

การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของเครื่องฟอกอากาศชนิดต่างๆ

Airborne Microorganism Removals Using Air Purifier

ยุพรัตน์ หลิมมงคล¹ รจฤดี โชติกาวิรินทร์¹ ชุติชัยวัลย์ รัชญญศิรินนท์¹ พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์² และภารดี ช่วยบำรุง^{3*}

Yuparat Limmongkon¹ Rotruedee Chotigawin¹ Chuleewan Thunyasiriron¹ Pipat Sribenjalux²

and Paradee Chuaybamroong^{3*}

¹นักศึกษาลัทธิศูทรปริญญาตรีบัณฑิต สาขาสาธารณสุขศาสตร ม.ขอนแก่น ขอนแก่น 40002

²ศูนย์วิจัยและพัฒนาการตรวจวินิจฉัยทางห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

^{3*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.ธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121

โทรศัพท์ : 02-564-4440-44 ต่อ 2212, โทรสาร: 02-564-4480, E-mail : paradee@tu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ทดสอบการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ (*Staphylococcus epidermidis*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, *Penicillium citrinum*) ด้วยเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการต่างกัน 3 แบบ คือ แบบที่ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แบบไฟฟ้าสถิต และแบบรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยการพ่นจุลินทรีย์เข้าไปในห้องจำลองขนาด 2×2×2 เมตรแล้วทำการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศด้วยแอนเดอร์สัน อิมแพคเตอร์เพื่อเปรียบเทียบจำนวนจุลินทรีย์ในช่วงที่ยังไม่ได้เปิดเครื่องฟอกอากาศ กับช่วงที่เปิดเครื่องฟอก และช่วงหลังจากปิดเครื่องฟอกไปแล้ว อย่างละ 3 ชั่วโมง พบว่า เครื่องฟอกอากาศแบบโฟโตคะตะไลซิสและแบบไฟฟ้าสถิตมีความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศที่ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 76-98 และ 80-99 ตามลำดับ) ส่วนแบบรังสีอัลตราไวโอเล็ตนั้นกำจัดจุลินทรีย์น้อยกว่าชนิดอื่น (ร้อยละ 39-89) การศึกษาจึงมีการเพิ่มแผ่นกรองอนุภาคขั้นต้นเพื่อดักจับอนุภาคก่อนฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่าการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 54-95 (ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้และชนิดของจุลินทรีย์)

คำสำคัญ : เครื่องฟอกอากาศ; การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ; ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส; ไฟฟ้าสถิต; รังสีอัลตราไวโอเล็ต

Abstract

Airborne microorganism (*Staphylococcus epidermidis*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, and *Penicillium citrinum*) removals using a photocatalytic air purifier, electrostatic air purifier, and ultraviolet air purifier were compared in this study. The experiment was conducted in a 2×2×2 m chamber by injecting each microorganism into the chamber. The microorganism concentration was collected using an Andersen impactor. The concentration before turning-on the air purifier was compared to that during turning-on and that during turning-off periods. The triplicate results revealed that the PCO and ESP air purifiers yielded the highest efficiency (76-98% and 80-99%, respectively) while the ultraviolet air purifier showed the lowest efficiency (39-89%). The pre-filter was thus added to the ultraviolet air purifier to confine the

microorganisms and the ultraviolet light was irradiated onto it. It was found that the removal efficiency was increased to 54-95%, depending on duration time and microorganism types.

Keywords : air purifiers ; airborne microorganism removal; photocatalysis; electrostatic; ultraviolet

บทนำ

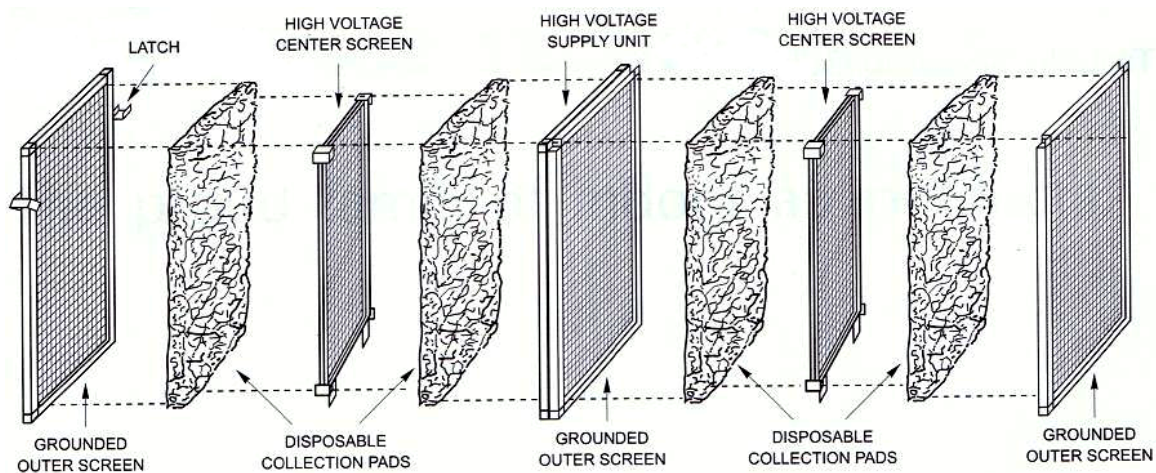
ประชาชนในปัจจุบันใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ในอาคารมากถึงร้อยละ 90 ของเวลาทั้งหมด [1] โอกาสที่จะสัมผัสกับมลพิษภายในอาคาร รวมถึงมลพิษจากภายนอกที่รั่วไหลเข้ามาบนเรือนอากาศภายในจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าอาคารนั้นไม่มีการระบายหรือการเจือจางมลพิษอย่างเหมาะสมและพอเพียง สิ่งก็ตามมาก็คือผลกระทบต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว เช่น การระคายเคืองต่อเยื่อเมือก จมูก โรคหอบหืด รวมทั้งส่งผลต่อสภาวะในการทำกิจกรรมต่างๆภายในอาคาร เกิดความอ่อนเพลีย ขาดสมาธิในการทำงาน ฯลฯ คุณภาพอากาศภายในอาคารจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องการความใส่ใจ โดยประเทศไทยพบความชุกของการเกิดกลุ่มอาการป่วยเหตุอาคาร (Sick building syndrome, SBS) อยู่ในช่วงร้อยละ 25 -26 [2] ใกล้เคียงกับระดับที่องค์การอนามัยโลกกำหนดว่าสามารถก่อให้เกิดปัญหาและควรต้องมีการปรับปรุงแก้ไข ทั้งนี้จุลินทรีย์ในอากาศจัดเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการเกิดกลุ่มอาการป่วยเหตุอาคารดังกล่าว [3] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การติดเชื้อในโรงพยาบาล (Nosocomial diseases) ที่ส่งผลต่อการสูญเสียทั้งทางตรง (เช่น ค่ารักษาพยาบาลที่สูงขึ้น) และทางอ้อม (เช่น การสูญเสียทรัพยากรมนุษย์ การพักผ่อนที่ใช้เวลานาน) [4] แนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยป้องกันและควบคุมการสะสมมลพิษทางอากาศก็คือการเลือกใช้เครื่องฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพพื้นที่การใช้งาน

อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกอากาศที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดนั้นเป็นสิ่งที่ยากเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเครื่องฟอกอากาศแต่ละชนิดนั้นก็มีการใช้เทคโนโลยีที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป เช่น มีการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อทำลายสารพันธุกรรมของเซลล์จุลินทรีย์ [5] มีการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสซึ่งสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลที่สามารถออกซิไดซ์ผนังเซลล์จุลินทรีย์จนทำให้ตายในที่สุด [6] หรือมีการใช้ไฟฟ้าสถิตที่ดักจับอนุภาคด้วยการชาร์จประจุให้ เป็นต้น การออกแบบรูปทรงและรูปแบบการใช้งานจึงต้องแตกต่างกันไปด้วย การจะเปรียบเทียบว่าชนิดใดดีกว่าชนิดใดในลักษณะที่ตัวแปรต่างๆ ไม่ได้ถูกควบคุมไว้ให้เหมือนกันจึงเป็นสิ่งที่ยากลำบาก ในการศึกษาวิจัยพยายามที่จะควบคุมรูปร่าง ลักษณะ และอัตราการดูดอากาศของเครื่องฟอกอากาศให้คงที่เท่ากันทุกครั้ง โดยใช้โครงของเครื่องฟอกอากาศโครงเดียวกันในการศึกษาการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ โดยเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องฟอกอากาศที่ต่างกัน 3 แบบ คือ แบบที่ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แบบไฟฟ้าสถิต และแบบรังสีอัลตราไวโอเล็ต รวมไปถึงแบบรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีแผ่นกรองอนุภาคขั้นต้น (pre-filter) อยู่ร่วมด้วย ผลที่ได้จะช่วยสร้างความกระจ่างและให้ข้อมูลที่ เป็นข้อเท็จจริงเพื่อผู้บริโภคสามารถนำไปใช้พิจารณาประกอบการตัดสินใจในการเลือกบริโภคสินค้าให้ตรงกับความต้องการต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องฟอกอากาศที่ใช้ นำมาจากชนิดอิเล็กโทรนิคแอร์ฟิวเตอร์ รุ่น PT-600 ของบริษัทอัลไพน์ จำกัด นำมาดัดแปลง โดยนำแผ่นกรองอิเล็กโทรนิคสำหรับวิธีไฟฟ้าสถิตออก แล้วเปลี่ยนเป็นแผ่นกรองโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นกรอง HEPA

ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (ปริมาณ 3140 mg/m²) แล้วฉายด้วยแสง UV-A (3.2 mW/cm²) ด้วยหลอดไฟแบล็คไลท์ (Sylvania F36W-T8/BLB) จำนวน 4 หลอด เพื่อใช้เป็นเครื่องฟอกอากาศชนิดโฟโตคะตะไลซิส (PCO) ส่วนการเปลี่ยนเป็นชนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UVC) ทำโดยใช้หลอดไฟแบล็คไลท์ (Sylvania Germicidal lamp 20W) ที่ให้รังสี UV-C จำนวน 4 หลอด ความเข้มแสง 3.7 mW/cm² บรรจุไว้แทน โดยชนิดไฟฟ้าสถิต (ESP) นั้น ใช้ชุดแผ่นกรองอิเล็กทรอนิกส์ที่มีมาในตัวเครื่องอยู่แล้ว ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นตาข่ายลวดซึ่งด้านบนมีเข็มสำหรับรับกระแสไฟฟ้าแรงสูงขนาด 5500-6700 โวลต์ จากอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า (High voltage supply unit) แผ่นตาข่ายนี้ถูกประกบด้านซ้าย-ขวาด้วยแผ่นรองรับอนุภาคที่ทำจากใยแก้วจำนวน 2 คู่ (รูปที่ 1) อัตราการดูดอากาศอยู่ที่ 418 ft³/min ซึ่งมาจากการวัดความเร็วลมที่ช่องทางเข้าของอากาศ (Inlet) ด้วย Hot wire anemometer (Airflow Developments Ltd., model TA5-Flexible probe) คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้า

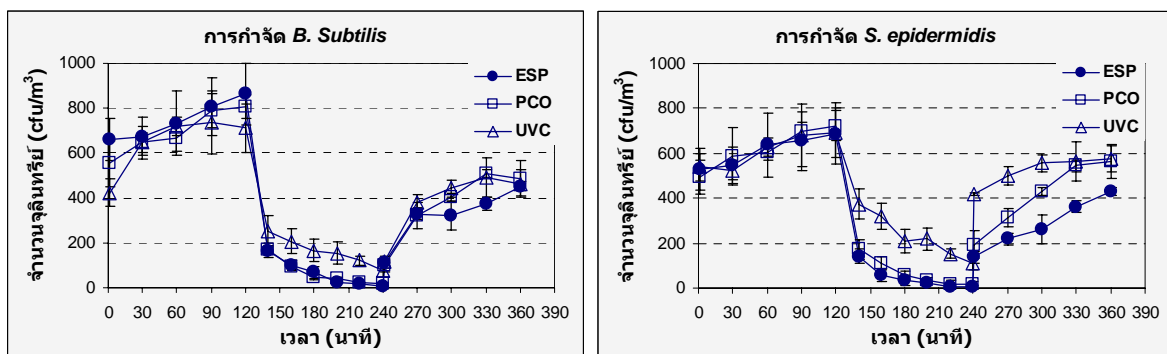


รูปที่ 1 องค์ประกอบของชุดแผ่นกรองอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องฟอกอากาศ (อนุเคราะห์ภาพโดยบริษัท อัลไพน์ จำกัด)

การศึกษาการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศกระทำใน chamber ขนาด 2×2×2 เมตร จุลินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* สำหรับเป็นตัวแทนของแบคทีเรีย และ *Aspergillus niger* กับ *Penicillium citrinum* สำหรับเป็นตัวแทนของเชื้อรา เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจัดซื้อจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยในรูปแบบของผงแห้ง รายละเอียดของการเตรียมเชื้อและการเพาะเลี้ยงสามารถศึกษาได้ในยูพรีตันและคณะ [7] การทดสอบยืนยันชนิดของเชื้อทั้งก่อนและระหว่างการทดลองใช้วิธี Conventional method สำหรับเชื้อแบคทีเรีย [8,9] และวิธี Microscopic examination by slide culture method สำหรับเชื้อรา [10, 11] การทดลองเริ่มจากการใช้ nebulizer (BGI, Incorp., model MRE-CN 25) พ่นเชื้อจุลินทรีย์ที่ละชนิดเข้าไปใน chamber นาน 6 ชั่วโมง โดยเปิดพัดลมในห้องให้เกิดการผสมตัวอย่างทั่วถึง ซึ่งใน 2 ชั่วโมงแรกยังไม่มีการเปิดเครื่องฟอกอากาศแต่มีการเก็บตัวอย่างอากาศทุกๆ 30 นาทีที่ระดับความสูง 1.5 เมตรด้วย Single-stage impactor (SKC, Inc., model Biostage) นาน 3 นาที ตามวิธีการของ NIOSH method 0800 [12] จากนั้นจึงเปิดเครื่องฟอกอากาศและเก็บตัวอย่างต่อเนื่องทุก 30 นาทีอีก 2 ชั่วโมงก่อนปิดเครื่องฟอก และยังคงเก็บตัวอย่างต่อไปอีก 2 ชั่วโมง โดยตลอด 6 ชั่วโมงที่ทำการศึกษานั้น nebulizer ยังคงพ่นจุลินทรีย์อยู่ตลอดเวลา อุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดลองอยู่ที่ 25±1°C และ 55±5%RH ตามลำดับ ทั้งหมดทำการศึกษา 3 ชั่วโมงในแต่ละชนิดของเครื่องฟอกอากาศ ที่ใช้กระบวนการใช้เครื่องฟอกอากาศชนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับแผ่นกรองอนุภาคขั้นต้น (Pre-filter) มีการศึกษาซ้ำเดียว

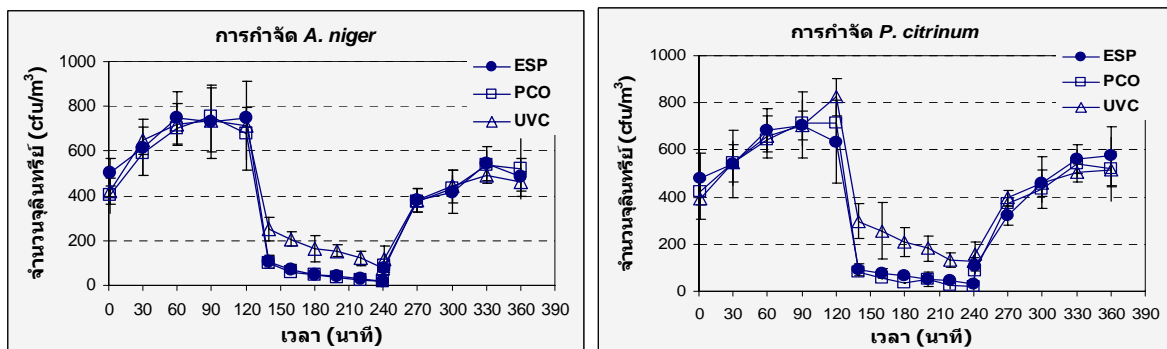
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* และ *S. epidermidis* จากการใช้เครื่องฟอกอากาศ 3 ชนิด (PCO, ESP และ UVC) แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งผลที่นำเสนอมาจากค่าเฉลี่ย 3 ชั่วโมง โดยเวลา 0-120 นาทีเป็นสภาวะที่ไม่ได้เปิดเครื่องฟอกอากาศ ส่วนเวลาที่ 121-240 นาทีเป็นสภาวะที่เปิดเครื่องฟอกอากาศ และเวลาที่ 241 นาทีเป็นต้นไปนั้นปิดเครื่องฟอกอากาศแล้ว จากรูปจะเห็นได้ว่า เครื่องฟอกอากาศ ESP และ PCO ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *B. subtilis* และ *S. epidermidis* ที่ใกล้เคียงกัน โดยความต่างต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value = 0.97 และ 0.58 ตามลำดับ) ขณะที่ UVC ให้ประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า ESP และ PCO อย่างเห็นได้ชัด (p-value = 0.00 และ 0.01 ตามลำดับ) โดยจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่พบใน 3 ชั่วโมงอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันจนความต่างต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญ (p-value = 0.93-0.99 สำหรับ *B. subtilis* และ p-value = 0.62-0.95 สำหรับ *S. epidermidis*) จากการใช้เครื่องฟอกอากาศ 3 ชนิด



รูปที่ 2 จำนวนแบคทีเรียที่พบก่อนเปิด-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศทั้ง 3 ชนิด

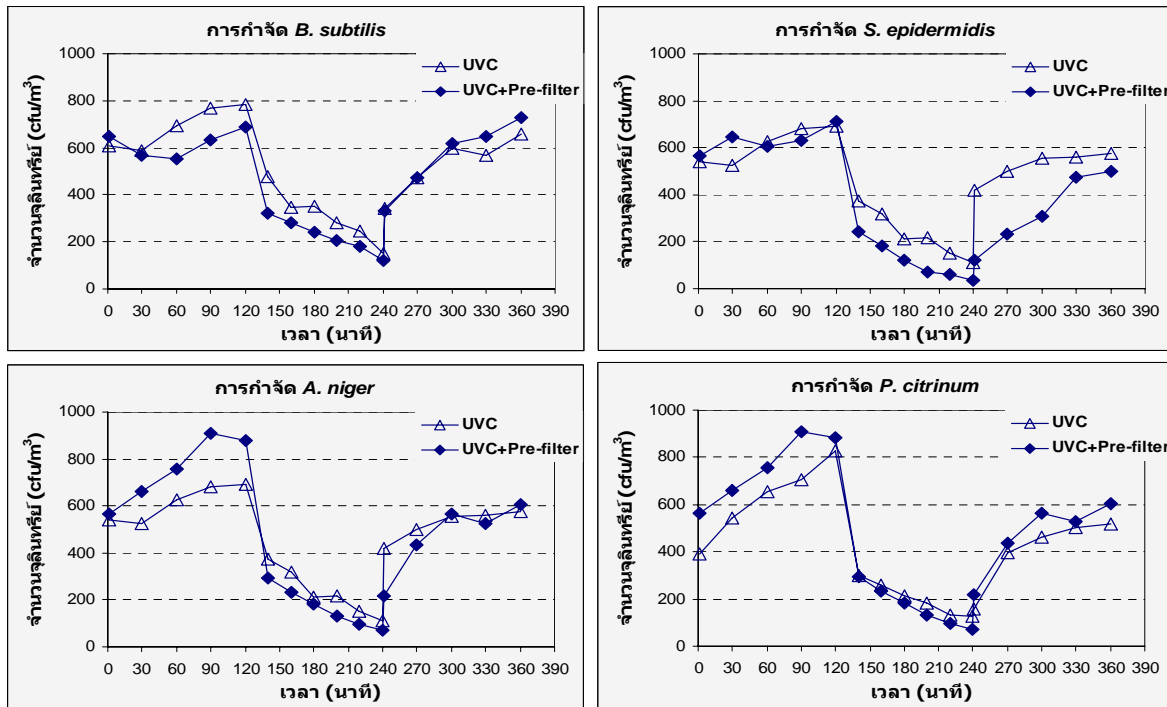
ในกรณีของเชื้อราทั้ง *A. niger* และ *P. citrinum* (รูปที่ 3) พบว่าเครื่องฟอกอากาศ PCO และ ESP สามารถกำจัดเชื้อราทั้งสองได้ใกล้เคียงกัน (p-value= 0.84 และ 0.55 ตามลำดับ) แต่เครื่องฟอกอากาศชนิด UVC มีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า PCO และ ESP อย่างชัดเจน (p-value= 0.01 และ 0.00 ตามลำดับ) โดยจำนวนเชื้อราที่พบใน 3 ชั่วโมงจากการใช้เครื่องฟอกอากาศ 3 ชนิดนั้นอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน (p-value = 0.20-0.86 สำหรับ *A. niger* และ p-value = 0.09-0.78 สำหรับ *P. citrinum*)



รูปที่ 3 จำนวนเชื้อราที่พบก่อนเปิด-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศชนิดต่างๆ

ทั้งนี้ การที่ UVC ให้ประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าชนิดอื่นนั้น เป็นไปได้ว่าอัตราการดูดอากาศที่ 418 ft³/min ทำให้จุลินทรีย์เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเกินกว่าที่รังสี UVC จะกำจัดได้ทัน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใส่แผ่นกรองชั้นต้นหรือ Pre-filter เข้า

ไปในเครื่องฟอกอากาศแล้วฉายแสง UVC ลงบนแผ่นกรองนั้นอีกที ผลการศึกษาพบว่า การกำจัดจุลินทรีย์นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้รังสี UVC แต่เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำจัด *S. epidermidis* ที่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value= 0.03) ขณะที่จุลินทรีย์ชนิดอื่นที่แม้จะสังเกตเห็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น แต่ความแตกต่างนั้นยังไม่มีความสำคัญในเชิงสถิติ แสดงว่าแผ่นกรองชั้นต้นที่ใช้ยังไม่เพียงพอในการดักจับอนุภาคเอาไว้ได้อาจต้องพิจารณาแผ่นกรองที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่านี้



รูปที่ 4 จำนวนจุลินทรีย์ก่อนเปิด-ระหว่างเปิด-และหลังปิดเครื่องฟอกอากาศชนิด UVC ที่ไม่มี และ มีแผ่นกรองชั้นต้น

เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยเครื่องฟอกอากาศชนิดต่างๆ ในรูปของร้อยละ พบว่า เครื่องฟอกอากาศชนิด ESP สามารถกำจัด *B. subtilis*, *S. epidermidis* และ *A. niger* ได้ดีกว่าเครื่องฟอกอากาศชนิดอื่นๆ ขณะที่การใช้เครื่องฟอกอากาศชนิด PCO สามารถกำจัดเชื้อรา *P. citrinum* ได้ดีที่สุดแต่ความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value= 0.43) เมื่อเปรียบเทียบกับชนิด ESP ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การลดลงของจุลินทรีย์เมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศชนิด ESP, PCO, UVC และ UVC ร่วมกับ Pre-filter

เครื่องฟอกอากาศ	เปิดเครื่อง ฟอกอากาศนาน (นาที)	การลดลงของจุลินทรีย์ในอากาศ (%)			
		<i>B.subtilis</i>	<i>S.epidermidis</i>	<i>A.niger</i>	<i>P.citrinum</i>
ชนิด ESP	20	80.9	79.5	86.1	85.5
	40	88.4	91.9	90.4	88.0
	60	92.1	94.8	93.6	89.9
	80	97.2	96.5	94.2	91.8

	100	98.2	98.8	95.8	93.1
	120	99.1	99.4	97.9	95.0
ชนิด PCO	20	79.0	76.1	85.2	88.8
	40	88.1	84.5	91.2	92.2
	60	94.1	92.3	92.9	95.0
	80	95.1	95.1	94.7	92.7
	100	97.0	97.3	96.5	96.7
	120	98.3	97.8	97.7	97.2
ชนิด UVC	20	39.1	45.9	64.6	63.8
	40	56.0	53.9	71.0	68.8
	60	54.9	69.6	76.8	74.5
	80	64.1	68.4	78.5	78.0
	100	68.9	77.9	83.1	83.9
	120	80.5	83.8	89.3	84.4
ชนิด UVC +Pre-filter	20	53.5	65.9	64.9	66.7
	40	59.0	74.6	84.1	73.8
	60	64.5	83.1	82.7	79.4
	80	70.0	89.9	88.1	85.0
	100	73.6	91.6	90.8	89.1
	120	82.5	95.0	92.1	91.8

ในแง่ของจุลินทรีย์ชนิดใดถูกกำจัดได้ง่ายหรือยากกว่ากัน การศึกษานี้พบว่าเครื่องฟอกอากาศ ESP สามารถกำจัด *S. epidermidis* ออกจากกระแสดอากาศได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ *B. subtilis* และ *A. niger* โดย *P. citrinum* นั้นถูกกำจัดได้ยากที่สุด ทั้งนี้ *S. epidermidis* นั้นเป็น vegetative bacteria ชนิดแกรมบวกที่ไม่ทนทานในสิ่งแวดล้อม [13] สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่าเครื่องฟอกอากาศชนิด ESP สามารถกำจัดเชื้อ *S. epidermidis* ได้ดีกว่า *B. subtilis*, *A. niger* และ *P. citrinum* จากจำนวน 35,311-33,616 cfu/m³ ให้เหลือน้อยกว่า 500 cfu/m³ ได้ภายในเวลา 30-40 นาที [7] ส่วนเครื่องฟอกอากาศชนิด PCO สามารถกำจัด *B. subtilis* ได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ *S. epidermidis* และ *A. niger* โดย *P. citrinum* นั้นถูกกำจัดได้ยากที่สุด ขณะที่เครื่องฟอกอากาศชนิด UVC กำจัดเชื้อราได้มากกว่าเชื้อแบคทีเรีย โดยกำจัด *A. niger* ได้มากกว่า *P. citrinum* และสามารถกำจัดแบคทีเรีย *S. epidermidis* ได้ดีกว่า *B. subtilis* และสุดท้ายเครื่องฟอกอากาศชนิด UVC ร่วมกับ Pre-filter สามารถกำจัด *S. epidermidis* ได้มากกว่าเชื้อชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value=0.03) รองลงมาได้แก่ *P. citrinum* และ *A. niger*

Barron EJ, Pfaller MA, Tenover FC, Tenover FC, Yolken RH, ed. *Manual of Clinical Microbiology* 7th. ed. Washington, DC: ASM, 1999: 357-69.

[12] National Institute for Occupational Safety and Health. Bioaerosol sampling (indoor air) [online] 2009 [cited 2009 June 29]. Available from: <http://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdfs/0800.pdf>.

[13] Lin, C.Y., and Li, C.S. 2003. Inactivation of microorganisms on the photocatalytic surfaces in air. *Aerosol Science and Technology*, 37: 939-46.
