แบบสรุปผู้บริหาร และแบบสรุปย่อการวิจัย

การควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยนาโนเทคโนโลยี

ภารดี ช่วยบำรุงและคณะ

สิงหาคม 2555

แบบสรุปผู้บริหาร

Executive Summary

---

1. **รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย/แผนงานวิจัย**

1.1 ชื่อเรื่อง

(ภาษาไทย) การควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยนาโนเทคโนโลยี

(ภาษาอังกฤษ) Indoor Air Quality Control by Using Nanotechnology

1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย

1. นางภารดี ช่วยบำรุง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.ธรรมศาสตร์ โทรศัพท์ 02-564-4440 ต่อ 2212 โทรสาร 02-564-4480
2. นายพิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์ คณะเทคนิคการแพทย์ ม.ขอนแก่น โทรศัพท์/โทรสาร 043-202086
3. นายสิทธิสุนทร สุโพธิณะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โทรศัพท์ 02-564-6560 ต่อ 4234 โทรสาร 02-564-6447
4. นายเสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โทรศัพท์ 02-564-6560 ต่อ 4582 โทรสาร 02-935-5849
5. นางสาววรรณา เลาวกุล ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม โทรศัพท์ 02-577-4182 ต่อ 1305 โทรสาร 02-577-1138
6. นางสาวชุลีวัลย์ ธัญญศิรินนท์ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (นานาชาติ) สาขาสาธารณสุขศาสตร์ ม.ขอนแก่น โทรศัพท์ 089-573-6136
7. นางสาวกฤษณียา ศังขจันทรานนท์ วิทยาลัยชุมชนบุรีรัมย์ โทรศัพท์ 044-615128 โทรสาร 044-615129

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำวิจัย

ได้รับงบประมาณประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 งบประมาณที่ได้รับ 1,180,000 บาท
ระยะเวลาทำวิจัยตั้งแต่ ตุลาคม 2553 ถึง กันยายน 2554

2. **สรุปโครงการวิจัย**

การศึกษานี้ต้องการพัฒนาคุณภาพอากาศภายในอาคารด้านการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูก ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนหรือง่ายต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวคือหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่นำมาเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสซึ่งให้อนุมูลอิสระที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคและสลายสารอินทรีย์ได้ รูปแบบของการศึกษาใช้การพ่นจุลินทรีย์แต่ละชนิด หรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดเข้าไปในอุปกรณ์ทดลองที่มีหลอดไฟเคลือบบรรจุอยู่ แล้วทำการศึกษาจำนวนของจุลินทรีย์หรือทำการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์

ระเหยง่ายที่บริเวณด้านหน้าก่อนหลอดไฟ เปรียบเทียบกับจำนวนจุลินทรีย์หรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทางด้านหลังของหลอดไฟหรือที่ผ่านหลอดไฟออกมาแล้ว ในการศึกษามีการทดลองใช้สารยึดติดชนิดต่างๆเพื่อช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะติดบนหลอดไฟได้ดีและสามารถกำจัดสารมลพิษได้ดียิ่งขึ้น มีการศึกษาว่าอนุมูลอิสระมีโอกาสที่จะแพร่กระจายออกมาจากหลอดไฟหรือไม่ ตลอดจนศึกษาว่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีผลต่อความสามารถของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มากน้อยเพียงใด ซึ่งผลการวิจัยพบว่าหลอดไฟที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีอนุมูลอิสระแพร่กระจายออกมาน้อยมาก จนไม่น่าจะมีอันตรายต่อผู้ใช้งาน และสามารถกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้เป็นอย่างดี โดยอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วลมมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งานไม่มากนัก จึงเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการจะควบคุมหรือแก้ไขปัญหาจุลินทรีย์ในอากาศและสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ ไม่ว่าจะเป็นโรงเรียน โรงพยาบาล สถานประกอบการต่างๆ ฟาร์มสัตว์ ฯลฯ อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ควรกระทำต่อไปคือการพัฒนาการเคลือบที่ช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ติดแน่นทนทานกว่าวิธีที่ใช้ในการศึกษานี้ ตลอดจนศึกษาอายุการใช้งาน และศึกษาผลผลิตที่ไม่พึงประสงค์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้

3. บทคัดย่อภาษาไทยและบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

การศึกษานี้เป็นโครงการวิจัยภายใต้กรอบการวิจัยของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2553 ด้านนาโนเทคโนโลยี ในหัวข้อย่อยการพัฒนานาโนเทคโนโลยีเพื่อสุขภาพและการแพทย์ ซึ่งคณะผู้วิจัยทำการศึกษาการกำจัดสารมลพิษภายในอากาศ อันได้แก่จุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารด้วยการเคลือบวัสดุนาโน (ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25) ด้วยการพ่นสเปรย์บนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ (ให้แสงในความยาวคลื่นหลัก 365 นาโนเมตร) และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (ให้แสงในความยาวคลื่น 400-600 นาโนเมตร) ในความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสสำหรับกำจัดจุลินทรีย์ (*Staphylococcus epidermidis*, *Escherichia coli*, *Aspergillus niger*, *Bacillus subtilis*) และสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่มของโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน โดยศึกษาหาสารยึดติด (binder) ที่เหมาะสมในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนหลอดไฟ ศึกษาการเกิดและการแพร่กระจายอนุมูลอิสระจากหลอดไฟเคลือบฯ ศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสในการกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายดังกล่าว รวมถึงมีการนำหลอดไฟไปกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์และศาลเจ้าอีกด้วย

ผลการศึกษาพบว่า สารยึดติดที่เหมาะสมในการกำจัดจุลินทรีย์คือ 3% B1000 กำจัดจุลินทรีย์ได้สูงสุด 66-99% (ขึ้นกับชนิดจุลินทรีย์) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และกำจัดได้ 46-90% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ส่วนสารยึดติดที่เหมาะกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายคือ 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe เคลือบบนแผ่นใยแก้วก่อน แล้วจึงพันบนหลอดไฟอีกที สามารถสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้สูงสุด 76-94% (ขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และ 56-74% เมื่อใช้หลอดไฟ

ฟลูออเรสเซนต์ ในแง่ของการเกิดอนุมูลอิสระพบว่า หลอดไฟ UVA ที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสมีอนุมูลอิสระที่ผิวหลอดมากกว่าค่า background ของสารเคมีที่ใช้ 0.3-14% แต่เมื่อดูดอากาศห่างออกจากหลอดไฟไปเรื่อยๆ อนุมูลอิสระลดลงจนเท่ากับค่า background ของสารเคมีที่ใช้ที่ระยะ 1 เซนติเมตร ส่วนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พบว่ามีอนุมูลอิสระไม่แตกต่างจากค่า background ของสารเคมีที่ใช้ การศึกษานี้พบว่าอุณหภูมิ 25-31 ◦C ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างในประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสในการกำจัดจุลินทรีย์และการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย แต่ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มจาก 50 ± 5% เป็น 80 ± 5% มีผลในการลดประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ 9-56% (ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และ 9-25% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ และลดประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายลงไป 42-53% (ขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และลดลงไป 18-43% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ส่วนความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นมีผลในการลดประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิส และเมื่อนำหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ไปทดสอบการกำจัดเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ พบว่า ไอระเหยของเบนซีนลดลง 34-100% ขณะที่การทดสอบที่ศาลเจ้าพบว่าเบนซีนจากควันธูปลดลง 36-86% และการใช้งานหลอดไฟเคลือบฯ ซ้ำๆกัน 27-54 ชั่วโมง ยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ไม่ต่างไปจากเดิม

This project was conducted under the 2010 research framework of the National Research Council of Thailand in a category of nanotechnology and sub-topic of nanotechnology development for health and medical system. The researchers studied the air pollutant removals which were microorganisms and volatile organic compounds (VOCs), in groups of toluene, xylene and benzene, by spraying 5% wt/vol titanium dioxide (Degussa P-25) onto UVA black-light lamps (wavelength of 365 nm) and fluorescent white-light lamps (wavelengths of 400-600 nm) to create photocatalysis on the lamp surfaces. The appropriate binder for TiO_2 coating, the free radical dispersing from the lamp surface, and the effects of temperature, humidity, and air velocity on photocatalysis efficacy were explored in this study. The TiO_2-coated lamps' performance was also investigated in the motorcycle repair shop and the spiritual house for benzene removal.

The results revealed that the appropriate binder for microorganism removal was 3% B1000. It could inactivate 66-99% of microorganisms (depending on species) when applied to UVA black-light lamps and 46-90% when applied to fluorescent lamps. For VOCs removal, 3% D3005 plus 0.1% Fe was the appropriate one, but it should have coated onto glass fiber before wrapped around the lamps. By this manners, the VOCs degradation was in a range of 76-94% (depending on VOCs type) when using UVA balck-light lamps and was 56-74% when using fluorescent lamps. In terms of free radical dispersing, it was found that the concentration of free radical at UVA lamp surfaces was more than that found in the

chemical used (or background concentration) in a range of 0.3-14%. However, at a distance of 1 cm away from the UVA lamp surfaces, the free radical concentration from the lamps was about the same as that found in background concentration. In case of fluorescent lamps, there were no differences between free radical concentration at the lamp surfaces and that in the background. For temperature effect, increase in temperature of 25 ◦C to 31 ◦C did not affect the photocatalysis capability in microorganism and VOCs removals. In contrast, increase in humidity from 50 ± 5% to 80 ± 5% reduced the efficacy of microorganism removal 9-56% (depending on species) when using coated UVA black-light lamps and reduced 9-25% when using coated fluorescent lamps. Also, VOCs degradations were reduced 42-53% (depending on VOCs type) when using coated glass fiber wrapping around UVA black-light lamps and were reduced 18-43% when using coated glass fiber wrapping around fluorescent lamps. Similarly, increase in air velocity showed decrease in photocatalysis efficacy. When UVA black-light lamps which wrapped around with coated glass fiber were taken to the motorcycle repair shop and spiritual house to test their efficacy, it was found that benzene in the shop reduced 34-100% and benzene in the incense stick reduced 36-86%, respectively. Moreover, the laboratory tests revealed that repeating usage of the coated lamps for 27-54 hours still gave the same efficacy for both microorganism removal and VOCs degradation.

แบบสรุปย่อการวิจัย

---

1. **รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย/แผนงานวิจัย**

1.1 ชื่อเรื่อง

(ภาษาไทย) การควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยนาโนเทคโนโลยี

(ภาษาอังกฤษ) Indoor Air Quality Control by Using Nanotechnology

1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย

1. นางภารดี ช่วยบำรุง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.ธรรมศาสตร์ โทรศัพท์ 02-564-4440 ต่อ 2212 โทรสาร 02-564-4480
2. นายพิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์ คณะเทคนิคการแพทย์ ม.ขอนแก่น โทรศัพท์/โทรสาร 043-202086
3. นายสิทธิสุนทร สุโพธิณะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โทรศัพท์ 02-564-6560 ต่อ 4234 โทรสาร 02-564-6447
4. นายเสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โทรศัพท์ 02-564-6560 ต่อ 4582 โทรสาร 02-935-5849
5. นางสาววรรณา เลาวกุล ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม โทรศัพท์ 02-577-4182 ต่อ 1305 โทรสาร 02-577-1138
6. นางสาวชุลีวัลย์ ธัญญศิรินนท์ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (นานาชาติ) สาขาสาธารณสุขศาสตร์ ม.ขอนแก่น โทรศัพท์ 089-573-6136
7. นางสาวกฤษณียา ศังขจันทรานนท์ วิทยาลัยชุมชนบุรีรัมย์ โทรศัพท์ 044-615128 โทรสาร 044-615129

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำวิจัย

ได้รับงบประมาณประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 งบประมาณที่ได้รับ 1,180,000 บาท

ระยะเวลาระยะเวลาทำวิจัยตั้งแต่ ตุลาคม 2553 ถึง กันยายน 2554

2. **ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย**

สภาพความเป็นอยู่และการใช้ชีวิตของคนในสังคมไทยปัจจุบัน มีความเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากอดีตเป็นอย่างมาก เช่นเดียวกับลักษณะที่อยู่อาศัยและอาคารสถานที่ ที่เปลี่ยนจากเรือนไม้โปร่ง หลังคาสูง มีหน้าต่างระบายอากาศรอบด้าน ไปเป็นอาคารปิดมิดชิดใช้เครื่องปรับอากาศแทนอากาศธรรมชาติ ซึ่งปัญหาที่ตามมาก็คือ ความเจ็บป่วยที่เกิดจากการหายใจเอาสารมลพิษที่สะสมอยู่ภายในอาคาร เช่น ฝุ่นขนาดเล็ก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โอโซน ฟอร์มาลดีไฮด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย ธาตุกัมมันตรังสีเรดอน และจุลินทรีย์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส รวมถึงสารก่อภูมิแพ้ทั้งหลาย เช่น ไรฝุ่น ขน/รังแคของสัตว์เลี้ยงภายในบ้าน เป็นต้น โดยปัจจุบันบุคคลส่วนใหญ่ใช้ชีวิตอยู่ภายในอาคารมากถึง 90% ของเวลาทั้งหมด (EPA, 1997) หากสถานที่นั้นไม่มีการจัดการควบคุมหรือกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้องและเพียงพอ ปัญหา

ดังกล่าวก็จะยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ และแม้ว่าอาคารสถานที่บางแห่งอาจมีการระบายอากาศ วิธีการดังกล่าวก็ยังคงเป็นเพียงการเจือจางความเข้มข้นของสารมลพิษด้วยการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาหมุนเวียนแทนที่เท่านั้น ไม่ใช่การกำจัดสารมลพิษแต่อย่างใด (Goswami, 2003) และยิ่งถ้าอากาศจากภายนอกเป็นอากาศที่มีการปนเปื้อน การแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าวก็จะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใดอีกด้วย

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีหนึ่งที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคารก็คือการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิส ปฏิกิริยาดังกล่าวมาจากการใช้สารโฟโตคะตะลิสต์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบลงบนตัวกลางใดๆแล้วกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 385 นาโนเมตรจนทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($^{\circ}OH$) และ ซุเปอร์ออกไซด์ไอออน ($^{\circ}O_2^-$) ขึ้นมา ซึ่งทั้งสองตัวนี้จัดเป็นตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ที่รุนแรงมีคุณสมบัติในการสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Zhao and Yang, 2003) ตลอดจนสามารถทำลายผนังเซลของจุลินทรีย์ ทำให้องค์ประกอบที่สำคัญรั่วไหลออกมาภายนอกจนจุลินทรีย์เหล่านั้นตายได้ในที่สุด (Ibànez et al., 2003) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีผู้นำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสจากไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่างๆมากมาย เช่น แผ่นกระเบื้องปูห้องน้ำ กระจกเงา ม่านหน้าต่าง สีทาบ้าน เครื่องฟอกอากาศ เช่น Hodgson et al. (2007) ใช้เครื่องฟอกอากาศที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงานโดยพบว่าภายในเวลาน้อยกว่า 1 วินาที ปฏิกิริยาสามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ได้มากกว่า 20% จนถึง 80% หรือการศึกษาของ Sleiman et al. (2008) ที่ทดสอบกับโทลูอีน ขนาดความเข้มข้น 20-400 ppb_v พบว่า ปฏิกิริยาสามารถกำจัดโทลูอีนได้ถึง 90-100% ส่วนกรณีของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศนั้น Kudo et al. (2007) ใช้แผ่นกรองที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 70 m^2/g แล้วฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบล็คไลท์ (ความยาวคลื่น 365 nm ความเข้มแสง 4 mW/cm^2) นาน 90 นาทีในห้องขนาด 31.3 ลูกบาศก์เมตร พบว่าสามารถกำจัด Influenza virus A, *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ได้ 99%, 99.95% และ 99.94% ตามลำดับ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสจะถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และจุลินทรีย์กันอย่างกว้างขวาง แต่คณะผู้วิจัยกลับพบว่าการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสกับหลอดไฟนั้นยังคงมีอยู่น้อยมาก โดยมีเพียงการศึกษาของ Lee et al. (2004) ที่ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟแบล็คไลท์ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดเชื้อ *Giardia lamblia* ในน้ำ และ Fujimaki et al. (2004) ที่ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดจุลินทรีย์ในอากาศและกลิ่นเท่านั้น นอกจากนี้ การศึกษาในเรื่องของอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสก็ยังคงไม่ครบถ้วนสมบูรณ์เท่าที่ควร เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่อนุมานว่าอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีอายุสั้นและเกิดอยู่บนผิวหน้าของตัวกลางที่เกิดปฏิกิริยาเท่านั้น จุลินทรีย์และสารอินทรีย์ต่างๆจำเป็นต้องมาสัมผัสกับอนุมูลอิสระที่ผิวของตัวกลางโดยตรง ประสิทธิภาพของการกำจัดจึงจะเกิดขึ้นได้ (Maness et al., 1999) คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะตรวจสอบรูปแบบลักษณะของการเกิด-การกระจายตัวของอนุมูลอิสระจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และ

หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีการใช้แบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD) มาช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีสิ่งกีดขวางภายในห้อง ตลอดจนมีการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศและการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆ เช่น โทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ในสภาวะที่มีความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นแตกต่างกันไป โดยแบ่งเป็นโครงการวิจัยย่อย 2 โครงการ ได้แก่ การตรวจสอบอนุมูลอิสระจากการใช้หลอดไฟเคลือบนาโนไทเทเนียสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ และ การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศด้วยหลอดไฟเคลือบนาโนไทเทเนีย ซึ่งในแผนงานวิจัยนี้เลือกใช้หลอดไฟเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สะดวกและง่ายต่อการใช้ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ราคาถูก ไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงวิถีการปฏิบัติงานใดๆทั้งสิ้น คณะผู้วิจัยจึงเชื่อมั่นว่าโครงการนี้น่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมทั้งในเชิงวิชาการและประโยชน์สาธารณะได้เป็นอย่างมาก โดยจะช่วยลดความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงานจากการได้รับมลพิษอากาศภายในอาคารและช่วยลดอัตราการเจ็บป่วยให้น้อยลง จัดเป็นโครงการนำร่องที่สามารถนำไปขยายผลให้เกิดประโยชน์ได้อีกเป็นจำนวนมาก

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาตำแหน่งการเกิดและการแพร่กระจายอนุมูลอิสระจากผิวหน้าของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมและสิ่งกีดขวางภายในห้องที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษารูปแบบหรือวิธีการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมและสิ่งกีดขวางภายในห้องที่แตกต่างกัน
3. เพื่อทดสอบความสามารถของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ
4. เพื่อศึกษาปัจจัย (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม) ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

4. ระเบียบวิธีการวิจัย

การศึกษานี้ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ชนิดให้แสงขาวและชนิดแบล็คไลท์เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่ผสมด้วยสารยึดติด (binder) ชนิดต่างๆ การศึกษาอนุมูลอิสระจากหลอดไฟใช้การติดหลอดไฟเคลือบบนเพดานกล่องทดลองขนาดเล็ก และดูดอากาศที่ผิวหน้าของหลอดไฟที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระเข้ามายังอุปกรณ์ impinger ที่ขวดหนึ่งบรรจุสารละลาย ABTS และอีกขวดหนึ่งบรรจุสารละลาย DMPD อนุมูลอิสระดังกล่าวจะออกซิไดซ์สารละลาย ABTS ให้กลายเป็น $ABTS^{\circ+}$ ซึ่งมีสีเขียวเข้ม และออกซิไดซ์ DMPD ให้กลายเป็น $DMPD^{\circ+}$ ซึ่งมีสีชมพูม่วง ความเข้มของสีจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนอนุมูลอิสระในสารละลาย จากนั้นมีการเติมสารละลาย Trolox ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐานในความเข้มข้นต่างๆกันลงไป โดย Trolox จะไปทำลายอนุมูลอิสระในสารละลาย ทำให้สีจางหายไป (ใช้การ

วัดค่า absorbance ของสารละลายด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer) สีที่จางหายไปจนหมดสิ้นหมายถึงการทำลายอนุมูลอิสระอย่างสมบูรณ์ หรือเรียกว่าเกิด 100% inhibition ความเข้มข้นของ Trolox ที่ก่อให้เกิด 100% inhibition แสดงถึงจำนวนของอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในสารละลายด้วย (รายงานความเข้มข้นในรูปของ Trolox equivalent concentration) จากนั้นมีการใช้แบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD) มาอธิบายรูปแบบการเกิดและการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระทั้งในสภาพที่มีและไม่มีสิ่งกีดขวางภายในห้อง การศึกษาความสามารถของหลอดไฟเคลือบในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศกระทำโดยใช้การพ่นจุลินทรีย์ทีละชนิดเข้าไปใน chamber ทดลองที่มีหลอดไฟเคลือบเสียบขวางอยู่ แล้วดูดอากาศที่บริเวณก่อนหน้าหลอดไฟเคลือบ และหลังหลอดไฟเคลือบมาเพาะหาจำนวนเปรียบเทียบ จุลินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ *Staphylococcus epidermidis* ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกที่พบมากในอากาศและก่อให้เกิดการติดเชื้อจากการสร้าง biofilm บนอุปกรณ์การแพทย์ที่สอดใส่เข้าสู่ร่างกาย และ *Escherichia coli* สำหรับเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ รวมถึงสปอร์ของเชื้อรา *Aspergillus niger* ซึ่งพบมากในอากาศและมีความทนทานสูง และสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ที่เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกที่สร้างสปอร์ซึ่งกำจัดได้ยากอีกชนิดหนึ่ง ภายใต้สภาวะของการมีอุณหภูมิที่ต่างกัน (25 ± 3 °C และ 35 ± 3 °C) ความชื้นที่ต่างกัน (50 ± 5% และ 80 ± 5%) และความเร็วลมที่แตกต่างกัน (0.05, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที)

สำหรับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ การศึกษานี้ใช้การพ่นไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ทีละชนิดเข้าไปใน chamber ทดลอง ให้มีความเข้มข้นในระดับที่ยอมให้มีได้ของ NIOSH และใช้เครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้นอัตโนมัติชนิด direct reading วัดความเข้มข้นที่บริเวณก่อนหน้าหลอดไฟเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่พบหลังหลอดไฟทุกๆ 10 นาที นาน 3 ชั่วโมงเพื่อสังเกตการสลายตัว โดยมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ (25 ± 3 °C เปรียบเทียบกับ 35 ± 3 °C) ความชื้นสัมพัทธ์ (50 ± 5% เปรียบเทียบกับ 80 ± 5%) และความเร็วลม (0.01, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที) ที่มีผลต่อความสามารถของหลอดไฟเคลือบฯ ดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการนำหลอดไฟเคลือบฯ ไปทดสอบการใช้งานกับสถานที่จริงในร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ที่มีไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และศาลเจ้าที่มีควันธูปจากการสักการะบูชาตามสภาพแวดล้อมที่ปรากฏโดยไม่มีการควบคุมตัวแปรใดๆอีกด้วย

5. ผลการวิจัย

1. สารยึดติดที่เหมาะสม

การศึกษานี้ทดลองใช้สารยึดติดสองชนิดในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ได้แก่ B1000 และ Silane-69 ในความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ผลการศึกษาพบว่า 3% B1000 ให้ผลในการกำจัด *E. coli, S. epidermidis, B. subtilis* และ *A. niger* ได้เหนือกว่า 3% Silane-69 โดยเมื่อครบเวลาการศึกษา 180 นาที การใช้ 3% B1000 ร่วมกับ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ สามารถกำจัดจุลินทรีย์ดังกล่าวได้ 99%, 60%, 71% และ 80% ตามลำดับ ขณะที่ 3% Silane-69 ร่วมกับ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ กำจัดได้ 98%, 51%, 64% และ 74% ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานั้นสอดคล้องกับการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ กล่าวคือ 3% B1000 สามารถกำจัดจุลินทรีย์ในลำดับดังกล่าวได้ 90%, 72%,

46% และ 64% เมื่อครบเวลา 180 นาที และ 3% Silane-69 กำจัดได้ 93%, 63%, 40 และ 59% ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าประสิทธิภาพการกำจัดดังกล่าวมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิส ไม่ใช่จาก photolysis ที่ใช้แสงในการกำจัดจุลินทรีย์ หรือจากการเกาะติดหรือดูดซับ (adsorption) ของจุลินทรีย์บนสารยึดติดดังกล่าว การศึกษานี้จึงทดสอบการกำจัดจุลินทรีย์โดยใช้หลอดไฟที่ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น พบว่า UVA แบล็คไลท์ และฟลูออเรสเซนต์ ไม่สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้เลย และการเคลือบเฉพาะสารยึดติดบนหลอดไฟโดยไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปด้วยก็ไม่สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ลงได้เช่นกัน

ในส่วนของการทดสอบความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศชนิดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน โดยยังคงใช้สารยึดติด 3% B1000 หรือ 3%Silane-69 ร่วมกับ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์เช่นเดิม ผลปรากฏว่า เฉพาะโทลูอีนเท่านั้น ที่ถูกกำจัดได้ 30%-50% เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ ขณะที่ไซลีนและเบนซีนไม่มีการลดจำนวนลงเลย รวมถึงการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ ก็ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสามชนิดเช่นกัน เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารยึดติดเป็น 3% PEG 1000 และ 3% PEG 4000 ผลปรากฏว่า 3% PEG 1000 สามารถกำจัดโทลูอีน ไซลีนและเบนซีนได้ 51%-58% เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ แต่เมื่อเปลี่ยนไปใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ การกำจัดนั้นมีไม่เกิน 20% ขณะที่การใช้ 3% PEG 4000 สารอินทรีย์ระเหยง่ายแทบไม่มีการลดลงจำนวนลงเลยไม่ว่าจะเคลือบบนหลอด UVA แบล็คไลท์หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ คณะผู้วิจัยจึงลองเปลี่ยนชนิดของสารยึดติดเป็น 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe เนื่องจากเหล็กช่วยลดการกลับมารวมตัวกันใหม่ระหว่างอิเลคตรอนกับรูว่าง ($hole^+$) ในอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยการเคลือบแบ่งเป็นการพ่นสเปรย์ลงบนหลอดไฟโดยตรง กับการนำแผ่นใยแก้วมาจุ่มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 3% D3005 และ 0.1% Fe และอบให้แห้งก่อนจึงค่อยนำมาพันบนหลอดไฟ ผลการศึกษาพบว่า หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ สามารถกำจัดโทลูอีนและเบนซีนได้ 91-94% เมื่อครบเวลา 180 นาทีที่ทำการศึกษา และกำจัดไซลีนได้ 76% ส่วนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่พ่นสเปรย์โดยตรง กำจัดโทลูอีนและเบนซีนได้ 72% กำจัดไซลีนได้ 54% และเมื่อนำมาทดสอบกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ พบว่าหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ กำจัดโทลูอีนและเบนซีนได้ 74% กำจัดไซลีนได้ 56% ขณะที่หลอดไฟที่พ่นเสปรย์โดยตรง กำจัดโทลูอีน เบนซีน และไซลีนได้ 51%, 63% และ 36% ตามลำดับ และเพื่อทดสอบว่าการลดลงที่ปรากฏมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิส ไม่ใช่จากการเกาะติดหรือดูดซับบนสารยึดติดหรือบนแผ่นใยแก้วที่นำมาหุ้ม การศึกษาจึงมีการพ่นสเปรย์เฉพาะสารยึดติด 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe ลงบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์โดยตรงโดยไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปด้วย รวมถึงมีการจุ่มเคลือบแผ่นใยแก้วในสารยึดติดดังกล่าวที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย ผลปรากฏว่า การลดลงของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสามชนิดกรณีที่พันด้วยแผ่นใยแก้วมีสูงสุด 22-23% ส่วนที่พ่นสเปรย์บนหลอดโดยตรง มีการลดลงสูงสุด 8-17%

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัย ได้ลองนำวิธีการเคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% D3005 และ 0.1% Fe ทั้งที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ และการพ่นสเปรย์บนหลอดไฟโดยตรง ไปทดสอบกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศอีกครั้งหนึ่ง เปรียบเทียบกับการใช้สารยึดติดชนิด 3% B1000 โดยทดสอบพร้อมๆกัน โดย

แบ่งหลอดไฟออกเป็นสองฝั่ง ผลปรากฏว่า การใช้สารยึดติดชนิด 3% B1000 ยังคงให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า 3% D3005 ผสม 0.1% Fe รวมถึงการพันหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วหรือไม่ได้พัน ก็ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอีกด้วย การศึกษานี้จึงสรุปว่าสารยึดติดชนิด 3% B1000 นั้นเหมาะสมที่สุดกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ขณะที่การใช้แผ่นใยแก้วเคลือบด้วย 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe เหมาะสมที่สุดกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

2. การศึกษาการเกิดและการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระ

การศึกษาใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์จำนวนชนิดละ 3 หลอด พ่นสเปรย์ครึ่งหนึ่งของหลอดด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% B1000 และอีกครึ่งหนึ่งของหลอด พันด้วยแผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% D3005 และ 0.1% Fe ติดบนเพดานกล่องทดลอง และใช้สารละลาย DMPD ซึ่งมีสีชมพูอ่อน หรือสารละลาย ABTS ซึ่งมีสีเขียวอ่อนบรรจุในขวด impinger นำไปจ่อที่ผิวของหลอดไฟทั้งสองฝั่ง พร้อมดูดอากาศที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระให้ตกลงมาในสารละลาย อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับ DMPD ให้กลายเป็น $DMPD^{\circ+}$ ซึ่งมีสีชมพูม่วง หรือทำปฏิกิริยากับ ABTS ให้กลายเป็น $ABTS^{\circ+}$ ซึ่งมีสีน้ำเงิน โดยการศึกษากระทำเปรียบเทียบกับการเติมสาร oxidant ซึ่งได้แก่ $FeCl_3$ ในกรณีของ DMPD และ $K_2S_2O_8$ ในกรณีของ ABTS โดยสาร oxidant ที่เติมลงไปจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ $DMPD^{\circ+}$ หรือ $ABTS^{\circ+}$ ขึ้น และเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน โดยสารละลายที่มีสีเหล่านี้ ได้นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงตั้งต้นเอาไว้ จากนั้นมีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน Trolox ลงไป เพื่อทำลายอนุมูลอิสระ สีของสารละลายจึงค่อยๆจางลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของ Trolox เพิ่มขึ้น ซึ่งสีที่จางลงนี้นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้งหนึ่งเพื่อคำนวนเป็น %inhibition หรือร้อยละของการกำจัดอนุมูลอิสระ โดย %inhibition คำนวณมาจาก $1 - [\text{Absorbance}_{\text{เริ่มต้น}}/\text{Absorbance}_{\text{เติม Trolox}}] \times 100$ พร้อมกันนี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับสารละลาย DMPD หรือ ABTS ที่ไม่มีการเติมสาร oxidant ใดๆ เพื่อเป็นตัวแทนของค่า background ของอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ ผลของการศึกษาพบว่า %inhibition ของ DMPD ที่เติมสาร oxidant มีสูงสุด 90% ขณะที่ %inhibition ของ ABTS ที่เติมสาร oxidant มีสูงสุด 99% การดูดอากาศจากผิวหน้าของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์พบว่า ด้านที่พันด้วยแผ่นใยแก้ว มี %inhibition มากกว่า %inhibition ของค่า background ตามธรรมชาติ 0.5-13.7% เมื่อใช้สารละลาย DMPD และ 0.5-12.2% เมื่อใช้สารละลาย ABTS ส่วนข้างที่พ่นสเปรย์โดยตรง มี %inhibition มากกว่าค่า background 1.3-10.5% เมื่อใช้ DMPD และ 0.3-14% เมื่อใช้ ABTS และเมื่อดูดอากาศจากหลอดไฟถอยห่างออกไปเรื่อยๆเป็นระยะ 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่า %inhition ค่อยๆลดลงจนไม่ต่างจากค่า background อีกต่อไป ส่วนการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ พบว่าการดูดอากาศที่ผิวของหลอดไฟเคลือบฯ หรือห่างออกมา 0.5 เซนติเมตร พบว่า %inhibition ไม่แตกต่างจากค่า background จึงสรุปได้ว่าอนุมูลอิสระในที่นี้มีการแพร่กระจายออกมาในจำนวนที่น้อยมากและไปได้ไม่ไกล (ในกรณีที่ใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์) และแทบไม่พบการแพร่กระจายออกมาเลยเมื่อเทียบกับค่า background ตามธรรมชาติ (ในกรณีหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์)

3. ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 25 ± 1 ◦C ไปเป็น 31 ± 1 ◦C ไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟเคลือบฯ แต่อย่างใด โดยเป็นไปได้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีไม่มากพอ เนื่องจากช่วงที่ศึกษามีอุณหภูมิบรรยากาศสูงสุดเพียง 32 ◦C แต่ความชื้นมีผลกระทบเป็นอย่างมากทั้งจากหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มจาก 50 ± 5% ไปเป็น 80 ± 5% ลดประสิทธิภาพการกำจัด *E. coli, S. epidermidis, B. subtilis* และ *A. niger* ของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ จาก 81%, 78%, 55%, 63% ให้เหลือเพียง 54%, 52%, 46% และ 47% ตามลำดับ (ลดลงไป 9-56%) ส่วนการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในลำดับดังกล่าว ลดลงจาก 88%, 76%, 42%, 58% เหลือเพียง 63%, 64%, 33% และ 40% ตามลำดับ (ลดลงไป 9-25%) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ซึ่งความชื้นที่เพิ่มขึ้นน่าจะมีผลให้ละอองน้ำไปแย่งจับกับ active site ของไทเทเนียมไดออกไซด์ จนเหลือพื้นที่ว่างสำหรับการทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ลดลง ตลอดจนความชื้นน่าจะมีผลทำให้เซลเกิดการอิ่มตัว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลรวมทั้งผนังเซลของจุลินทรีย์จนอนุมูลอิสระทำลายได้ยากขึ้น อัตราการมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์จึงเพิ่มขึ้น หรือประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟเคลือบฯ ลดลงนั่นเอง

ในเรื่องของความเร็วลม พบว่า กรณีที่ใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ การเพิ่มความเร็วลมจาก 0.05 เมตร/วินาที ไปเป็น 0.1 เมตร/วินาที มีผลในการลดประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ไม่มากนัก โดยการกำจัด *E. coli* สูงสุด ลดลงจาก 90% เหลือ 85% ภายในเวลา 180 นาทีที่ทำการศึกษา การกำจัด *S. epidermidis* สูงสุด ลดลงจาก 87% เหลือ 78% ภายในเวลา 180 นาที การกำจัด *B. subtilis* สูงสุด ลดลงจาก 63% เหลือ 55% และการกำจัด *A. niger* สูงสุด ลดลงจาก 63% เหลือ 61% แต่เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 0.5 เมตร/วินาที พบว่าการกำจัดจุลินทรีย์แต่ละชนิดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนมากกว่า กล่าวคือ การกำจัด *E. coli, S. epidermidis, B. subtilis* และ *A. niger* เหลือเพียง 69%, 70%, 32% และ 35% ตามลำดับ ซึ่งความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น น่าจะทำให้จุลินทรีย์ไหลมาปะทะกับอนุมูลอิสระบนหลอดไฟอย่างรวดเร็วและไหลผ่านออกไปพร้อมกับกระแสของอากาศ ทำให้ระยะเวลาการสัมผัสกับอนุมูลอิสระสั้นลงจนการทำลายเซลจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลง

ในกรณีของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ การเพิ่มความเร็วลมจาก 0.05 เมตร/วินาที ไปเป็น 0.1 เมตร/วินาที และ 0.5 เมตร/วินาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ทุกชนิดลดลง ซึ่งแตกต่างจากการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ ที่ระหว่าง 0.05 เมตร/วินาที กับ 0.1 เมตร/วินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเป็นไปได้ว่าอนุมูลอิสระบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ มีจำนวนที่น้อยกว่าที่พบบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ จึงไม่เพียงพอที่จะกำจัดจุลินทรีย์ที่ไหลมาปะทะด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาทีได้ โดยการกำจัด *E. coli* สูงสุด เมื่อใช้ความเร็วลม 0.05, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที คือ 88%, 75% และ 54% ตามลำดับ การกำจัด *S. epidermidis* เมื่อใช้ความเร็วลมทั้งสามระดับดังกล่าว คือ 81%, 73% และ 58% ตามลำดับ ส่วนการกำจัด *B. subtilis* สูงสุดเมื่อใช้ความเร็วลมสามระดับ ได้แก่ 44%,

41% และ 33% ตามลำดับ และสุดท้าย เป็นการกำจัด *A. niger* เมื่อใช้ความเร็วลมสามระดับ คือ 58%, 48% และ 37% ตามลำดับ ภายในระยะเวลาการศึกษา 180 นาที

4. ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

การใช้อุณหภูมิ 25 °C เปรียบเทียบกับ 31 °C ให้ผลแทบไม่แตกต่างกันในการกำจัดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจาก 50 ± 5% ไปเป็น 80 ± 5% ลดประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน จาก 74%, 84%, 81% เหลือเพียง 25%, 31%, และ 39% ตามลำดับ (ลดลงไป 42-53%) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ส่วนการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่พ่นสเปรย์โดยตรง พบประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ลดลงจาก 43%, 49% และ 52% เหลือเพียง 18%, 18% และ 7% ตามลำดับ (ลดลงไป 25-45%) เมื่อสิ้นสุดการทดลองในเวลา 180 นาที เช่นเดียวกับการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ที่พบว่าการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 50 ± 5% ไปเป็น 80 ± 5% ลดประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน จาก 74%, 82%, 79% เหลือเพียง 56%, 45%, 36% ตามลำดับ (ลดลงไป 18-43%) ขณะที่การใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พ่นสเปรย์โดยตรง มีการลดลงของโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน จาก 47%, 55%, 58% เหลือเพียง 26%, 19%, 6% ตามลำดับ (ลดลงไป 21-52%) เมื่อเพิ่มความชื้นดังกล่าว ซึ่งเหตุผลน่าจะเกิดจากการที่ความชื้นเข้าแย่งเกาะกับ active site ของไทเทเนียมไดออกไซด์จนเหลือพื้นที่ว่างสำหรับการทำปฏิกิริยาได้น้อยลงในลักษณะเดียวกับที่เกิดกับการกำจัดจุลินทรีย์

ในส่วนของการเพิ่มความเร็วลมจาก 0.01 เมตร/วินาที ไปเป็น 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที พบว่าการกำจัดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีนลดลงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นทั้งจากหลอด UVA แบล็คไลท์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ โดยในกรณีของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ การลดลงเห็นได้ชัดเจนหลังจากนาทีที่ 140 เป็นต้นไป (จากการศึกษาทั้งหมด 180 นาที) ซึ่งในแง่ของสถิติแล้ว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดเมื่อใช้ความเร็วลมต่างกัน ให้ความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ขณะที่การใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ แม้ว่าจะสังเกตเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้ความเร็วลมต่างกันได้ชัดเจนกว่า แต่ในเชิงสถิติแล้ว เฉพาะการทดสอบกับไซลีนเท่านั้น ที่ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5. อายุการใช้งานของหลอดไฟ

การศึกษานี้มีการนำหลอดไฟที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆกันมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์และการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายซ้ำใหม่ในสภาวะเดียวกัน (ที่ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาทีในกรณีของจุลินทรีย์ และ 0.01 เมตร/วินาทีในกรณีของสารอินทรีย์ระเหยง่าย อุณหภูมิ 25 ± 3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5%) โดยพบว่าหลอดไฟเคลือบฯ (ทั้งหลอด UVA แบล็คไลท์และหลอดฟลูออเรสเซนต์) ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 36-54 ชั่วโมง กับจุลินทรีย์ชนิดต่างๆที่อุณหภูมิและความเร็วลมหลากหลายกันไป ยังคงสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้แทบไม่แตกต่างไปจากเดิม เช่นเดียวกับการกำจัดโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ที่หลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ผ่านการใช้งานมาแล้ว 27-39 ชั่วโมง ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และ

ความเร็วลมต่างๆกันไป ยังสามารถกำจัดไอระเหยในแต่ละชนิดได้ใกล้เคียงเช่นเดิมเมื่อกลับมาใช้สภาวะเดิมดังระบุ

6. การนำหลอดไฟไปกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสภาวะจริง

ในการศึกษามีการนำหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ จำนวน 10 หลอด พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมสารยึดติด 3% B1000 และ 0.1% Fe จัดทำเป็นแผงหลอดไฟ นำไปทดสอบการกำจัดไอระเหยของเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ โดยใช้การวัดไอระเหยของเบนซีนทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟที่ระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับทางด้านหลังที่ระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน โดยแบ่งเป็นการตรวจวัดในช่วงที่ยังไม่มีการเปิดไฟ เปรียบเทียบกับช่วงที่เปิดไฟแล้ว และระหว่างการปิดไฟอีกครั้ง ผลปรากฏว่าในช่วงที่ไม่ได้เปิดไฟ ไอระเหยของเบนซีนทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟกับทางด้านหลังของแผงหลอดไฟมีความใกล้เคียงกันมาก แต่ทันทีที่เปิดไฟ พบความแตกต่างระหว่างสองด้านอย่างชัดเจน โดยไอระเหยที่ผ่านแผงหลอดไฟออกมาทางด้านหลังมีความเข้มข้นที่น้อยกว่า คิดเป็นสัดส่วนการลดลงได้ตั้งแต่ 34% ไปจนถึง 100% นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบการกำจัดเบนซีนจากควันธูปที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงในลักษณะเดียวกันอีกด้วย ผลการศึกษายังคงพบว่า การเปิดไฟ UVA ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ มีผลให้ความเข้มข้นของเบนซีนในควันธูปลดลงได้ในสัดส่วนตั้งแต่ 36% ไปจนถึง 86% ขณะที่การปิดไฟ ไม่พบการลดลงของเบนซีนที่ชัดเจน

6. ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

ควรพัฒนาเทคนิคในการเคลือบหลอดไฟให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ติดแน่นคงทนที่ดีกว่าการพ่นสเปรย์ รวมถึงแสวงหาสารยึดติดชนิดอื่นๆที่อาจเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้มากกว่านี้ และ/หรือใช้เวลาที่สั้นกว่านี้ หรือทดลองเติมโลหะ (metal-doping) ชนิดต่างๆในความเข้มข้นต่างๆกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ตลอดจนควรมีการศึกษาถึงผลผลิตอันไม่พึงประสงค์ หรือ by-products หรือ intermediate products ที่อาจเกิดจากการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่สมบูรณ์ กลายเป็นสารตัวอื่นที่อาจมีความเป็นพิษมากกว่าสารตั้งต้น นอกจากนี้ ยังอาจเพิ่มชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายให้มากขึ้น หรือใช้ระดับความเข้มข้นของไอระเหยที่สูงขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมต่อไปได้ ตลอดจนควรศึกษาอายุการใช้งานของหลอดไฟเคลือบฯ ในจำนวนชั่วโมงที่สูงกว่านี้

7. การนำไปใช้ประโยชน์

สถานประกอบการ สถานพยาบาล โรงเรียน ศูนย์เด็กเล็ก ฟาร์มสัตว์ ฯลฯ ที่ต้องการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในอากาศ และ/หรือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ สามารถนำหลอดไฟเคลือบดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ได้ รวมถึงผู้ผลิตหลอดไฟ หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และประชาชนทั่วไปล้วนแต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น