was not possible to reduce the spores of *B. subtilis* by photocatalysis during 60 min. Unfortunately, their light intensity was not mentioned. Pal et al. (2007) showed that when *B. subtilis* was irradiated with UV-A alone (intensity of 4.28 mW/cm²) its inactivation rate constant was 0.1279 min⁻¹. When the bacteria were immobilized on a catalyst filter (TiO₂ loading of 234-840 mg/m²), the inactivation rate constant was 0.1263-0.1979 min⁻¹, demonstrated that UV-A could directly damage *B. subtilis* by exciting photosensitive molecules within its cells. Pal et al. (2007) also observed 20% of *B. subtilis* inactivation in 2 h from fluorescent irradiation without TiO₂. In our study, *B. subtilis* were reduced to around 40% from UV-A photolysis and around 80% from photocatalysis after 5 h of irradiation at 45±5% RH. As the spores are exposed to PCO, their hydrophobic exteriors are mineralized and external changes of spores occur, allowing the hydrophilic interiors interact with photocatalytically produced radicals which finally lead to the cell inactivation (Griest et al., 2002).

In terms of the effect of humidity, it was clearly seen that the fungal disinfection dropped more than half when humidity was increased. Goswami et al. (1997) also reported that at 50%RH, there was complete inactivation of *Serratia marcescens* in about 13 h, but at higher humidity (85%), 10% of the organisms survived. They explained that high humidity may induce reactivation of organisms, or water may occupy most of the TiO₂ sites; hence, less available sites for microorganisms remained. This agrees with Li et al. (2005) who explained that although the presence of water vapor enhances a promotion of hydroxyl radical formations, at certain humidity level, the radical formations would not increase with increasing water vapor and even decrease due to the occupation of the adsorption site on the TiO₂ surface. Consequently, high humidity decreases the efficiency. Another explanation was from Peccia et al. (2001) that an increase in relative humidity may change biopolymers interior to the cell or change protein structure which affects the DNA repair enzyme, including cell wall characteristics, and hence could protect the microorganism from desiccation and/or attenuate incident UV irradiation. Therefore, microorganisms better survived when humidity increased. However, they stated that this cell-water vapor interaction tends to be organism dependent given the variable physiology of each species. For the case of *S. epidermidis*, only small reductions, 7-23%, were observed from photocatalysis at high humidity condition compared to other microorganisms tested, while almost no changes were found at 2 h or longer from UV-A photolysis.

When TiO₂ loading and irradiance intensity were increased, insignificant increases in disinfection efficacy were observed. A possibility is that the UV-A light has a limited depth of penetration. Hence, a thicker TiO₂ layer will not yield more radicals as only the surface layer can be exposed to the UV light. The study of Pal et al. (2007) investigated the effect of TiO₂ loading from 234 to 8662 mg/m² on acetate membrane filter and found that some

bacteria showed inactivation rate constant with increasing TiO₂ loading up to 2300 mg/m². Loadings higher than ~2300 mg/m² could not increase disinfection efficiency of *B. subtilis* anymore and even decreased the disinfections of *Microbacterium* sp., *Paenibacillus* sp, *Microbacteriaceae* str., and *Pseudomonas fluorescences*. They reported the optimum loading to be between 511-1666 mg/m².

In terms of increasing UV-A irradiation intensity, the inactivation did not increase for all selected microorganisms. This also agrees with the study of Pal et al. (2005) who observed only a small increase in inactivation rate constant of *B. subtilis* when the UV-A intensity was increased. They found the rate constant of 0.2427 min⁻¹ when the bacteria were irradiated at 1.82 mW/cm² and slightly increased to 0.2443 min⁻¹ when the irradiation increased to 4.28 mW/cm². The irradiation intensity was even increased to 6.28 mW/cm², but the rate constant was still found as 0.2479 min⁻¹ when using TiO₂ loading of 867 mg/m²; unfortunately, clearly discussion was not made in their article. However, Zhao et al. (2009) conducted the experiment to observe the effect of UV-A irradiance on *B. cereus* photocatalysis and found that the maximum rate of photocatalytic inactivation was at 3 mW/cm²; beyond this intensity, a negligible inactivation was observed. In our system, low UV-A irradiance was enough to yield maximum production. Higher UV-A irradiance, however, lead to a competition between UV-A and photocatalysis for dissolved O₂, which is needed for generating strong oxidant species. Because UV-A is more effective in consuming O₂, photocatalytic inactivation is not enhanced although the irradiance intensity is much increased. Besides, UV-A at high irradiance can generate superoxide radicals which can combine with hydroxyl radicals or holes at the TiO₂ surface, reducing the microorganism inactivation effectiveness (Zhao et al., 2009).

Conclusion

The TiO₂ coated HEPA was demonstrated to be capable of eliminating 60-80% of airborne spore-forming bacteria and fungi retained on HEPA filter using photocatalytic reactions. The catalyst filter performed better at 45±5% humidity than at 75±5%. TiO₂ loading of 1870±169 mg/m² was enough to inactivate the microorganisms under the irradiance intensity within the TLV limit, with no need to further increase TiO₂ loading and/or light intensity. Maximum increase in pressure drop of the coated HEPA filter compared to the uncoated filter was around 0.26-0.34 in. of water, depending on the face velocity, which should not affect the HVAC system. Moreover, the microorganism penetrations were reduced when the filter was coated. The breeding ground problem of HEPA filters as well as indoor air quality problem, hence, can be lessened with the application of photocatalytic HEPA filters.

Acknowledgements

This projected was supported by the Thailand Research Fund under the contract number MRG5080123. The authors deeply appreciate Mrs. Carole Madsen for spending time on editing the original manuscript.

References

- ACGIH (2007) *TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices*, Cincinnati OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists
- ASHRAE (2003) *HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics*, Georgia, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Cadet, J., Sage, E., and Douki, T. (2005) Ultraviolet radiation-mediated damage to cellular DNA, *Mutation Research*, **571**, 3-17.

- Foarde, K.K., Myers, E.A., Hanley, J.T., Ensor, D.E., and Roessler, P.F. (1999) Development of a method for measuring single-pass bioaerosol removal efficiencies of a room air cleaner, *Aerosol Sci. Technol.*, **30**, 223-234.
- Goswami, T.K., Hingorani, S.K., Greist, H., Goswami, D.Y., and Block, S.S. (1999) Photocatalytic system to destroy bioaerosols in air, *J Adv Oxid Technol*, **4**, 185-188.
- Goswami, D.Y., Trivedi, D.M., and Block, S.S. (1997) Photocatalytic disinfection of indoor air, *Transactions of the ASME*, **119**, 92-96.
- Greist, H.T., Hingorani, S.K., Kelly, K., and Goswami, D.Y. (2002) Using scanning electron microscopy to visualize photocatalytic mineralization of airborne microorganisms. In: *Proceedings of Indoor air 2002*, California, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, pp. 712-717.
- Griffiths, W.D., Bennett, A., Speight, S., and Parks, S. (2005) Determining the performance of a commercial air purification system for reducing airborne contamination using model micro-organisms: a new test methodology, *J. Hosp. Infect*, **61**, 242-247.
- Goswami, D.Y. (2003) Decontamination of ventilation system using photocatalytic air cleaning technology, *J. Solar Energy Eng*, **125**, 359-365.
- Kühn, 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.
- Keller, V., Keller, N., Ledoux, M.J., and Lett, M-C. (2005) Biological agent inactivation in a flowing air stream by photocatalysis, *Chem. Commun*, 2918-2920.
- Li, F.B., Li, X.Z., Ao, C.H., Lee, S.C., and Hou, M.F. (2005) Enhanced photocatalytic degradation of VOCs using Ln^{3+} - TiO_2 catalysts for indoor air purification, *Chemosphere* **59**, 787-800.
- Li, Y., Leung, P., Yao, L., Song, Q.W., and Newton, E. (2006) Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles, *J. Hosp Infect* **62**, 58-63.
- Li, Y. and Wu, C.Y. (2006) Role of moisture in adsorption, photocatalytic oxidation, and reemission of elemental mercury on a SiO_2 - TiO_2 nanocomposite, *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 6444-6448.
- Lin, C-Y. and Li, C-S. (2003a) Effectiveness of titanium dioxide photocatalyst filters for controlling bioaerosols, *Aerosol Sci. Technol.*, **37**, 162-170.
- Lin, C-Y. and Li, C-S. (2003b) Inactivation of microorganisms on the photocatalytic surfaces in air, *Aerosol Sci. Technol.*, **37**, 939-946.
- 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, *J. Photochem and Photobiol A: Chem*, **186**, 335-341.
- Pal, A., Min, X., Yu, L.E., Pehkonen, S.O., and Ray, M.B. (2005) Photocatalytic inactivation of bioaerosols by TiO_2 coated membrane, *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, **3**: Article A45, 1-15.
- Peccia, J., Werth, H.M., Miller, S., and Hernandez, M. (2001) Effects of relative humidity on the ultraviolet induced inactivation of airborne bacteria, *Aerosol Sci. Technol*, **35**, 728-740.
- Simmons, R.B., Price, D.L., Noble, J.A., Crow, S.A., and Ahearn, D.G. (1997) Fungal colonization of air filters from hospitals, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **58**, 900-904.
- Jankowska, E., Reponen, T., Willeke, K., Grinshpun, S.A., and Choi, K-J. (2000) Collection of fungal spores on air filters and spore reentrainment from filters into air, *J Aerosol Sci.*, **31**, 969-978.
- Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A., and Block, S.S. (2005) Enhanced photocatalytic inactivation of bacterial spores on surfaces in air, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*, **32**, 364-370.
- Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A., and Block, S.S. (2006) Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air, *Appl. Catal. B: Environ.*, **32**, 364-370.
- Wamer, W.G., Yin, J-J., and Wei, R.R. (1997) Oxidative damage to nucleic acids photosensitized by titanium dioxide, *Free Rad. Biol. & Med.*, **23**, 851-858.

- Wang, Z., Reponen, T., Grinshpun, S.A., Górný, R.L., and Willeke, K. (2001) Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection, *Aerosol Sci.*, **32**, 661-674.
- Wolfrum, E.J., Huang, J., Blake, D.M., Maness, P-N., Huang, Z., and Fiest, J. (2002) Photocatalytic oxidation of bacteria, bacterial and fungal spores, and model biofilm components to carbon dioxide on titanium dioxide-coated surfaces, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 3412-3419.
- Yu, K-P., Lee, G. W-M., Lin, S-Y., and Huang, C.P. (2008) Removal of bioaerosols by the combination of a photocatalytic filter and negative air ions, *J. Aerosol Sci.*, **39**, 377-392.
- Zhao, J., Krishna, V., Hua, B., Moudgil, B., Koopman, B. (2009) Effect of UVA irradiance on photocatalytic and UVA inactivation of *Bacillus cereus* spores, *J. Photochem and Photobiol B: Biol*, **94**, 96-100.

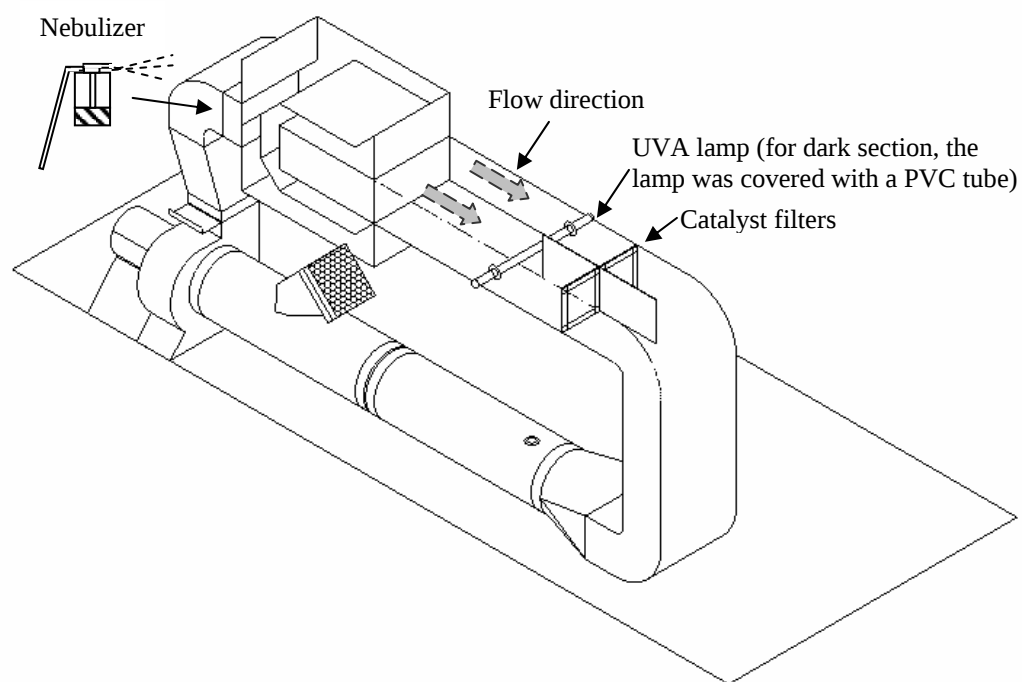


Fig. 1 Schematic of the testing chamber

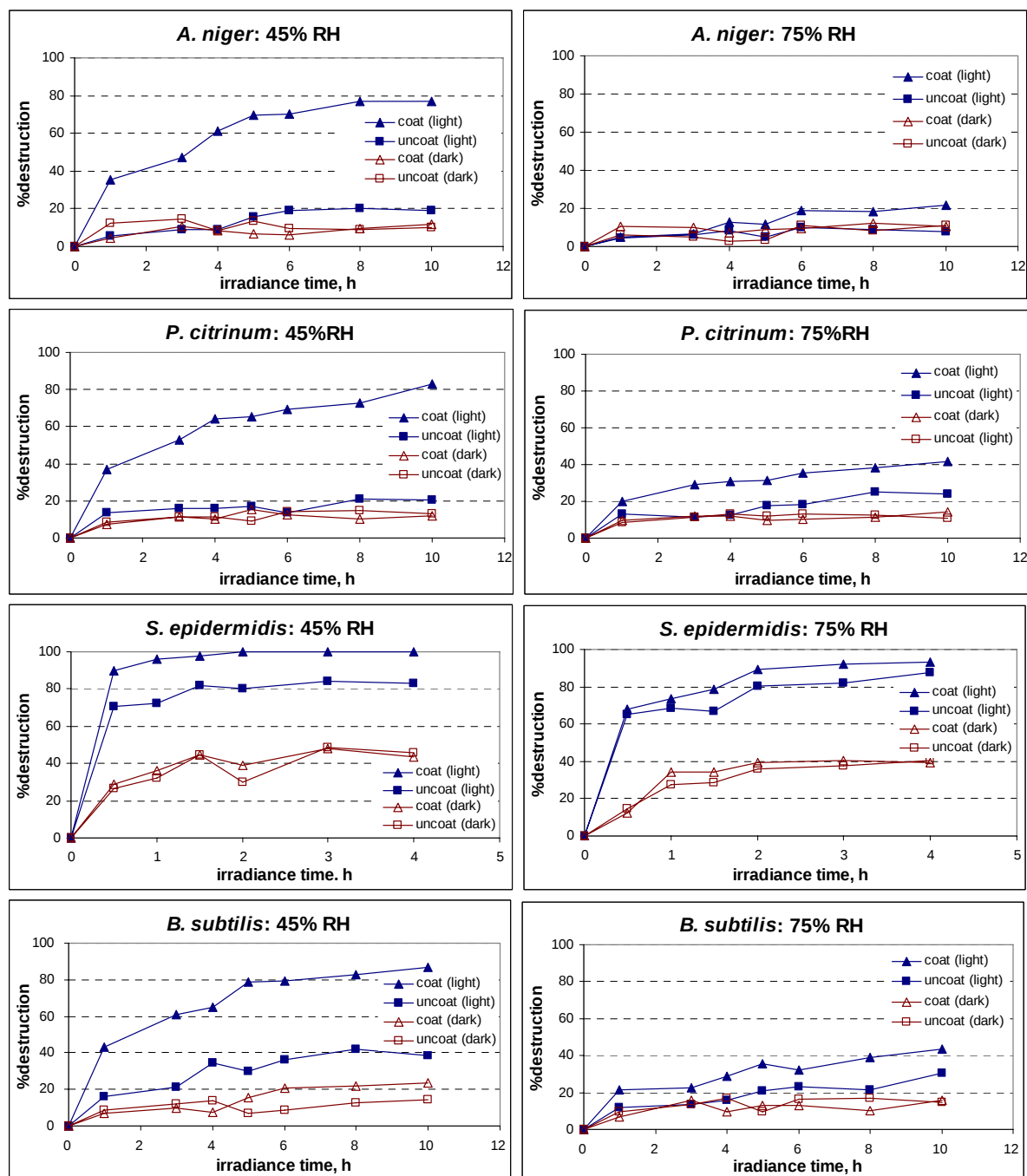


Fig. 2 Efficacy of regular and photocatalytic HEPA filters on microbe disinfections at relative humidities of $45 \pm 5\%$ and $75 \pm 5\%$.

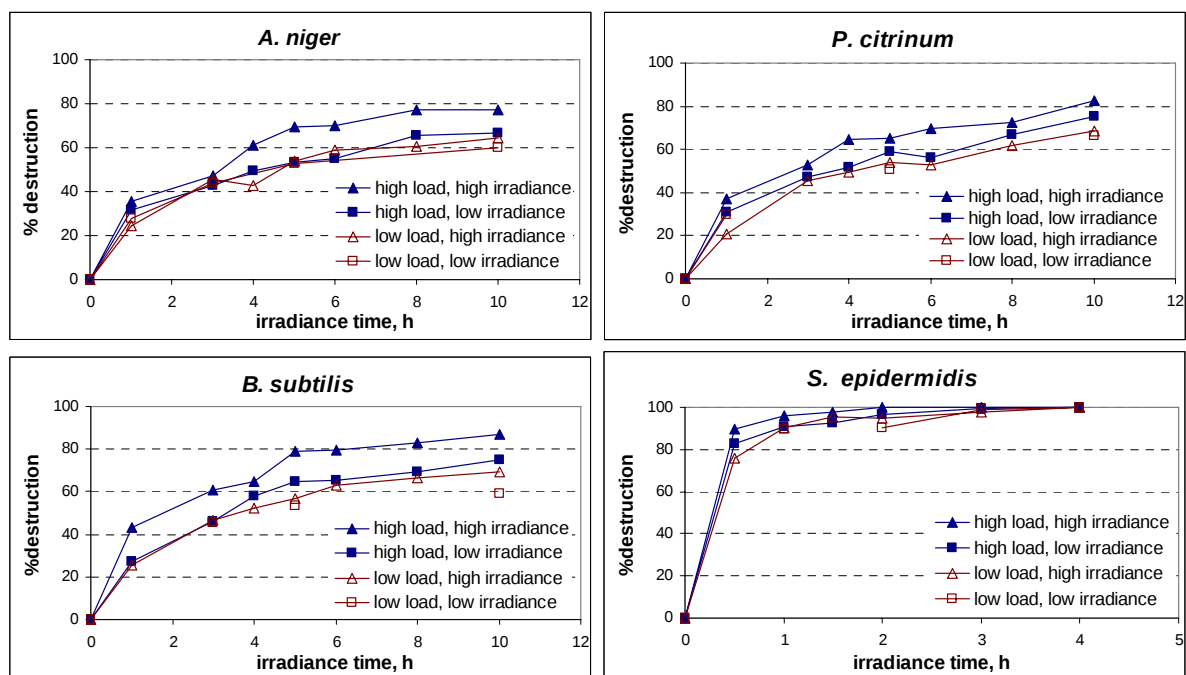


Fig. 3 Effect of photocatalytic oxidation conditions on microorganism disinfections

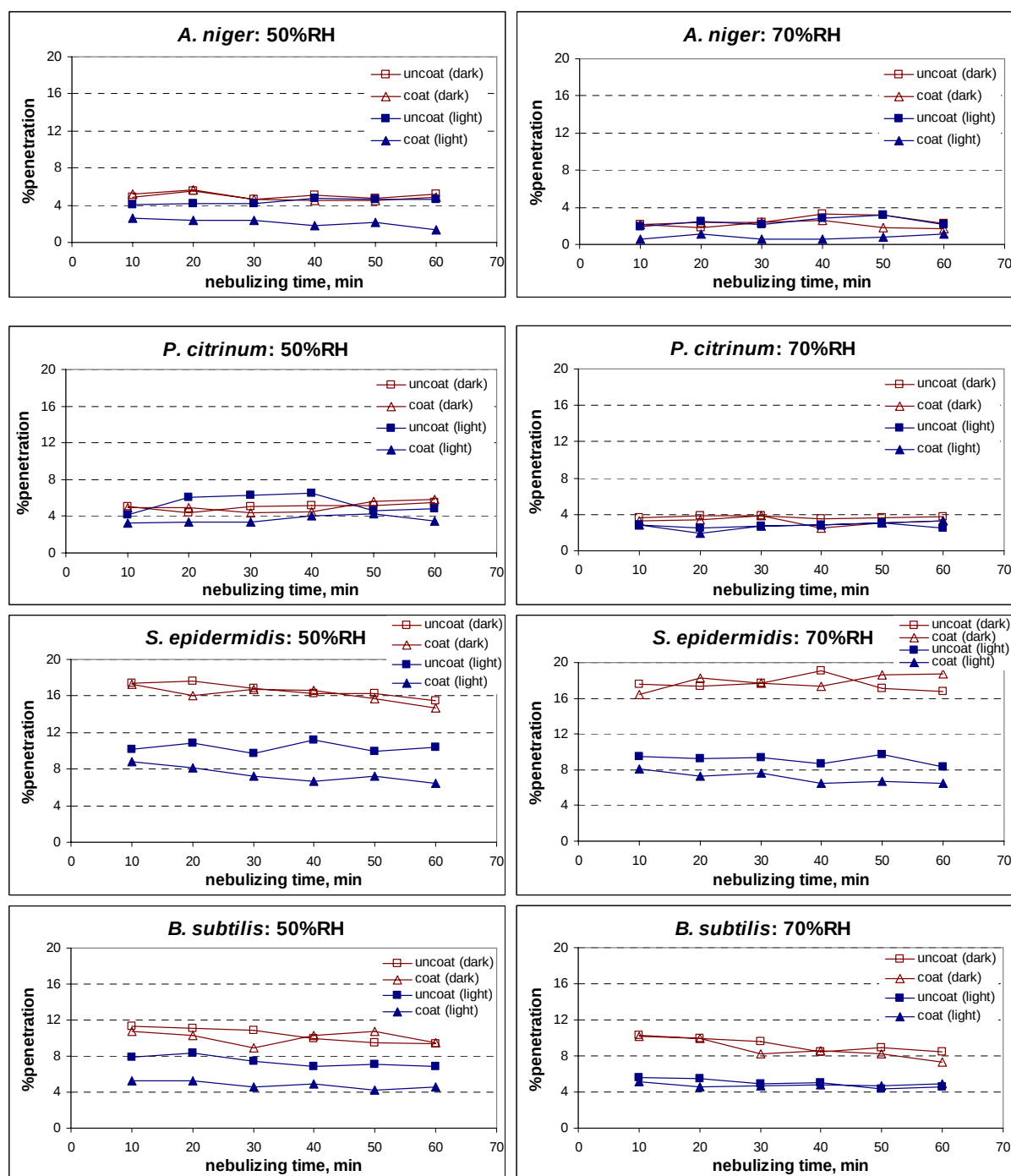


Fig. 4 Microorganism penetrations at different relative humidity

Table 1 Pressure drop (inch of water) across HEPA filter

Filters	Face velocity (m/s)	Pressure drop at 45%±5%		Pressure drop at 75%±5%	
		Dark section mean±SD	Light section mean±SD	Dark section mean±SD	Light section mean±SD
Uncoated HEPA	0.1	1.00±0.00	0.97±0.06	1.17±0.06	1.13±0.06
	0.3	2.00±0.10	2.00±0.00	2.10±0.00	2.13±0.06
	0.5	2.97±0.06	3.00±0.00	3.10±0.10	3.13±0.06
Coated HEPA, low loading	0.1	0.97±0.06	0.97±0.06	1.23±0.06	1.23±0.06
	0.3	2.23±0.06	2.20±0.10	2.43±0.06	2.47±0.06
	0.5	2.97±0.06	2.97±0.06	3.30±0.06	3.30±0.06
Coated HEPA, high loading	0.1	1.00±0.00	0.93±0.06	1.27±0.06	1.30±0.00
	0.3	2.23±0.00	2.20±0.60	2.53±0.06	2.50±0.00
	0.5	3.23±0.06	3.23±0.06	3.35±0.07	3.37±0.06

บทความสำหรับการเผยแพร่

การศึกษาการพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของโรงพยาบาลด้วยนาโนเทคโนโลยีนี้ ใช้วิธีการเคลือบแผ่นกรองด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิด A เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสขึ้น ปฏิกิริยาจะเป็นตัวการทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่มีอำนาจในการทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ที่มาเกาะติดบนแผ่นกรอง ดังนั้น ในระหว่างที่มีการกรองอากาศ จุลินทรีย์ก็就会被ทำลายจนไม่มีโอกาสเจริญเติบโตและแพร่กระจายออกจากแผ่นกรองไปปนเปื้อนอากาศที่ผ่านการกรองแล้วได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *Staphylococcus epidermidis* และ *Bacillus subtilis* และเชื้อราอีก 2 ชนิด คือ *Aspergillus niger* และ *Penicillium citrinum* ซึ่งเป็นเชื้อที่พบมากที่สุดในบรรยากาศของโรงพยาบาล โดยศึกษาในสภาพความชื้นปานกลางและความชื้นสูง และในสภาพที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายโทลูอินและไซลีนอยู่ร่วมด้วย หลังจากนั้นนำแผ่นกรองดังกล่าวไปใช้กับเครื่องฟอกอากาศ เพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียรวมออกจากกระแสอากาศของโรงพยาบาล โดยเปรียบเทียบจำนวนแบคทีเรียรวมก่อนที่จะเปิดเครื่องฟอกอากาศ กับจำนวนแบคทีเรียที่พบในระหว่างที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ และจำนวนที่พบหลังจากปิดเครื่องฟอกอากาศไปแล้ว

ผลการศึกษาพบว่า ที่ความชื้นปานกลาง ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัด *S. epidermidis* ได้ 100% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง และสามารถกำจัด *B. subtilis* ได้ 87% เมื่อใช้เวลาการฉายแสง 10 ชั่วโมง และกำจัด *A. niger* ได้ 77% รวมถึงกำจัด *P. citrinum* ได้ 83% เมื่อใช้เวลาการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน กรณีที่ไม่มีการฉายแสง ในระยะเวลาเท่าๆกัน พบว่าการกำจัด *S. epidermidis* มีเพียง 39% *B. subtilis* มี 24% ขณะที่ *A. niger* และ *P. citrinum* กำจัดได้เท่าๆกัน คือ 12% แสดงให้เห็นว่า แผ่นกรองที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่ติดอยู่บนแผ่นกรองได้มากกว่าแผ่นกรองปกติที่ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนแผ่นกรองลดลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ กำจัด *S. epidermidis* ได้เพียง 89% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนการกำจัด *B. subtilis*, *A. niger* และ *P. citrinum* เหลือเพียง 44%, 22% และ 42% ตามลำดับจากการฉายแสงนาน 10 ชั่วโมงเช่นเดิม

ในส่วนของผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์บนแผ่นกรอง พบว่าการมีโทลูอินหรือไซลีนอย่างใดอย่างหนึ่งอยู่ร่วมด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง แต่ไม่สำคัญทางสถิติ เฉพาะที่มีทั้งโทลูอินและไซลีนอยู่พร้อมๆกันเท่านั้น จึงมีผลทำให้การกำจัด *Bacillus subtilis* บนแผ่นกรองลดลง 10-31% ส่วนจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆแม้ว่าพบการกำจัดที่ลดลง (0.7-20%) แต่ก็ยังคงไม่สำคัญทางสถิติอยู่นั่นเอง

สุดท้าย การนำแผ่นกรองไปประยุกต์ใช้กับเครื่องฟอกอากาศเพื่อกำจัดแบคทีเรียรวมในโรงพยาบาล พบว่าทันทีที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ จำนวนแบคทีเรียรวมภายในห้องนั้นลดจำนวนลงอย่างทันที (สูงสุด 78%) และหลังจากที่ปิดเครื่องฟอกอากาศแล้ว จำนวนแบคทีเรียก็กลับมาทวีจำนวนขึ้นดังเดิม ซึ่งการลดลงของแบคทีเรียจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนตั้งต้นที่มีอยู่ก่อนเปิดเครื่องฟอกอากาศ ระยะห่างจากเครื่องฟอกอากาศ และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างนั้นด้วย