



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยนาโนเทคโนโลยี
Indoor Air Quality Control by Using Nanotechnology

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี ช่วยบำรุง
รองศาสตราจารย์ พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์
ดร.สิทธิสุนทร สุโพธิณะ
นายเสกฐวรธร สุจริตวัฒน์กุล
ดร.วรรณ เลาวกุล
นางสาวชลีวัลย์ ธีญญศิรินันท์
นางสาวกฤษฎิยา สังขจันทรานนท์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553

สิงหาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณคำพันธ์ ภานนท์ เจ้าของร้านบูมมอเตอร์ไซด์ที่อนุญาตให้เก็บตัวอย่างไอระเหยภายในร้าน ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์-ศูนย์รังสิต ได้แก่ นางสาวสิริพัชร โกโยโก ไสวรรณ นางสาวคณางค์ จันทรทิพย์ และนางสาว รวิวรรณ ศรีทอง ที่ช่วยตรวจวัดไอระเหยนอกสถานที่ ขอขอบคุณ คุณพลศักดิ์ ปิยะทัต กรรมการผู้จัดการ บริษัทอัลไพน์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นใยแก้วโดยไม่คิดมูลค่า และขอขอบคุณคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อนุญาตให้ใช้สถานที่สำหรับการศึกษาทดลอง

งานวิจัยนี้คงไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2553 (สัญญาเลขที่ ภค./2553-141) โดยได้รับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์จากท่านผู้ทรงคุณวุฒิตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ชื่อโครงการ การควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยนาโนเทคโนโลยี

Indoor Air Quality Control by Using Nanotechnology

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2553 จำนวนเงิน 1,180,000 บาท (หนึ่งล้านหนึ่งแสนแปดหมื่นบาทถ้วน)

ระยะเวลาทำการวิจัย 11 เดือน ตั้งแต่ 29 ตุลาคม 2553 ถึง 29 กันยายน 2554

ชื่อผู้วิจัย นางภารดี ช่วยบำรุง¹, นายพิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์², นายสิทธิสุนทร สุโพธิณะ³, นายเสกฐวรรธ
สุจริตกวัตสกุล⁴, นางสาววรรณ เลาวกุล⁵, นางสาวฐลิวัดย์ ธัญญศิริรินทร์⁶, นางสาวกฤษณิยา
สังขจันทรานนท์⁶

การศึกษานี้เป็นโครงการวิจัยภายใต้กรอบการวิจัยของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2553 ด้านนาโนเทคโนโลยี ในหัวข้อย่อยการพัฒนานาโนเทคโนโลยีเพื่อสุขภาพและการแพทย์ ซึ่งคณะผู้วิจัยทำการศึกษากำจัดสารมลพิษภายในอากาศ อันได้แก่อลูมิเนียมและสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารด้วยการเคลือบวัสดุนาโน (ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25) ด้วยการพ่นสเปรย์บนหลอดไฟ UVA แบบอัลโลท (ให้แสงในความยาวคลื่นหลัก 365 นาโนเมตร) และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (ให้แสงในความยาวคลื่น 400-600 นาโนเมตร) ในความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับกำจัดจุลินทรีย์และสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่มของโทลูอิน ไชลิน และเบนซีน โดยศึกษาหาสารยึดติด (binder) ที่เหมาะสมในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนหลอดไฟ ศึกษาการเกิดและการแพร่กระจายอนุภาคนิวตรอนจากหลอดไฟเคลือบฯ ศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายดังกล่าว รวมถึงมีการนำหลอดไฟไปกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์และศาลเจ้าอีกด้วย

ผลการศึกษาพบว่า สารยึดติดที่เหมาะสมในการกำจัดจุลินทรีย์คือ 3% B1000 กำจัดจุลินทรีย์ได้สูงสุด 66-99% (ขึ้นกับชนิดจุลินทรีย์) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบอัลโลท และกำจัดได้ 46-90% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ส่วนสารยึดติดที่เหมาะสมกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายคือ 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe เคลือบบนแผ่นใยแก้วก่อน แล้วจึงพ่นบนหลอดไฟอีกที สามารถสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้สูงสุด 76-94% (ขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบอัลโลท และ 56-74% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ในแง่ของการเกิดอนุภาคนิวตรอนพบว่า หลอดไฟ UVA ที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีอนุภาคนิวตรอนที่ผิวหลอดมากกว่าค่า background ของสารเคมีที่ใช้ 0.3-14% แต่เมื่อดูดอากาศห่างจากหลอดไฟไปเรื่อยๆ อนุภาคนิวตรอนลดลงจนเท่ากับค่า background ของสารเคมีที่ใช้ที่ระยะ 1 เซนติเมตร ส่วนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พบว่าอนุภาคนิวตรอนไม่แตกต่างจากค่า background ของสารเคมีที่ใช้ การศึกษานี้พบว่าอุณหภูมิ 25-31 °C ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างในประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดจุลินทรีย์และการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย แต่ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มจาก 50 ± 5% เป็น 80 ± 5% มีผลในการลดประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ 9-56% (ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบอัลโลท และ 9-25% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ และลดประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายลง 42-53% (ขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบอัลโลท

ไลท์ และลดลงไป 18-43% เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พื้นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ส่วนความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นมีผลในการลดประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และเมื่อนำหลอดไฟ UVA แบบเล็กไลท์พื้นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ไปทดสอบการกำจัดเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ พบว่า ไอระเหยของเบนซีนลดลง 34-100% ขณะที่การทดสอบที่ศาลเจ้าพบว่าเบนซีนจากควันรูปลดลง 36-86% และการใช้งานหลอดไฟเคลือบๆ ชั่วโมง 27-54 ชั่วโมง ยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ไม่ต่างไปจากเดิม

คำสำคัญ โฟโตคะตะไลซิส, การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ, การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ
หลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

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 TiO₂ 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 TiO₂-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 black-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.

Key words photocatalysis, removal of microorganism in the air, removal of VOCs in the air, TiO_2 coated lamp

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.ธรรมศาสตร์ โทรศัพท์ 02-564-4440 ต่อ 2212, ²รองศาสตราจารย์ คณะเทคนิคการแพทย์ ม.ขอนแก่น โทรศัพท์ 043-202-086, ³นักวิจัยอาวุโส ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โทรศัพท์ 02-564-6560 ต่อ 4234, ⁴วิศวกร ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โทรศัพท์ 02-564-6560 ต่อ 4582, ⁵นักวิจัย ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม โทรศัพท์ 02-577-4182 ต่อ 1305, ⁶นักศึกษาปริญญาเอก ม.ขอนแก่น

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือ กรอบแนวความคิดของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.6 หน่วยงานที่น่าผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	5
2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	7
3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 การเคลื่อนไหลของไฟฟ้าเหนี่ยวนำไดโอดไฮดรอลิก	13
3.2 การตรวจสอบอนุภาคนิวตรอน	14
3.3 การใช้แบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD)	18
3.4 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ	19
3.5 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ	21
3.6 การนำไปใช้งานในสถานะจริง	24
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	27
4.1 การเกิดและการแพร่กระจายของอนุภาคนิวตรอน	27
4.2 การใช้แบบจำลอง Computational Fluid Dynamics	33
4.3 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ	42
4.3.1 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของหลอดไฟที่ไม่ได้เคลือบ	42
4.3.2 สารยึดติดที่เหมาะสมกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ	43
4.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม	50
4.4 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ	57
4.4.1 สารยึดติดที่เหมาะสมกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ	57
4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม	64
4.4.3 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสถานะการใช้งานจริง	72
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
เอกสารอ้างอิง	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความเร็วลมที่วัดได้จริงในแต่ละจุดภายในห้องทดลอง	35
2	ร้อยละของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดจริง	37

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	การพ่นสเปรย์หลอดไฟ และหลอดไฟ UVA เคลือบๆ ที่ผสม 3% B1000 และ Silane-69	13
2	หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 3% B1000 และ Silane-69 ใน chamber ทดลอง	14
3	สารละลาย ABTS, potassium persulfate และสารละลาย ABTS ที่มีอนุมูลอิสระ ($ABTS^{\circ+}$)	14
4	สารละลาย DMPD, ferric chloride และสารละลาย DMPD ที่มีอนุมูลอิสระ ($DMPD^{\circ+}$)	14
5	สีของสารละลาย DMPD ที่มีอนุมูลอิสระ เมื่อเติม Trolox ความเข้มข้น 0.5–10 mg/mL	15
6	สีของสารละลาย ABTS ที่มีอนุมูลอิสระ ($ABTS^{\circ+}$) เมื่อเติม Trolox ความเข้มข้น 0.3–2 mg/mL	15
7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Trolox ที่ใช้กับการทำลายอนุมูลอิสระในรูปของ % inhibition	16
8	การดูดอากาศที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระที่ผิวหน้าของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้ตกลงมาในสารละลาย DMPD หรือ ABTS	17
9	ห้องทดลองที่ศึกษาเปรียบเทียบการวัดความเร็วลมในตำแหน่งต่างๆของห้อง	18
10	ขวด nebulizer สำหรับพ่นเชื้อจุลินทรีย์	19
11	Chamber ทดลอง	20
12	Single-stage impactor และตัวอย่างจุลินทรีย์ที่เก็บได้จากการใช้ impactor	21
13	หลอดไฟที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรงและหลอดไฟที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ	22
14	หลอดไฟพ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ และหลอดไฟเคลือบๆ ใน chamber ทดลอง	23
15	การวัดความเข้มข้นของก๊าซซมัลฟิยที่ตำแหน่งก่อนและหลังหลอดไฟเคลือบๆด้วยอุปกรณ์ ppbRAE	23
16	การสลายสารอินทรีย์ที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์โดยใช้แสงหลอดไฟพ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ	24
17	การสลายสารอินทรีย์ที่ศาลเจ้าฟอมอดินแดงโดยใช้แสงหลอดไฟพ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ	25
18	สีของสารละลาย 5 mM DMPD ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟ UVA แบบสีกัลท์)	27
19	การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ DMPD เดิมสาร oxidant, DMPD ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ DMPD ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟ UVA เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน	28
20	สีของสารละลาย 2 mM ABTS ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟ UVA แบบสีกัลท์)	29
21	การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ ABTS เดิมสาร oxidant, ABTS ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ ABTS ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟ UVA เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน	29
22	สีของสารละลาย 5 mM DMPD ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์)	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
23	การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ DMPD เดิมสาร oxidant, DMPD ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ DMPD ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน	30
24	สีของสารละลาย 2 mM ABTS ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์)	31
25	การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ ABTS เดิมสาร oxidant, ABTS ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ ABTS ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน	31
26	ลักษณะของห้องทดลอง	33
27	ตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลม (มุมมองจากด้านบนของห้องทดลอง)	34
28	ผลการคำนวณความเร็วลมภายในห้องด้วยพลศาสตร์ของไหลที่เกิดขึ้นในห้องทดลอง	36
29	ลักษณะห้องรูปแบบต่างๆ ที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่งและแบบโล่ง	38
30	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตห้องที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่ง และแบบโล่ง	39
31	การไหลของอากาศในห้องที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่ง และแบบโล่ง	40
32	ปริมาณจุลินทรีย์ในห้องที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่งและแบบโล่ง	41
33	การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของหลอดไฟที่ไม่ได้เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	43
34	การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 และผสม 3% B1000	44
35	การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 และ 3% B1000	45
36	ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้ 3% Silane-69 เปรียบเทียบกับ 3% B1000	46
37	การกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยีสต์ B1000 เปรียบเทียบกับหลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยีสต์ B1000	47
38	การกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยีสต์ 3%D3005+0.1%Fe และหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ	48
39	ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยีสต์ 3%D3005+0.1%Fe โดยตรงและหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ	48
40	ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยีสต์ชนิด 3% D3005+0.1%Fe เปรียบเทียบกับชนิด 3% B1000	49
41	ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยีสต์ 3% B1000 โดยตรง และหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ	50
42	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
43	ผลกระทบของความชื้นในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกลายเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000	52
44	ผลกระทบของความชื้นในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000	53
45	ผลกระทบของความเร็วลมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกลายเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000	54
46	ผลกระทบของความเร็วลมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000	54
47	ความสามารถของหลอดไฟ UVA แบบลึกลายเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% B1000 ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ตามจำนวนชั่วโมงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว	55
48	ความสามารถของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% B1000 ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ตามจำนวนชั่วโมงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว	56
49	การสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน ของหลอดไฟ UVA แบบลึกลายเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 เปรียบเทียบกับ 3% B1000	57
50	การสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน ของหลอดไฟ UVA แบบลึกลายเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% PEG1000 เปรียบเทียบกับ 3% PEG4000	59
51	การสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน ของหลอดไฟ UVA แบบลึกลายเคลือบฯ เปรียบเทียบกับหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ	60
52	ร้อยละของการสลายอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกลายพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ เปรียบเทียบกับการเคลือบหลอดไฟ UVA แบบลึกลายโดยตรง	61
53	การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยหลอดไฟที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับโฟโตไลซิส (และการดูดซับ) ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์	62
54	การสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน ของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯเปรียบเทียบกับหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ	63
55	ร้อยละของการสลายอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ เปรียบเทียบกับการเคลือบหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์โดยตรง	64
56	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบบลึกลาย	65
57	ผลกระทบของความชื้นต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบบลึกลาย	66
58	ผลกระทบของความชื้นต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
59	ผลกระทบของความเร็วลมต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบบลึคไลท์	68
60	ผลกระทบของความเร็วลมต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์	70
61	ประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของหลอดไฟ UVA แบบลึคไลท์เคลื่อนที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในจำนวนชั่วโมงต่างกัน	71
62	ประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลื่อนที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในจำนวนชั่วโมงต่างกัน	72
63	ความเข้มข้นของเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 1)	73
64	ความเร็วลมที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแสงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างกัน (ครั้งที่ 1)	73
65	ความเข้มข้นของเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 2)	74
66	ความเร็วลมที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแสงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างกัน (ครั้งที่ 2)	74
67	ความเข้มข้นของเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 3)	75
68	ความเร็วลมที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแสงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างกัน (ครั้งที่ 3)	76
69	ความเข้มข้นของเบนซีนที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 1)	77
70	ความเร็วลมที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแสงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างกัน (ครั้งที่ 1)	77
71	ความเข้มข้นของเบนซีนที่ศาลเจ้าก่อนและหลังแสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 2)	78
72	ความเร็วลมที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแสงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างกัน (ครั้งที่ 2)	78
73	ความเข้มข้นของเบนซีนที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 3)	79
74	ความเร็วลมที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแสงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างกัน (ครั้งที่ 2)	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สภาพความเป็นอยู่และการใช้ชีวิตของคนในสังคมไทยปัจจุบัน มีความเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากอดีตเป็นอย่างมาก เช่นเดียวกับลักษณะที่อยู่อาศัยและอาคารสถานที่ ที่เปลี่ยนจากเรือนไม้โปร่ง หลังคาสูง มีหน้าต่างระบายอากาศรอบด้าน ไปเป็นอาคารปิดมิดชิดใช้เครื่องปรับอากาศแทนอากาศธรรมชาติ ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือ ความเจ็บป่วยที่เกิดจากการหายใจเอาสารมลพิษที่สะสมอยู่ในอาคาร เช่น ฝุ่นขนาดเล็ก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โอโซน ฟอร์มัลดีไฮด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย ชาติภูมิมันตรังสีเรดอน และจุลินทรีย์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส รวมถึงสารก่อภูมิแพ้ทั้งหลาย เช่น ไรฝุ่น ขน/รังแคของสัตว์เลี้ยงภายในบ้าน เป็นต้น โดยปัจจุบันบุคคลส่วนใหญ่ใช้ชีวิตอยู่ในอาคารมากถึง 90% ของเวลาทั้งหมด (EPA, 1997) หากสถานที่นั้นไม่มีการจัดการควบคุมหรือกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้องและเพียงพอ ปัญหาดังกล่าวก็จะยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ และแม้ว่าอาคารสถานที่บางแห่งอาจมีการระบายอากาศ วิธีการดังกล่าวก็ยังคงเป็นเพียงการเจือจางความเข้มข้นของสารมลพิษด้วยการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาหมุนเวียนแทนที่เท่านั้น ไม่ใช่การกำจัดสารมลพิษแต่อย่างใด (Goswami, 2003) และยิ่งถ้าอากาศจากภายนอกเป็นอากาศที่มีการปนเปื้อน การแก้ปัญหาดังกล่าวก็จะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใดอีกด้วย

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคารก็คือการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ปฏิกิริยาดังกล่าวมาจากการใช้สารโฟโตคะตะไลสต์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบลงบนตัวกลางใดๆแล้วกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 385 นาโนเมตรจนทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($^{\circ}\text{OH}$) และ ซูเปอร์ออกไซด์ไอออน ($^{\circ}\text{O}_2^-$) ขึ้นมา ซึ่งทั้งสองตัวนี้จัดเป็นตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ที่รุนแรงมีคุณสมบัติในการสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Zhao and Yang, 2003) ตลอดจนสามารถทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ทำให้องค์ประกอบที่สำคัญรั่วไหลออกมาภายนอกจนจุลินทรีย์เหล่านั้นตายได้ในที่สุด (Ibanez et al., 2003) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีผู้นำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่างๆมากมาย เช่น แผ่นกระเบื้องปูห้องน้ำ กระจกเงา ม่านหน้าต่าง สีทาบ้าน เครื่องฟอกอากาศ เช่น Hodgson et al. (2007) ใช้เครื่องฟอกอากาศที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงานโดยพบว่าภายในเวลาน้อยกว่า 1 วินาที ปฏิกิริยาสามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ได้มากกว่า 20% จนถึง 80% หรือการศึกษาของ Sleiman et al. (2008) ที่ทดสอบกับโทลูอิน ขนาดความเข้มข้น 20-400 ppb_v พบว่า ปฏิกิริยาสามารถกำจัดโทลูอินได้ถึง 90-100% ส่วนกรณีของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศนั้น Kudo et al. (2007) ใช้แผ่นกรองที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 70 m^2/g แล้วฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบสีกัลท์ (ความยาวคลื่น 365 nm ความเข้มแสง 4 mW/cm^2) นาน 90

นาที่ในห้องขนาด 31.3 ลูกบาศก์เมตร พบว่าสามารถกำจัด Influenza virus A, *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ได้ 99%, 99.95% และ 99.94% ตามลำดับ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และจุลินทรีย์กันอย่างกว้างขวาง แต่คณะผู้วิจัยกลับพบว่าการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับหลอดไฟนั้นยังคงมีอยู่น้อยมาก โดยมีเพียงการศึกษาของ Lee et al. (2004) ที่ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟแบล็คไลท์ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดเชื้อ *Giardia lamblia* ในน้ำ และ Fujimaki et al. (2004) ที่ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดจุลินทรีย์ในอากาศและกลิ่นเท่านั้น นอกจากนี้ การศึกษาในเรื่องของอนุโมลิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสก็ยังคงไม่ครบถ้วนสมบูรณ์เท่าที่ควร เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่อนุมานว่าอนุโมลิสระที่เกิดขึ้นมีอายุสั้นและเกิดอยู่บนผิวหนังของตัวกลางที่เกิดปฏิกิริยาเท่านั้น จุลินทรีย์และสารอินทรีย์ต่างๆ จำเป็นต้องมาสัมผัสกับอนุโมลิสระที่ผิวของตัวกลางโดยตรง ประสิทธิภาพของการกำจัดจึงจะเกิดขึ้นได้ (Maness et al., 1999) คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะตรวจสอบรูปแบบลักษณะของการเกิด-การกระจายตัวของอนุโมลิสระจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีการใช้แบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD) มาช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งในสถานะที่มีและไม่มีสิ่งกีดขวางภายในห้อง ตลอดจนมีการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศและการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆ เช่น โทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ในสถานะที่มีความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นแตกต่างกันไป โดยแบ่งเป็นโครงการวิจัยย่อย 2 โครงการ ได้แก่ การตรวจสอบอนุโมลิสระจากการใช้หลอดไฟเคลือบนาโนไทเทเนียมสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ และ การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศด้วยหลอดไฟเคลือบนาโนไทเทเนียม ซึ่งในแผนงานวิจัยนี้เลือกใช้หลอดไฟเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สะดวกและง่ายต่อการใช้ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ราคาถูก ไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการปฏิบัติงานใดๆ ทั้งสิ้น คณะผู้วิจัยจึงเชื่อมั่นว่าโครงการนี้น่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมทั้งในเชิงวิชาการและประโยชน์สาธารณะได้เป็นอย่างมาก โดยจะช่วยลดความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงานจากการได้รับมลพิษอากาศภายในอาคารและช่วยลดอัตราการเจ็บป่วยให้น้อยลง จัดเป็นโครงการนำร่องที่สามารถนำไปขยายผลให้เกิดประโยชน์ได้อีกเป็นจำนวนมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยที่ 1

1. เพื่อศึกษาดำเนินการเกิดและการแพร่กระจายอนุโมลิสระจากผิวหนังของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้สถานะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมและสิ่งกีดขวางภายในห้องที่แตกต่างกัน

2. เพื่อศึกษารูปแบบหรือวิธีการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมและสิ่งกีดขวางภายในห้องที่แตกต่างกัน

โครงการวิจัยที่ 2

1. เพื่อทดสอบความสามารถของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ
2. เพื่อศึกษาปัจจัย (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม) ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยในโครงการที่ 1 เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้หลอดไฟเคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และสารยึดติด (binder) ชนิดที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศสูงสุด ติดบนเพดานกล่องทดลองขนาดเล็ก และศึกษาการเกิดอนุมูลอิสระบนหลอดไฟเคลือบฯ ด้วยการดูดอากาศที่ผิวหน้าของหลอดไฟที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระเข้ามายังอุปกรณ์ impinger ที่ขวดหนึ่งบรรจุสารละลาย ABTS และอีกขวดหนึ่งบรรจุสารละลาย DMPD อนุมูลอิสระดังกล่าวจะออกซิไดซ์สารละลาย ABTS ให้กลายเป็น $ABTS^{\bullet+}$ ซึ่งมีสีเขียวเข้ม และออกซิไดซ์ DMPD ให้กลายเป็น $DMPD^{\bullet+}$ ซึ่งมีสีชมพูม่วง ความเข้มของสีจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนอนุมูลอิสระในสารละลาย จากนั้นมีการเติมสารละลาย Trolox ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐานในความเข้มข้นต่างกันไป โดย Trolox จะไปทำลายอนุมูลอิสระในสารละลาย ทำให้สีจางหายไป (ใช้การวัดค่า 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 นอกจากนี้ มีการศึกษาความสามารถของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ และหลอดไฟ UVA แบบคล็อกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติดในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศภายใต้สภาวะของการมีอุณหภูมิที่ต่างกัน ($25 \pm 3^{\circ}C$ และ $35 \pm 3^{\circ}C$) ความชื้นที่ต่างกัน ($50 \pm 5\%$ และ $80 \pm 5\%$) และความเร็วลมที่แตกต่างกันด้วย (0.05, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที) โดยใช้การพ่นจุลินทรีย์ที่ละชนิดเข้าไปใน chamber ทดลองที่มีหลอดไฟเคลือบฯเสียบวางอยู่ แล้วดูดอากาศที่บริเวณก่อนหน้าหลอดไฟเคลือบฯ และหลังหลอดไฟเคลือบฯ มาเพาะหาจำนวนเปรียบเทียบ จุลินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ *Staphylococcus epidermidis* ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกที่พบมากในอากาศและก่อให้เกิดการติดเชื้อจากการสร้าง biofilm บนอุปกรณ์การแพทย์ที่สอดใส่เข้าสู่ร่างกาย และ *Escherichia coli* สำหรับเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ

รวมถึงสปอร์ของเชื้อรา *Aspergillus niger* ซึ่งพบมากในอากาศและมีความทนทานสูง และสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ที่เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกที่สร้างสปอร์ซึ่งกำจัดได้ยากอีกชนิดหนึ่ง

งานวิจัยในโครงการที่ 2 เป็นการพัฒนาและทดลองการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และหลอด UVA แบบแอลซีที โดยใช้สารยึดติดชนิดต่างๆที่ช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเกาะติดที่ดีและมีความสม่ำเสมอบนหลอดไฟและให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน การศึกษาใช้การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ละชนิดเข้าไปใน chamber ทดลอง ให้มีความเข้มข้นในระดับที่ยอมให้มีได้ของ NIOSH และใช้เครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้นอัตโนมัติชนิด direct reading วัดความเข้มข้นที่บริเวณก่อนหน้าหลอดไฟเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่พบหลังหลอดไฟทุกๆ 10 นาที นาน 3 ชั่วโมงเพื่อสังเกตการสลายตัว โดยมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ (25 ± 3 °C เปรียบเทียบกับ 35 ± 3 °C) ความชื้นสัมพัทธ์ ($50 \pm 5\%$ เปรียบเทียบกับ $80 \pm 5\%$) และความเร็วลม (0.01, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที) ที่มีผลต่อความสามารถของหลอดไฟเคลือบฯ ดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการนำหลอดไฟเคลือบฯ ไปทดสอบการใช้งานกับสถานที่จริงในร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ที่มีไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และศาลเจ้าที่มีควันธูปจากการสักการะบูชาตามสภาพแวดล้อมที่ปรากฏโดยไม่มีการควบคุมตัวแปรใดๆอีกด้วย

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และ/หรือ กรอบแนวความคิดของการวิจัย

การควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยการใช้ระบบระบายอากาศที่เหมาะสม หรือการใช้แผ่นกรองที่ได้ประสิทธิภาพและมาตรฐานยังคงเป็นเรื่องที่ยู่ยากซับซ้อนแก่ประชาชนโดยทั่วไปจากการที่ต้องมีการติดตั้งหรือมีการควบคุมดูแลระบบโดยผู้ที่มีความรู้ความชำนาญเฉพาะด้าน และที่สำคัญต้นทุนสูงจนทำให้ไม่สามารถก่อให้เกิดการปฏิบัติในความเป็นจริงได้ โครงการวิจัยนี้พยายามที่จะนำเอาเทคโนโลยีมาช่วยในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้ เกี่ยวข้องกับวิถีชีวิตประจำวัน ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและราคาถูกลงในระดับที่ประชาชนทั่วไปสามารถซื้อหามาใช้กันได้ในทันที ทั้งยังสามารถขยายผลไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ภายในประเทศได้อีกต่อไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะมีการเผยแพร่แนะนำให้ประชาชนโดยทั่วไปนำไปใช้จริงในทางปฏิบัตินั้น การศึกษาทั้งผลดีและผลเสียที่อาจเกิดขึ้นควรต้องมีการดำเนินการ โดยมีการวิเคราะห์ถึงการเกิด-การแพร่กระจายของอนุภาคนิวเคลียสที่อาจเกิดขึ้น รวมไปถึงการทำความเข้าใจในกลไกการกำจัดจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายของหลอดไฟเคลือบอนุภาคนาโนไทเทเนียมในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันอย่างละเอียดถี่ถ้วนและรอบด้าน จะช่วยให้การใช้นั้นนั้นเกิดอันตรายน้อยที่สุดและเกิดเป็นประโยชน์สูงสุดต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการในและต่างประเทศได้น้อย 1 เรื่อง
2. นำไปเสนอผลงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศได้น้อย 1 รายการ

3. ผลิตภัณฑ์ระดับปริญญาเอก/ สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่อย่างน้อย 1 คน
4. นำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในสถานที่ที่ต้องการการควบคุมจุลินทรีย์ในอากาศ เช่น ฟาร์มสัตว์เศรษฐกิจ โรงพยาบาล หรือสถานที่ที่ต้องการการควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ เช่น ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ ฯลฯ
5. เป็นโครงการต้นแบบให้กับงานวิจัยอื่นที่คล้ายคลึงกัน
6. ช่วยลดปริมาณการติดเชื้อที่มีอากาศเป็นสื่อ หรือความเจ็บป่วยจากการได้รับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ
7. สามารถพัฒนาไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.6 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สถานประกอบการ และ/หรือ สถานพยาบาลของทั้งภาครัฐและเอกชนที่ต้องการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในอากาศ และ/หรือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ
2. ผู้ผลิตหลอดไฟ หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง
3. ประชาชนโดยทั่วไปที่มีความสนใจ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดจากการใช้สารโฟโตคะตะลิสต์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบลงบนตัวกลางใดๆ เช่น แผ่นกรอง กระจกสไลด์ ใยแก้ว ฯลฯ แล้วใช้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 385 นาโนเมตร ซึ่งให้พลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ของชั้นวาเลนซ์ (valence band) กับชั้นคอนดักชัน (conduction band) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ พลังงานจากแสงที่เข้าไปนี้ สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ปกติจะอยู่เฉพาะแต่ในชั้นของวาเลนซ์ ให้กระโดดข้ามไปยังชั้นคอนดักชันที่มีระดับพลังงานสูงกว่าได้ ทำให้เกิดเป็นรูว่างขึ้นมาในชั้นวาเลนซ์ ซึ่งรูดังกล่าวนี้สามารถรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ (OH^-) ในโมเลกุลของน้ำ (หรือไอน้ำในบรรยากาศ) กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical: $^{\circ}\text{OH}$) ขณะที่อิเล็กตรอนในชั้นคอนดักชันสามารถรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน กลายเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($^{\circ}\text{O}_2^-$) ซึ่งทั้งคู่เป็นตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ที่รุนแรง มีอำนาจในการทำลายสารอินทรีย์ให้สลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ (Fujishima et al., 2000; Zhao and Yang, 2003) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดจุลินทรีย์เกิดได้ทั้งจาก hydroxyl radical, superoxide radical, perhydroxyl radical (HOO°) และ hydrogen peroxide (H_2O_2) (Block et al., 1997) โดย superoxide radical และ perhydroxyl radical มีอำนาจในการทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ (Ibanez et al., 2003) ส่วน hydrogen peroxide เป็นตัวการสำคัญในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยการซึมผ่านเซลล์เมมเบรน ขณะที่ hydroxyl radical ไม่สามารถซึมผ่านได้ (Kikuchi et al., 1997) ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะถูกทำลายในอัตราที่ต่างกันเนื่องจากโครงสร้างและความหนาของเซลล์ที่แตกต่างกัน โดยไวรัสบางชนิดถูกทำลายได้ไวกว่าแบคทีเรียและสปอร์ของแบคทีเรียมาก (Huang et al., 2000)

ในแง่ของชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่พบในอากาศโดยทั่วไป Duchaine et al. (2000) รายงานว่า สามารถพบเชื้อราทั้งหมดในอากาศในโรงเลี้ยงของประเทศแคนาดาได้สูงสุด 1.5×10^6 cfu (colony forming unit)/ m^3 โดยเชื้อราที่พบส่วนใหญ่คือ *Penicillium* spp. สอดคล้องกับประเทศโปแลนด์ที่พบ *Penicillium* ภายในอาคารในเมือง Upper Silesia มากที่สุดเช่นกัน (90%) ส่วนแบคทีเรียที่พบมากที่สุดคือ *Staphylococcus* spp. คิดเป็น 76% ของแบคทีเรียที่พบทั้งหมด (Pastuszka et al., 1999) ขณะที่ Scheff et al. (2000) ศึกษาอากาศภายในห้องเรียนในเมืองชิคาโก สหรัฐอเมริกา พบ *Aspergillus* และ *Penicillium* มากถึง 170 cfu/hr และ 161 cfu/hr ตามลำดับ โดยพบ total fungi 167 cfu/hr, thermophilic fungi 35.8 cfu/hr, mesophilic fungi 119 cfu/hr และ yeast 16.4 cfu/hr เช่นเดียวกับ Dotterud et al. (1995) ที่รายงานว่า *Penicillium*, *Aspergillus* และ *Mucor* เป็นเชื้อราที่พบได้มากที่สุดในบ้านและโรงเรียนทั่วไปของประเทศนอร์เวย์ สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาเชื้อราในบรรยากาศของกรุงเทพมหานครโดย ภาณุวิชญ์ พุ่มหิรัญและคณะ (2536) พบเชื้อราที่เป็นสารก่อภูมิแพ้ในบรรยากาศ 5 อันดับแรก ได้แก่ *Aspergillus* 58.4 cfu/ m^3 , *Cladosporium* 51.1 cfu/ m^3 , *Penicillium* 40.2 cfu/ m^3 , *Neurospora* 28.3 cfu/ m^3 และ *Curvularia* 13.1 cfu/ m^3 เช่นกัน ส่วนอากาศในโรงพยาบาล กฤษณียา สังขจันทรานนท์และคณะ (2549) ได้เก็บตัวอย่าง

อากาศ 10 จุดภายในโรงพยาบาลของรัฐขนาด 700 เตียง พบ *Aspergillus* 309 cfu/m³, *Penicillium* 217 cfu/m³ และ *Curvularia* 138 cfu/m³ ในกลุ่มของเชื้อรา และพบ *Staphylococcus* 688 cfu/m³, *Micrococcus* 541 cfu/m³ และ *Pseudomonas* 534 cfu/m³ ในกลุ่มของแบคทีเรียตามลำดับ

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศนั้น นิยมใช้ในรูปแบบของการเคลือบลงบนตัวกลางใดๆ เช่น แผ่นกรองอากาศในเครื่องฟอกอากาศ ก่อนจะฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เช่น Kudo et al. (2007) ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 70 m²/g เคลือบบนแผ่นกรองแล้วฉายด้วยแสง UVA black light (ความยาวคลื่น 365 nm ความเข้มแสง 4 mW/cm²) เป็นเวลานาน 90 นาทีในห้องขนาด 31.3 ลูกบาศก์เมตร พบว่าสามารถกำจัด Influenzavirus A, *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ได้ 99%, 99.95% และ 99.94% ตามลำดับ แต่สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบลงบนหลอดไฟในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศนั้นยังคงมีอยู่น้อยมาก มีเพียงการรายงานของ Fujimaki et al. (2004) เท่านั้นที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพบว่า หลอดไฟเคลือบสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ในอากาศลงได้ครึ่งหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงแต่สามารถลดกลิ่นได้มากกว่า 90% โดยข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการศึกษาของ Li et al. (2005) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์จะลดลงเมื่อมีความชื้นสูงถึง 22000 ppm_v เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เหลือพื้นที่ให้จุลินทรีย์เกาะได้น้อยลง นอกจากนี้ ก๊าซต่างๆ เช่น toluene, trichloroethylene, dimethylsulfide, trichloropropane หรือสารที่มีองค์ประกอบของ S และ N ที่เกิดปฏิกิริยา photo-oxidation ได้ง่าย จะแย่งเข้าทำปฏิกิริยาและกลายเป็นสารอนินทรีย์สะสมอยู่บนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้เช่นกัน (Ollis, 2000) ส่วนในงานวิจัยของ Rincon and Pulgarin (2004) ที่เติมไอออนของสารอนินทรีย์ เช่น HCO₃⁻, HPO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻ และ SO₄²⁻ ความเข้มข้น 0.2 mmol/l ลงไปในน้ำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า HCO₃⁻ และ HPO₄²⁻ เข้าไปขัดขวางการกำจัดจุลินทรีย์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอย่างมาก โดยมันจะเข้าแย่งทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ หรือเกาะติดบน active site ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วน Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺ และ K⁺ ขัดขวางการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ สารอินทรีย์ในธรรมชาติ เช่น dihydroxybenzenes isomers ยังส่งผลในทางลบต่อการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกด้วย

ในส่วนของการนำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ Shiraishi et al. (2003) ศึกษาการกำจัด formaldehyde ในอากาศที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ (<1 mg/m³) ในห้องที่ปิดทึบโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนม้วน ceramic-paper แบบบรรจุขี้ผึ้ง โดย formaldehyde นั้นลดปริมาณลงได้จนถึงระดับที่ WHO กำหนด (0.1 mg/m³) ภายใน 10 นาที และกำจัดได้จนเกือบเป็นศูนย์ในช่วงเวลา 90 นาที เช่นเดียวกับ Ching et al. (2004) ที่ศึกษาการกำจัด formaldehyde ในอากาศโดยใช้ sol-gel TiO₂ thin film เคลือบบนหลอดแก้วทดลองชนิด borosilicate และใช้ solar UVA ขนาด 1.56 mW/cm² แทนการใช้ artificial UV โดยพบว่า formaldehyde ลดลงได้มากกว่า 80% ใน 20 นาที ส่วน Ao et al. (2004) ศึกษาการกำจัด formaldehyde ในอากาศเช่นกันที่ระดับ 50 ppb แต่ในสภาวะที่มี NO, SO₂ และ

VOCs อยู่รวมด้วยที่ระดับ 200, 200 และ 20 ppb ตามลำดับ โดยศึกษาจาก formic acid ซึ่งเป็นผลผลิตจากการสลายตัวของ formaldehyde โดยพบว่า NO ช่วยในการส่งเสริมการเกิด formic acid ขณะที่ VOCs และ SO₂ ซึ่งเปลี่ยนเป็น sulfate มีผลในการยับยั้งปฏิกิริยาการสลายตัวของ formaldehyde นอกจากนี้ Ao and Lee (2004) ยังใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบน activated carbon เพื่อศึกษาถึงการดูดซับก๊าซ NO, SO₂ และ VOCs ในอากาศระดับความเข้มข้นเดิม โดยพบว่า VOCs และ SO₂ ลดการดูดซับ NO ลงไป 5% ในช่วงเวลา 1.2 นาที แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นสูงๆระดับ 22,000 ppm_v มีผลต่อการดูดซับก๊าซทุกชนิดมากกว่าการแข่งขันกันเองของก๊าซแต่ละตัวในการไปแย่งจับกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยลดการดูดซับก๊าซ SO₂ ลงไปถึง 68% และที่ความเข้มข้นระดับ 22,000 ppm_v ดังกล่าว ยังทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด benzene, toluene, ethylbenzene และ o-xylene ลดลงเหลือ 2%, 15%, 28% และ 35% จากประสิทธิภาพ 27%, 67%, 76% และ 80% ตามลำดับ (Li et al., 2005) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Pichat et al. (2000) ที่กำจัด benzene, xylene และ toluene ความเข้มข้น 50-2000 ppm_v โดยดูดอากาศผ่านไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใย fiber glass ในอัตรา 25-50 L/hr และพบว่าก๊าซเหล่านั้นลดจำนวนได้ 2-3 เท่าภายใน 1 ชั่วโมงในห้องต่างๆไปที่ไม่ปิดทึบ ขณะที่ Nonami et al. (2004) ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบด้วย apatite ในการดักจับสารอินทรีย์ในอากาศสำหรับเครื่องฟอกอากาศ โดยพบว่า apatite จะทำหน้าที่ดูดซับสารอินทรีย์เอาไว้แม้ว่าจะไม่มีแสงก็ตาม จากนั้นสารอินทรีย์จะถูกกำจัดโดยปฏิกิริยา photo-oxidation จากไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างสมบูรณ์เมื่อมีแสงต่อไป

อย่างไรก็ตาม การศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศด้วยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปบนหลอดไฟโดยตรงยังคงมีอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับการเคลือบลงบนตัวกลางชนิดอื่น ซึ่งการศึกษาที่ใกล้เคียงนั้นเป็นการศึกษาของ Lee et al. (2004) ที่ทดสอบประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนหลอดไฟแบบสไลต์ไลท์ด้วยวิธี modified hydrothermal ในการกำจัดเชื้อ *Giardia lamblia* ในน้ำ โดยพบว่าหลังจากผ่านไป 2 ชั่วโมง เซลล์ของจุลินทรีย์ถูกทำลายเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงจนถึง 200 w/m² โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ pH ต่ำและอุณหภูมิสูง ส่วนการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีการรายงานโดย Fujimaki et al. (2004) ที่พบว่า สามารถลดจุลินทรีย์ในอากาศได้ครึ่งหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงแต่สามารถลดกลิ่นได้มากกว่า 90 % จึงเชื่อว่าการศึกษานี้จัดอยู่ในกลุ่มการศึกษาแรกๆที่ใช้การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนหลอดไฟโดยตรงในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

ในแง่ของอนุโมลิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส Maness et al. (1999) รายงานไว้ว่าอนุโมลิสระนั้นจะมีอายุสั้นและอยู่เฉพาะบนผิวหน้าของตัวกลางที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเท่านั้น ซึ่งจุลินทรีย์หรือสารมลพิษใดๆจำเป็นต้องมาสัมผัสกับอนุโมลิสระที่เกิดขึ้นโดยตรงจึงจะเกิดประสิทธิภาพของการกำจัดได้ แนวความคิดนี้ถูกพิสูจน์โดย Murakami et al. (2007) ที่ทำการศึกษาว่าอนุโมลิสระสามารถแพร่กระจายจากผิวหน้าของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในอากาศได้หรือไม่ โดยใช้การฉายแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร ลงบนผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความชื้นอยู่รวมด้วยแล้วใช้ probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร วัดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ (สเปกตรัม) จากอนุโมล

อิสระไฮดรอกซิลที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชันตามเทคนิคของ Laser-induced-fluorescence ที่ระยะห่างจากผิวหน้าของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5-8 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตร พบความเข้มของสเปกตรัมจากอนุมูลอิสระมากที่สุด โดยความเข้มของสเปกตรัมลดจำนวนลงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับเส้น baseline ภายในเวลา 350-400 μs หรือ 0.0004 วินาที ขณะที่ probe ที่วัดที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร พบความเข้มของสเปกตรัมน้อยกว่าที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรประมาณ 6 เท่า และลดจำนวนลงจนถึงระดับเส้น baseline ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน (0.0004 วินาที) ซึ่งสอดคล้องกับที่ Maness et al. (1999) ระบุเอาไว้ อย่างไรก็ตาม เทคนิคที่ใช้ที่นี่เป็นเทคนิคขั้นสูงที่ต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะ จึงทำให้งานวิจัยที่วิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระในอากาศโดยตรงหรือศึกษาการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระในอากาศมีจำนวนที่น้อยมาก โดยงานส่วนใหญ่ที่ศึกษาอนุมูลอิสระมักอยู่ในรูปของการศึกษาความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการทำลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทางชีวภาพเสียมากกว่า เช่น Erel (2004) ศึกษาการใช้วิตามินซีร่วมกับ Trolox, glutathione, bilirubin, uric acid และ (+)-catechin solution ในการกำจัดอนุมูลอิสระในซีรัมของผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง หรือ Koracevic et al. (2001) วิเคราะห์ความสามารถของน้ำปัสสาวะ น้ำไขสันหลัง น้ำลาย น้ำตา และของเหลวอื่นๆ ในร่างกายในการต้านทานอนุมูลอิสระ โดยใช้ sodium benzoate เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระให้กลายเป็น thiobarbutiric acid reactive substances (TBARS) ก่อนจะวัด TBARS ที่เกิดขึ้น หรือ Lindsey and Tarr (2000) ศึกษาอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นด้วยการทำปฏิกิริยากับ benzoic acid ร่วมกับ *n*-propanol ให้กลายเป็น *p*-hydroxybenzoic acid (*p*-HBA) รวมไปถึง *o*-HBA และ *m*-HBA ซึ่งวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง high performance liquid chromatography หรือ Fogliano et al. (1999) ที่สังเคราะห์อนุมูลอิสระจากสารละลาย DMPD (N-N-dimethyl-*p*-phenylenediamine dihydrochloride) ซึ่งเป็นสารละลายใสไม่มีสี โดยการเติมเหล็ก (Fe^{3+}) ลงไปให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ $\text{DMPD}^{\bullet+}$ ซึ่งมีสีชมพูม่วง จากนั้นจึงเติมไวน์ที่คาดว่าจะมีสารต้านอนุมูลอิสระลงไป หากไวน์นั้นมีสารต้านอนุมูลอิสระจริง สารต้านอนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยากับ $\text{DMPD}^{\bullet+}$ กลายเป็น DMPD^+ ทำให้ความเข้มข้นของสีลดลงไปหรือกระทั่งไม่มีสีเลยหากสารต้านอนุมูลอิสระมีจำนวนที่มากพอ (ความเข้มข้นของสีวัดจากค่า absorbance ของเครื่อง UV-vis spectrometer) โดยความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีในไวน์นั้นเทียบได้จากการใช้สารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน Trolox ในความเข้มข้นต่างๆ กันทำปฏิกิริยากับ $\text{DMPD}^{\bullet+}$ ให้กลายเป็น DMPD^+ ผลที่ได้จึงอยู่ในรูปของ Trolox-equivalent concentration เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวไม่ใช่การตรวจวัดอนุมูลอิสระหรือสารต้านอนุมูลอิสระโดยตรง แต่เป็นการตรวจวัดผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระแทน หรือตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ

จากหลักการดังกล่าว ทำให้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งใช้วิธีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระในการศึกษาอนุมูลอิสระในอากาศ เช่น Weschler and Shields (1997) ศึกษาอนุมูลอิสระจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง d-limonene ในอากาศกับโอโซนภายในอาคาร โดยปล่อย 1,3,5-trimethylbenzene ความเข้มข้นต่างๆ กันเข้าไปตรวจสอบการมีของอนุมูลอิสระ ในกรณีที่ไม่มียอดอนุมูลอิสระ

ในอากาศ ความเข้มข้นของ 1,3,5-trimethylbenzene จะคงที่ จากอัตราการปล่อยที่คงที่ แต่ถ้ามีอนุมูลอิสระ ในอากาศ ความเข้มข้นของ 1,3,5-trimethylbenzene จะลดลงจากการเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ หรือ Forester and Wells (2011) ใช้การทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับ terpene ให้เกิดอนุมูลอิสระ จากนั้นปล่อย 2-butanol เข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยา คือ 2-butanone ในกรณีที่ อนุมูลอิสระมีจำนวนมาก ความเข้มข้นของ 2-butanone ก็จะมากตามไปด้วย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีการ ที่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปให้เป็น standard method สำหรับการวิเคราะห์อนุมูลอิสระยังไม่เกิดขึ้น ณ เวลานี้ (Erel, 2004)

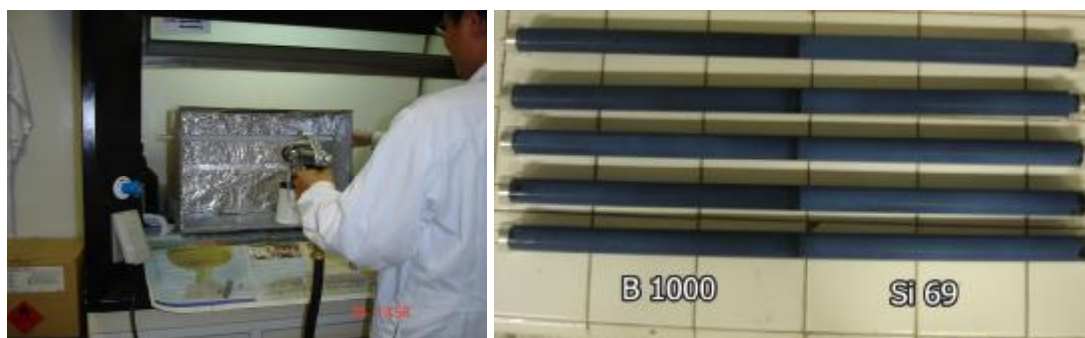
บทที่ 3

ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยจาก 2 โครงการย่อย สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆได้ดังนี้ (1) การเคลือบหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และ UVA แบล็คไลท์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (2) การตรวจสอบอนุโมลิสระจากผิวของหลอดไฟ (3) การอธิบายรูปแบบการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยแบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD) ภายใต้อากาศที่มีความเร็วลมและสิ่งกีดขวางภายในห้องที่แตกต่างกัน (4) การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยหลอดไฟเคลือบฯ ภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่ต่างกัน (5) การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศด้วยหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์รวมถึงการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟเคลือบฯ และ (6) การใช้งานในสภาวะจริงในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ ซึ่งการทดลองดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การเคลือบหลอดไฟด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษานี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ผสมด้วยสารยึดติด (binder) ชนิดต่างๆกัน ได้แก่ Silane-69 [bis (3-triethoxy silyl) propyl tetrasulfide] หรือ B1000 (สำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ) รวมไปถึง Polyethylene glycol (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 1000 หรือ 4000 หรือ Dispersant 3005 (D3005) (สำหรับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ เนื่องจาก Silane-69 และ B1000 ให้ประสิทธิภาพที่น้อยมาก) การเติมสารยึดติดเพื่อช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะติดบนหลอดไฟได้ดีขึ้น โดยผสมสารยึดติดในอัตราส่วน 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ซึ่งวิธีการเริ่มจากนำสารยึดติดจำนวน 0.15 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร กวนโดยใช้ magnetic stirrer นานครึ่งชั่วโมง จากนั้นจึงค่อยๆเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 จำนวน 5 กรัม คนให้เข้ากันและกวนต่ออีกประมาณ 1 ชั่วโมง จึงนำสารแขวนลอยที่ได้มาเขย่าด้วย ultrasonic probe อีก 2 นาที เพื่อให้อนุภาคแตกตัวอย่างสมบูรณ์ ก่อนนำไปพ่นสเปรย์บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ (รูปที่ 1) ผึ่งให้แห้ง และพ่นสเปรย์-ผึ่งให้แห้ง อีก 4 รอบ จึงนำไปอบใน hot air oven ที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่อาจมีอยู่ในสารแขวนลอย ก่อนนำไปใส่ใน chamber ทดลอง (รูปที่ 2) เพื่อทดสอบการใช้งานต่อไป



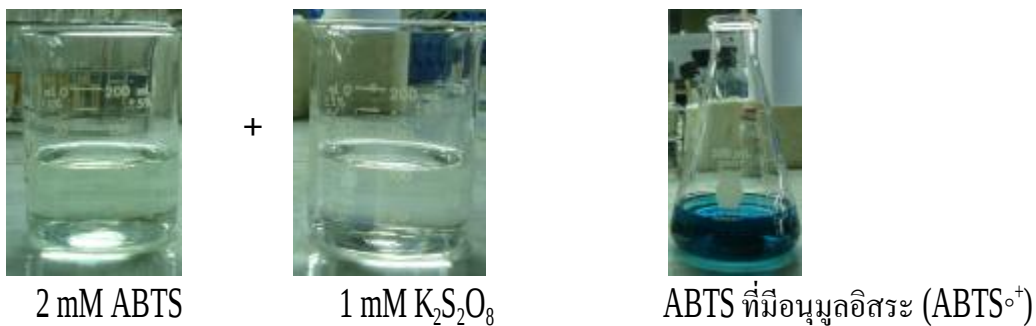
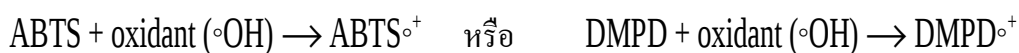
รูปที่ 1 การพ่นสเปรย์หลอดไฟ (ซ้าย) และหลอดไฟ UVA เคลือบฯ ที่ผสม 3% B1000 และ Silane-69 (ขวา)



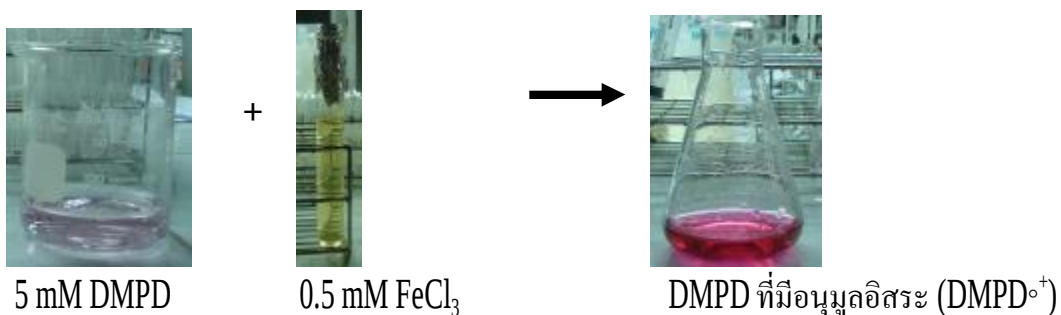
รูปที่ 2 หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 3% B1000 และ Silane-69 ใน chamber ทดลอง

3.2 การตรวจสอบอนุมูลอิสระ

คณะผู้วิจัยดัดแปลงวิธีการตรวจสอบอนุมูลอิสระจากวิธีของ Fogliano et al. (1999) และ Re et al. (1999) ที่ใช้สาร ABTS (2, 2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt) ซึ่งเป็นสารละลายสีสีเขียวอ่อน (รูปที่ 3 ซ้าย) มาเติมตัว oxidant ได้แก่ potassium persulfate (di-potassium peroxodisulfate: $K_2S_2O_8$) (รูปที่ 3 กลาง) เพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ $ABTS^{\circ+}$ ที่มีสีฟ้าเข้ม (รูปที่ 3 ขวา) หรือใช้ DMPD (N-N-dimethyl-p-phenylenediamine dihydrochloride) ซึ่งเป็นสารละลายสีชมพูอ่อน (รูปที่ 4 ซ้าย) มาเติมตัว oxidant คือ ferric chloride ($FeCl_3$) (รูปที่ 4 กลาง) ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ $DMPD^{\circ+}$ ที่มีสีชมพูม่วงเกิดขึ้น (รูปที่ 4 ขวา) ดังสมการ

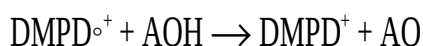
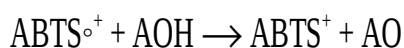


รูปที่ 3 สารละลาย ABTS, potassium persulfate และสารละลาย ABTS ที่มีอนุมูลอิสระ ($ABTS^{\circ+}$)



รูปที่ 4 สารละลาย DMPD, ferric chloride และสารละลาย DMPD ที่มีอนุมูลอิสระ ($DMPD^{\circ+}$)

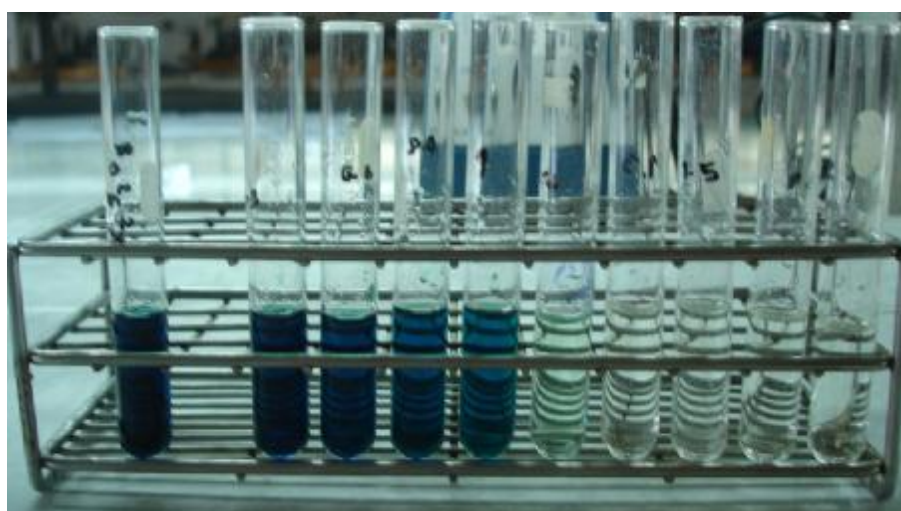
ความเข้มข้นของสีที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันโดยตรงกับจำนวนของอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในสารละลาย แต่ถ้ามมีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant: AOH) ซึ่งในที่นี้คือสารละลายมาตรฐาน Trolox ลงไป สารต้านอนุมูลอิสระจะทำจذبอนุมูลอิสระโดยการรีดิวซ์ $ABTS^{\circ+}$ หรือ $DMPD^{\circ+}$ ด้วยการให้ H-atom กลายเป็น $ABTS^+$ หรือ $DMPD^+$ ดังสมการ



ทำให้สีที่ปรากฏใน $ABTS^{\circ+}$ หรือ $DMPD^{\circ+}$ จางลงจนกระทั่งหมดไปได้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Trolox ขึ้นเรื่อยๆ (รูปที่ 5-6) โดยความเข้มข้นอนุมูลอิสระ $ABTS^{\circ+}$ หรือ $DMPD^{\circ+}$ ที่มีอยู่ในสารละลายทราบได้จากจำนวนหรือความเข้มข้นของ Trolox ที่ใช้ในการทำลายสีอย่างสมบูรณ์ ซึ่งความเข้มข้นของอนุมูลอิสระนิยมนำงานในรูปของ Trolox equivalent concentration



รูปที่ 5 สีของสารละลาย DMPD ที่มีอนุมูลอิสระ ($DMPD^{\circ+}$) เมื่อเติม Trolox ความเข้มข้น 0.5 – 10 mg/mL

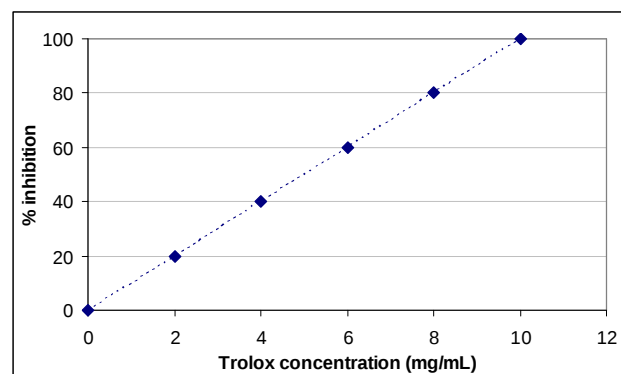


รูปที่ 6 สีของสารละลาย ABTS ที่มีอนุมูลอิสระ ($ABTS^{\circ+}$) เมื่อเติม Trolox ความเข้มข้น 0.3 – 2 mg/mL

การเปลี่ยนแปลงของสีของสารละลายสามารถรายงานเป็นค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) โดยใช้เครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสีที่เข้มมากย่อมมีค่าการดูดกลืนแสงที่มาก และสีที่จางลงย่อมมีค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยลง การวัดค่าการดูดกลืนแสงกระทำที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร สำหรับ $ABTS^{\circ+}$ และ 505 นาโนเมตร สำหรับ $DMPD^{\circ+}$ โดยในเบื้องต้นได้ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ $ABTS^{\circ+}$ และ $DMPD^{\circ+}$ เอาไว้ก่อนและกำหนดให้เป็นค่าตั้งต้น หรือ $Absorbance_{initial}$ (หลอดแรกซ้ายมือสุด ในรูปที่ 5 และ 6) จากนั้นจึงเติม Trolox ในความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ไปจนถึง 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในกรณีของ $DMPD^{\circ+}$ (หลอดที่สองจนถึงหลอดสุดท้ายในรูปที่ 5) หรือ 0.3 ถึง 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในกรณีของ $ABTS^{\circ+}$ (หลอดที่สองจนถึงหลอดสุดท้ายในรูปที่ 6) และวัดค่าการดูดกลืนแสงของ $ABTS^+$ และ $DMPD^+$ อีกครั้ง โดย Trolox ในที่นี้เตรียมจากการละลาย Trolox 1 กรัม ในเมทานอล 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับความเข้มข้นให้เป็นมิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามต้องการ โดยใช้ความสัมพันธ์ $m_1V_1 = m_2V_2$ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงตั้งต้นของ $ABTS^{\circ+}$ หรือ $DMPD^{\circ+}$ กับค่าการดูดกลืนแสงของ $ABTS^+$ หรือ $DMPD^+$ ที่เติม Trolox ลงไป ทำให้สามารถคำนวณเป็นความสามารถในการขัดขวางหรือการกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox (เรียกว่า % inhibition) ได้ ดังสมการ

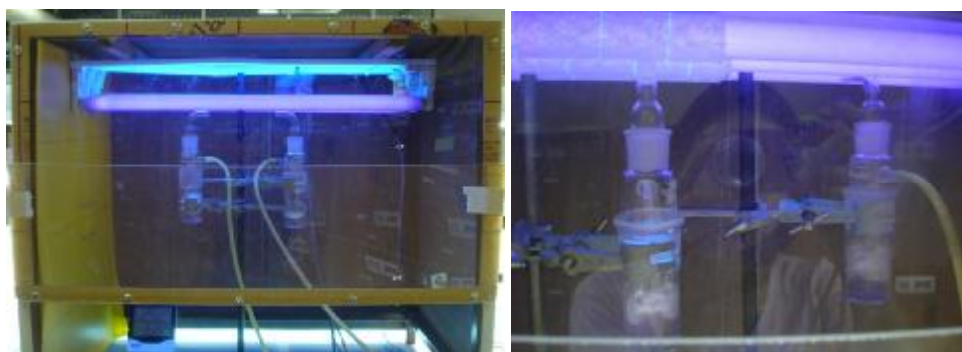
$$\% \text{ Inhibition of Absorbance} = 1 - \frac{Absorbance_{+Trolox}}{Absorbance_{initial}} \times 100$$

โดย % inhibition จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นของ Trolox ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 7) ซึ่ง 100% inhibition หมายถึง การที่ Trolox สามารถทำลายสีของสารละลาย DMPD ที่มีอนุมูลอิสระ ($DMPD^{\circ+}$) หรือสีของสารละลาย ABTS ที่มีอนุมูลอิสระ ($ABTS^{\circ+}$) ได้อย่างสมบูรณ์ โดยความเข้มข้นของ Trolox ที่ 100% inhibition จะเทียบเท่ากับความเข้มข้นของอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในสารละลายด้วย (รายงานผลเป็น Trolox equivalent concentration)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Trolox ที่ใช้ กับการทำลายอนุมูลอิสระในรูปของ % inhibition (ดัดแปลงมาจาก Fogliano et al., 1999)

ในการศึกษานี้ ใช้ DMPD ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ และ ABTS 2 มิลลิโมลาร์ โดยแบ่งการศึกษออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง นำ DMPD มา 20 มิลลิลิตร เติม ferric chloride ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ $\text{DMPD}^{\bullet+}$ ดังอธิบายในข้างต้น (ความเข้มข้นที่ใช้มาจากข้อเสนอแนะของ Fogliano et al. (1999) ที่ระบุอัตราส่วนโมลาร์ที่เหมาะสมสำหรับ $\text{DMPD}:\text{Fe}^{3+}$ คือ 10:1) ส่วนที่สอง นำ DMPD มา 20 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เฉยๆ โดยไม่มีการเติม ferric chloride เพื่อการเปรียบเทียบ ส่วนที่สาม นำ DMPD 20 มิลลิลิตร บรรจุในขวด impinger นำไปจ่อที่ผิวหน้าของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์หรือหลอดไฟ UVA แบบสไลต์ไทร์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ติดอยู่บนเพดานของกล่องทดลองจำนวน 3 หลอด (รูปที่ 8) โดยครึ่งหนึ่งของหลอดไฟเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมสารยึดติด 3% B1000 เนื่องจากเป็นชนิดที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ อีกครึ่งหนึ่งพันด้วยแผ่นใยแก้วที่ชุ่มเคลือบใน 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติด 3% D3005 และ 0.1% Fe ซึ่งเป็นชนิดที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ โดยใช้ปั๊มดูดอากาศในอัตรา 12.5 ลิตร/นาที่ นาน 15 นาที หากหลอดไฟมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้น อนุมูลอิสระจะถูกดูดให้ตกลงมาในสารละลาย DMPD กลายเป็น $\text{DMPD}^{\bullet+}$ ซึ่งมีสีชมพูม่วง ในลักษณะเดียวกับที่เติม ferric chloride โดยดูดอากาศที่ผิวหน้าของหลอดไฟเคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ เปรียบเทียบกับที่ระยะห่างจากหลอดไฟ 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร ซึ่งการใช้สารละลาย ABTS ก็กระทำในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ส่วนที่หนึ่ง เติม potassium persulfate ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) 1 มิลลิโมลาร์ เพื่อออกซิไดซ์สารละลายให้เกิดอนุมูลอิสระ $\text{ABTS}^{\bullet+}$ โดย Re et al. (1999) แนะนำให้ใช้อัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{ABTS}:\text{potassium persulfate}$ ที่ 1:0.5 ส่วนที่สอง ไม่มีการเติม potassium persulfate เพื่อการเปรียบเทียบ และส่วนที่สาม นำมาใส่ขวด impinger และจ่อที่หลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อดูดอากาศที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระให้ตกลงมาในสารละลาย ที่ตำแหน่งผิวหน้าของหลอดไฟ และที่ 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตรจากหลอดไฟ จากนั้นนำสารละลายทั้งหมดมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร สำหรับ $\text{ABTS}^{\bullet+}$ และ 505 นาโนเมตร สำหรับ $\text{DMPD}^{\bullet+}$ ก่อนเติม Trolox ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.3 ถึง 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในกรณีของ $\text{ABTS}^{\bullet+}$ หรือ 0.5 ถึง 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในกรณีของ $\text{DMPD}^{\bullet+}$ และวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้ง เพื่อคำนวณเป็น % inhibition ดังแสดงในรูปที่ 7

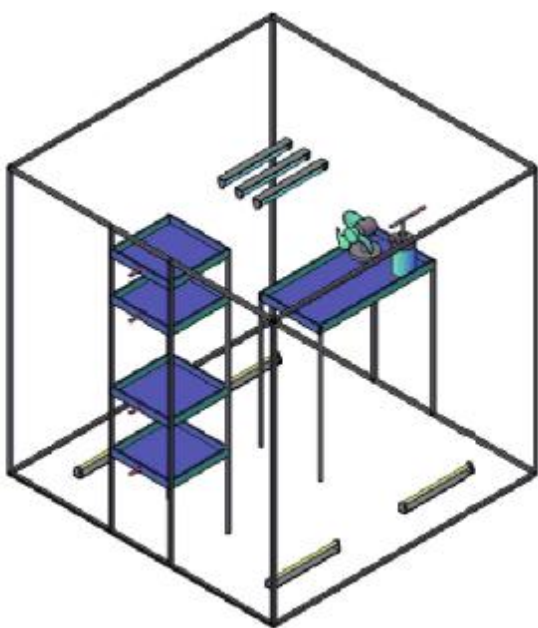


รูปที่ 8 การดูดอากาศที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระที่ผิวหน้าของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ตกลงมาในสารละลาย DMPD หรือ ABTS

ทั้งนี้ ผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ พบว่าการใช้ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารยัคติด 3% B1000 ให้ผลในการกำจัดจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด ขณะที่ผลการศึกษาในหัวข้อ 4.4 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ พบว่าการพ่นหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารยัคติด 3% D3005 และ 0.1% Fe ให้ผลที่ดีที่สุด หลอดไฟที่นำมาศึกษาอนุมูลอิสระในที่นี้จึงมีทั้งหลอดที่เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ 3% B1000 และหลอดที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ดังกล่าว

3.3 การใช้แบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD)

การศึกษานี้มีการใช้แบบจำลอง Computational fluid dynamics (CFD) มาช่วยในการศึกษารูปแบบการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ภายในห้องจำลอง ทั้งในสภาพที่ไม่มีสิ่งกีดขวางภายในห้อง และมีสิ่งกีดขวางอยู่ร่วมด้วย การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ (1) เปรียบเทียบผลการคำนวณรูปแบบการไหลของอากาศ กับผลการทดลองจริง โดยใช้การเปรียบเทียบความเร็วลมที่วัดได้จริงในห้องทดลองขนาด 2×2×2 เมตร (รูปที่ 9) กับความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณที่จุดต่างๆภายในห้องทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณที่ใช้ (2) ศึกษารูปแบบการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในห้องทดลองหลังจากผลการทดสอบในขั้นตอนที่หนึ่งมีความถูกต้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยใช้หลักการคำนวณพลศาสตร์การไหลของอากาศภายในห้องทดลอง และ (3) ศึกษารูปแบบการการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในห้องจำลองอื่นๆที่สร้างขึ้นมาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ห้องทำงาน ห้องพักผู้ป่วย ทั้งในสภาพที่ไม่มีสิ่งกีดขวางภายในห้องและมีสิ่งกีดขวางอยู่ร่วมด้วย เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของหลอดไฟที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ



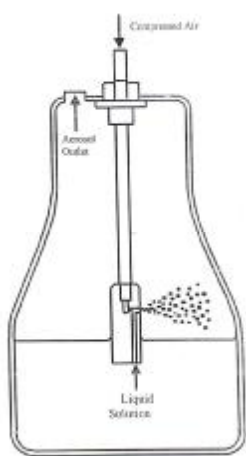
รูปที่ 9 ห้องทดลองที่ศึกษาเปรียบเทียบการวัดความเร็วลมในตำแหน่งต่างๆของห้อง

3.4 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

จุลินทรีย์ในนี้ ได้แก่ เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (TISTR # 780), *Staphylococcus epidermidis* (TISTR # 518), *Bacillus subtilis* (TISTR # 008) และเชื้อรา *Aspergillus niger* (TISTR # 3254) ซึ่งจัดซื้อจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยในรูปแบบของผงแห้ง ขั้นตอนการเตรียมจุลินทรีย์กระทำโดยนำเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นผงแห้งมาผสมกับ BHI broth 2 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นใช้ปิเปตหยดเชื้อแบคทีเรีย 1 หยดลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Blood agar (ควบคุมไปกับ MacConkey agar) เกลี่ยให้ทั่ว แล้วนำไปบ่มเพาะเชื้อที่ 37 °C นาน 24-48 ชั่วโมง ซึ่งในกรณีของเชื้อรา *A. niger* หลังจากนำผงแห้งมาผสมกับ BHI broth ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้ว หยดเชื้อลงในอาหาร Sabouraud Dextrose Agar (SDA) บ่มเพาะที่ 25 °C นาน 24-48 ชั่วโมง หรือนานกว่านั้นจนกว่าจะปรากฏสปอร์ขึ้นจนเต็มจาน

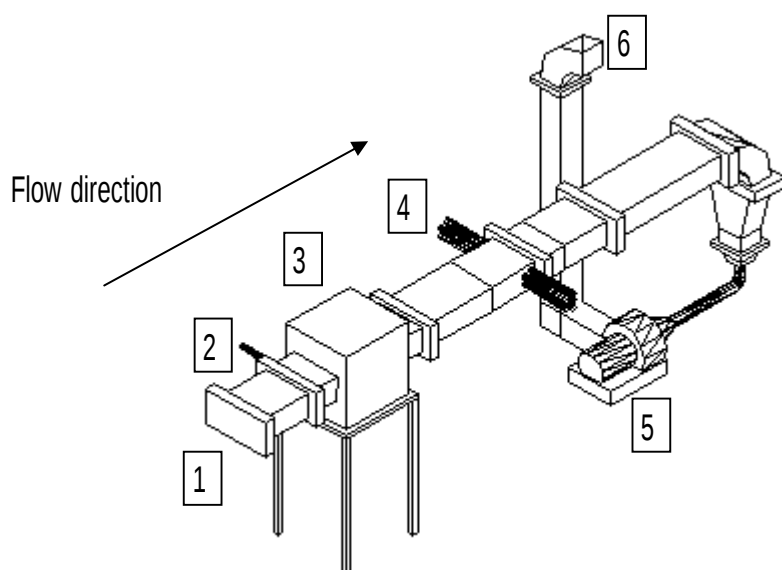
เมื่อโคโลนีของ *B. subtilis* ปรากฏหลังการเพาะเชื้อ โคโลนีดังกล่าวถูกเขี่ยออกมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น และนำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนที่ 80 °C นาน 10 นาทีเพื่อกำจัดตัว vegetative cell ให้เหลือแต่สปอร์เท่านั้น โดยนำสปอร์ที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายไปปั่นด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็ว 2000 รอบ/นาที นาน 5 นาที จากนั้นจึงถ่ายสปอร์ไปผสมกับน้ำกลั่นปราศจากเชื้อให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10^4 - 10^7 cfu/mL ก่อนนำไปใส่ในขวด nebulizer สำหรับใช้พ่นใน chamber ทดลอง (Lin and Li, 2003; Vohra et al., 2006) ส่วนโคโลนีของ *E. coli* และ *S. epidermidis* ที่ขึ้นใหม่จากการเพาะเชื้อ นำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นปราศจากเชื้อให้มีความเข้มข้น 10^4 - 10^7 cfu/mL แล้วใส่ในขวด nebulizer (BGI, Inc., model MRE-CN 25) เพื่อใช้พ่นใน chamber ทดลองได้เลย เช่นเดียวกับ *A. niger* ที่สามารถเขี่ยสปอร์ไปผสมกับน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10^4 - 10^7 cfu/mL นำไปใช้พ่นด้วย nebulizer ใน chamber ได้เลยเช่นกัน (Vohra et al., 2006)

เชื้อจุลินทรีย์ใน nebulizer ถูกพ่นออกมาด้วยการใช้ compressor อัดอากาศเข้าไปในช่องทางเข้าของ nebulizer ด้วยแรงดัน 20-30 psig ความดันดังกล่าวจะสร้างแรงสูญญากาศขึ้นที่ส่วนปลายของ nebulizer ที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีจุลินทรีย์อยู่ ทำให้ดูดสารละลายขึ้นมาตามท่อได้ และสารละลายนั้นถูกทำให้เป็นละอองฝอยจากอากาศที่อัดเข้าไป (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 ขวด nebulizer สำหรับพ่นเชื้อจุลินทรีย์

การศึกษากระทำใน chamber (รูปที่ 11) ซึ่งประกอบไปด้วย (1) ช่องทางเข้าของอากาศที่บรรจุแผ่นกรอง pre-filter สำหรับดักจับฝุ่นละอองและสิ่งเจือปนอื่นๆไม่ให้เข้ามาเจือปนกับกระแสอากาศที่ใช้ในการทดลอง (2) ช่องทางพ่นเชื้อจุลินทรีย์จากการใช้ nebulizer (3) Mixing zone ที่ออกแบบให้จุลินทรีย์ไหลลงไปมาอยู่ภายในด้วยการใช้แผ่น vane กันบังคับให้กระแสอากาศไหลวนเพื่อให้สารละลายที่ถูกพ่นออกมาจาก nebulizer ระเหยออกไป เหลือเฉพาะตัวจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในอากาศเท่านั้นที่เข้าสู่ส่วนของการทดลอง โดยกระแสของอากาศได้ถูกแบ่งออกเป็นสองสายดังแสดงในรูปที่ 2 (4) หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอดไฟ UVA แบล็กไลท์ ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 5 หลอด (Sylvania F36W-T8/BLB) ที่เคลื่อนไต่เหนือหลอดไฟด้วยเครื่องมือ radiometer (Cole Palmer model LW09811-50) (5) blower สำหรับดูดอากาศให้ไหลเข้า chamber ทดลอง โดยความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นภายใน chamber วัดด้วยอุปกรณ์ Testo model 425 และ (6) ช่องทางออกของอากาศ (outlet) ที่บรรจุหลอดไฟ UVC ขนาด 20 วัตต์ (Sylvania G20W) จำนวน 3 หลอด ไว้ภายในสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจหลงเหลืออยู่ รวมไปถึงมีแผ่นกรองดักไว้ที่ปลาย outlet อีกทีหนึ่งด้วย



รูปที่ 11 Chamber ทดลอง

การศึกษาเริ่มจากการฟุ้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ละชนิดเข้าไปใน chamber ทดลองเป็นเวลา 20 นาที ก่อนเปิดหลอดไฟ จากนั้นเริ่มเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ด้วยอุปกรณ์ Single-stage impactor (รูปที่ 12) ที่ภายในบรรจุจานอาหารเลี้ยงเชื้อเอาไว้ (Tryptic soy agar: TSA กรณีของแบคทีเรีย และ SDA กรณีของเชื้อรา) การเก็บตัวอย่างกระทำที่ตำแหน่งก่อนและหลังหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ระยะห่าง 60 เซนติเมตร ก่อนหลอดไฟ และ 20 เซนติเมตรหลังหลอดไฟ โดยใช้ปั๊มดูดอากาศในอัตราการไหล 28.3 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นจึงนำอาหารเลี้ยงเชื้อไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 18-24 ชั่วโมงสำหรับแบคทีเรีย และที่อุณหภูมิ 25 °C นาน 24-48 ชั่วโมงสำหรับเชื้อรา ก่อนนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏ การทดสอบยืนยันเชื้อในการศึกษานี้ใช้วิธี Conventional method ตาม Manual of Clinical Microbiology (Hoos and Bannerman, 1999; Logan and Turnbull, 1999) สำหรับแบคทีเรีย และใช้วิธี Microscopic examination by slide culture method สำหรับเชื้อรา (Harris, 1986; Sigler and Kennedy, 1999)



รูปที่ 12 Single-stage impactor และตัวอย่างจุลินทรีย์ที่เก็บได้จากการใช้ impactor

การศึกษากำหนดอุณหภูมิใน chamber ทดลองไว้ที่ 25 ± 3 °C เปรียบเทียบกับ 35 ± 3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ ศึกษาที่ $50 \pm 5\%$ เปรียบเทียบกับ $80 \pm 5\%$ ส่วนความเร็วลม มีการศึกษาสามระดับคือ 0.05 เมตร/วินาที 0.1 เมตร/วินาที และ 0.5 เมตร/วินาที โดยในทุกตัวแปร ทำการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศที่ตำแหน่งก่อนหน้าหลอดไฟเปรียบเทียบกับหลังหลอดไฟโดยใช้ single-stage impactor

3.5 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

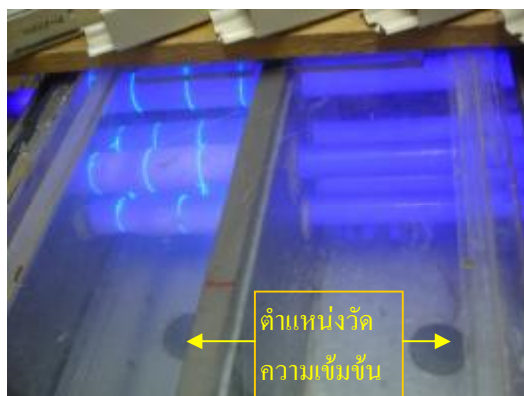
การศึกษานี้ใช้โทลูอิน ไซลีน และเบนซีนเป็นตัวแทนของก๊าซมลพิษในกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบได้โดยทั่วไปภายในอาคาร โดยใช้สารละลายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายผสมกับ methanol เพื่อเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ บรรจุในขวด nebulizer ในลักษณะเดียวกับเชื้อจุลินทรีย์ และใช้การอัดอากาศจาก compressor ด้วยแรงดันที่แตกต่างกันในแต่ละครั้งเป็นตัวแปรผันให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ ซึ่งละอองของสารอินทรีย์ระเหยง่ายถูกฟุ้งเข้าสู่ chamber ทดลอง ในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาเชื้อจุลินทรีย์ และไหลผ่านส่วน mixing zone เพื่อให้สารละลายระเหยเหลือเฉพาะไอระเหยเท่านั้นที่เข้าสู่ส่วนของการศึกษา โดยในการทดลองมีการศึกษาการใช้สารยึดติด Silane-69 หรือ B1000 ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักของ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนหลอดไฟ UVA แบล็กไลท์และ

หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เช่นเดียวกับที่ศึกษาในส่วนของการกำจัดจุลินทรีย์ แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์มีน้อยมากเมื่อเทียบกับการกำจัดจุลินทรีย์ คณะผู้วิจัยจึงทดลองเปลี่ยนเป็นสารยัดติดชนิด Polyethylene glycol (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 1000 เปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุล 4000 (ความเข้มข้น 3%) รวมถึงเปรียบเทียบกับการใช้ Dispersant 3005 (D3005) ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ ตลอดจนมีการศึกษาในลักษณะของการพันหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมด้วยสารยัดติด D3005 ความเข้มข้น 3% และเติม 0.1% Fe รวมด้วย (รูปที่ 13) โดยการเคลือบแผ่นใยแก้วใช้วิธีการจุ่มเคลือบ ซึ่งเริ่มจากการผสม $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, Co.) 0.005 กรัม ลงในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากการชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 5 กรัม ผสมด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นใช้ ultrasonic probe อีก 30-60 นาที ก่อนนำไปอบจนกว่าจะแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C จึงนำผงมาบดให้ละเอียด แล้วจึงนำมาละลายในน้ำกลั่นใหม่อีกครั้งโดยใส่สารยัดติด (3% D3005 โดยน้ำหนัก) ลงไปรวมด้วย คนนาน 1 ชั่วโมง และใช้เครื่อง ultrasonic probe อีก 30 นาที ก่อนนำแผ่นใยแก้วซึ่งกำจัดแก๊ซออกแล้วด้วย 0.08 M Sodium dodecyl sulfate มาจุ่มนาน 10 นาที ผึ่งให้แห้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 1 ชั่วโมง และดูดความชื้นในตู้ desiccator อีกอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ก่อนนำมาพันหลอดไฟ UVA แบบอัลโลท หรือหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ดังรูป



รูปที่ 13 หลอดไฟที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง และหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ

การศึกษาความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของหลอดไฟเคลือบๆ กับหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ สามารถกระทำเปรียบเทียบไปได้พร้อมกัน เนื่องจาก chamber ทดลองนั้นออกแบบไว้ให้กระแสน้ำอากาศแบ่งออกเป็นสองสาย (รูปที่ 14) การวัดความเข้มข้นของไอระเหยของโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน กระทำโดยใช้เครื่องมือชนิด direct reading (ppbRAE model 3000) ที่ตำแหน่งก่อนหน้าหลอดไฟ (ห่างจากหลอดไฟ 30 เซนติเมตร) บริเวณกึ่งกลางของกระแสน้ำอากาศ เปรียบเทียบกับที่ตำแหน่งหลังหลอดไฟเคลือบๆ (ห่างจากหลอดไฟ 25 เซนติเมตร) บริเวณกึ่งกลางของกระแสน้ำอากาศ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 14 หลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ (ซ้าย) และหลอดไฟเคลือบๆ (ขวา) ใน chamber ทดลอง

หลังจากที่ได้วิธีการเคลือบหลอดไฟที่เหมาะสมต่อการสลายอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศแล้ว การศึกษาลำดับต่อไป เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟเคลือบๆ โดยอุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ เปรียบเทียบกับ $35 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ส่วนความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง $50 \pm 5\%$ เปรียบเทียบกับ $80 \pm 5\%$ ขณะที่ความเร็วลมศึกษาที่ 0.01 เมตร/วินาที 0.1 เมตร/วินาที และ 0.5 เมตร/วินาที โดยทั้งหมดใช้การวัดความเข้มข้นของโทลูอีน หรือ ไซลีน หรือเบนซีนที่ตำแหน่งก่อนหน้าหลอดไฟ เทียบกับที่ตำแหน่งหลังหลอดไฟในทุกตัวแปรที่ทำการศึกษา (รูปที่ 15)



รูปที่ 15 การวัดความเข้มข้นของก๊าซมลพิษที่ตำแหน่งก่อนและหลังหลอดไฟเคลือบๆ ด้วยอุปกรณ์ ppbRAE

3.6 การนำไปใช้งานในสถานะจริง

หลังจากเสร็จสิ้นการศึกษาการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายใน chamber ทดลองแล้ว ซึ่งพบว่าหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การศึกษาลำดับต่อไปจึงเป็นการนำหลอดไฟ UVA แบบสติกไลท์ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ จำนวน 10 หลอด ติดตั้งเป็นแผงหลอดไฟ นำไปวางไว้ที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ (รูปที่ 16) และศาลเจ้าพอมอดินแดง (รูปที่ 17) ในเขตมหาวิทยาลัยขอนแก่น แล้วทำการวัดความเข้มข้นของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องมือ ppbRAE model 3000 ที่ตำแหน่งก่อนหน้าหลอดไฟในระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร (อยู่นี้อลม) เปรียบเทียบกับตำแหน่งหลังหลอดไฟในระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร (ใต้ลม) โดยมีการตรวจสอบทิศทางลมด้วยควันธูปเพื่อให้มั่นใจว่าแผงหลอดไฟนั้นอยู่ใต้ลมและความเข้มข้นที่วัดได้ที่ด้านหลังของแผงหลอดไฟเป็นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ผ่านแผงหลอดไฟมาแล้วจริงๆ นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายขณะที่ยังไม่มีเปิดหลอดไฟเปรียบเทียบกับขณะที่เปิดหลอดไฟอีกด้วย โดยทำการศึกษซ้ำ 3 ครั้ง ต่างวันและเวลากันไป



รูปที่ 16 การสลายสารอินทรีย์ที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์โดยใช้แผงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ



รูปที่ 17 การสลายสารอินทรีย์ที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงโดยใช้แสงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ

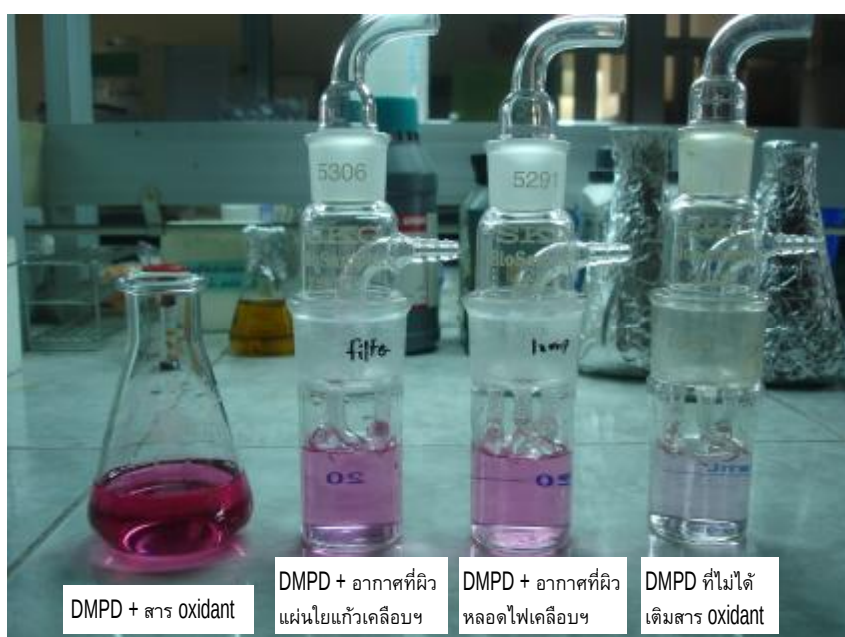
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

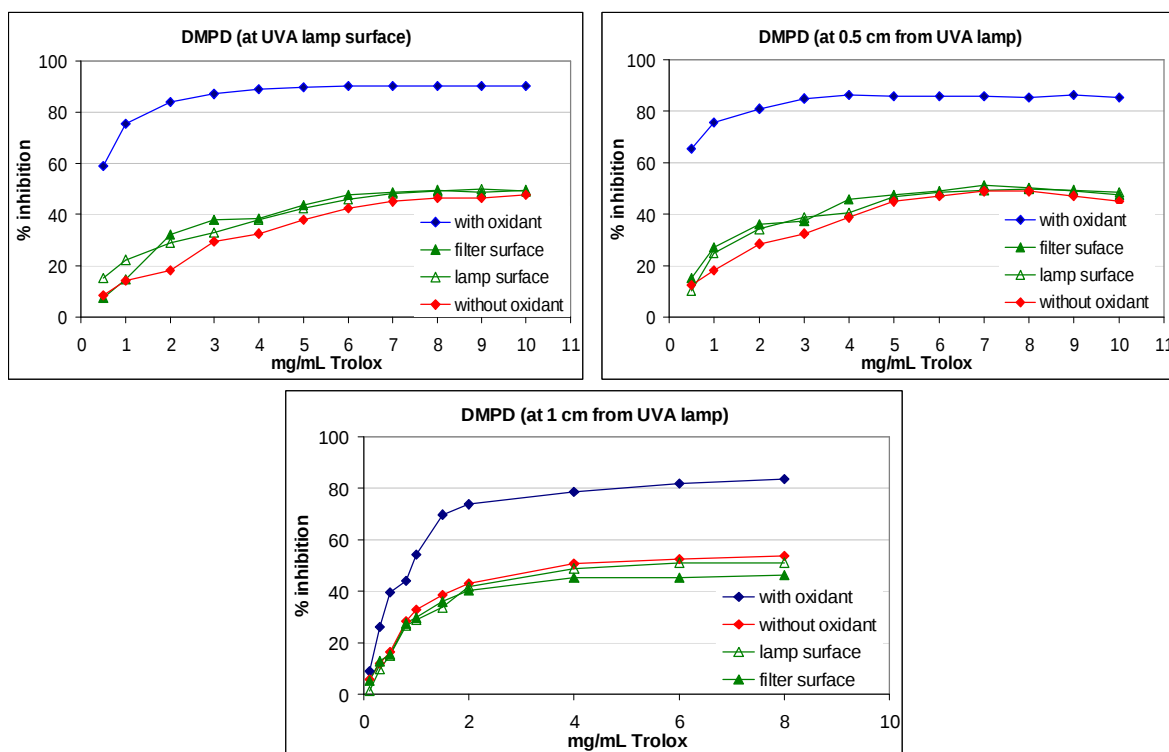
ผลการศึกษาของโครงการวิจัยโครงการที่ 1 สามารถจำแนกได้เป็นการเกิดและการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระจากผิวของหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ การวิเคราะห์รูปแบบหรือวิธีการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศโดยใช้แบบจำลอง Computational Fluid Dynamics ในสภาพที่มีสิ่งกีดขวางภายในห้องต่างกัน ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่ต่างกัน ส่วนโครงการที่ 2 ได้แก่ ประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ และปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟ รวมไปถึงการนำหลอดไฟไปทดสอบการใช้งานจริง ซึ่งทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเกิดและการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระ

การศึกษานี้ใช้สารละลาย 5 mM DMPD ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนที่หนึ่งนำมาเติมสาร oxidant (0.5 mM FeCl_3) เพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระสีชมพูม่วง (รูปที่ 18) ส่วนที่สองไม่มีการเติมสาร oxidant เพื่อการเปรียบเทียบ ส่วนที่สาม นำสารละลาย DMPD ไปดูดอากาศที่ผิวของหลอดไฟเคลือบฯ และผิวของแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ที่พันบนหลอดไฟที่ระยะติดกับหลอดไฟ ระยะ 0.5 และ 1 เซนติเมตร จากหลอดไฟตามลำดับ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นไว้ จากนั้นจึงเติมสารต้านอนุมูลอิสระ Trolox ความเข้มข้นต่างๆกันลงไปเพื่อทำลายอนุมูลอิสระทำให้ความเข้มข้นของสีลดลงไปเรื่อยๆจนหมดไปในที่สุด และวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้งเพื่อหาเป็นร้อยละของการกำจัดในรูปของ % inhibition ของ Trolox ซึ่งแสดงผลได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 18 สีของสารละลาย 5 mM DMPD ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟ UVA แบบสีกัลไลท์)

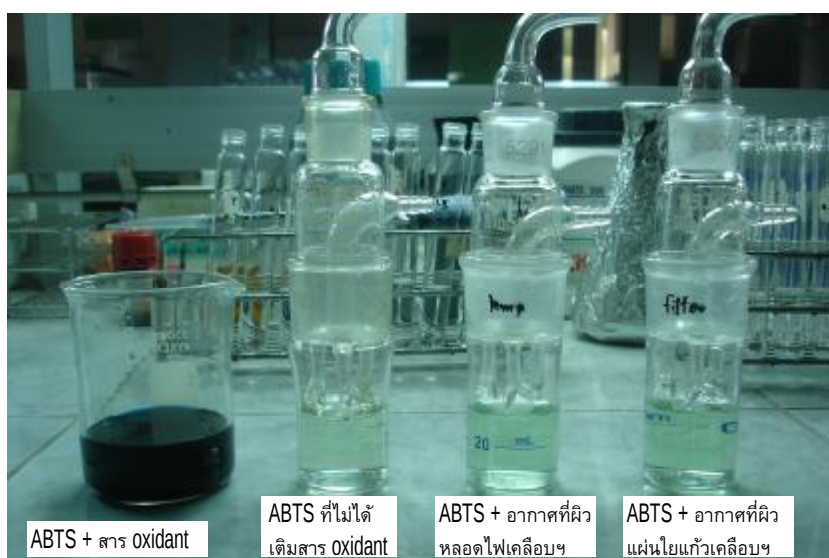


รูปที่ 19 การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ DMPD เติมสาร oxidant, DMPD ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ DMPD ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟ UVA เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน

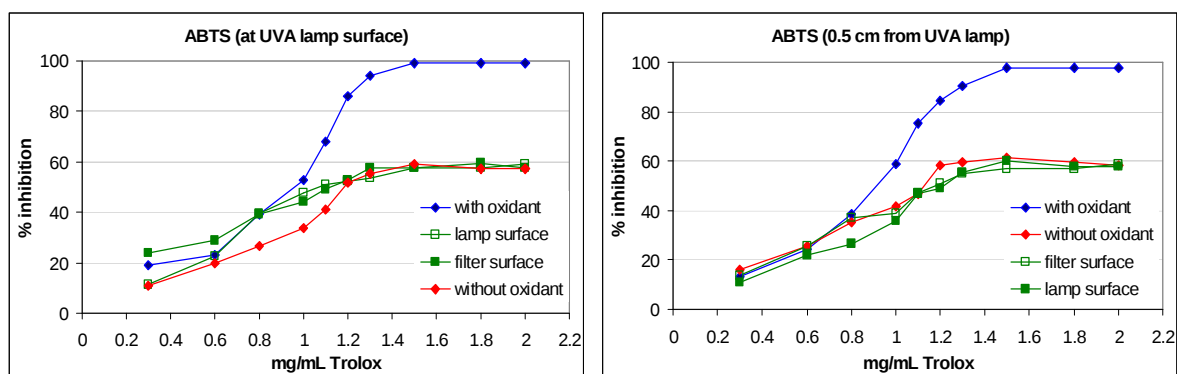
การศึกษพบว่าสารละลาย 5 mM DMPD ที่เติมสาร oxidant (0.5 mM FeCl_3) เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ทำให้สีชมพูม่วงอย่างชัดเจน (รูปที่ 18 ซ้ายมือสุด) และเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระ Trolox ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 ถึง 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตรลงไป Trolox สามารถทำลายอนุมูลอิสระหรือสีที่ปรากฏให้จางลงไปได้เรื่อยๆ แต่ไม่สามารถกำจัดได้หมดทั้ง 100% ได้ ไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของ Trolox อีกเท่าใดก็ตาม (เส้นกราฟเส้นบนสุดในรูปที่ 19) โดยการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ 90% ขณะที่สารละลาย DMPD ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant มีสีชมพูอ่อนปรากฏ (รูปที่ 18 ขวามือสุด) และมีการทำลายอนุมูลอิสระเมื่อเติม Trolox ลงไป แม้ว่าสัดส่วนของการทำลายจะมีสูงสุดเพียง 48% ก็ตาม (เส้นกราฟล่างสุดในรูปที่ 19 รูปบน-ซ้ายมือและขวามือ) โดยเป็นไปได้ว่าอนุมูลอิสระอาจมีอยู่ในน้ำหรือในอากาศโดยทั่วไปหรือกระทั่งมีอยู่ในตัว DMPD เองก็ได้ ซึ่งเป็นเสมือนค่า background ตามธรรมชาติ ขณะที่การดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟ UVA แบบลึกลไลท์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 19 รูปบน-ซ้ายมือ) พบว่ามีจำนวนอนุมูลอิสระมากกว่ากรณีที่ไม่เติมสาร oxidant หรือค่า background ตามธรรมชาติ 1.3-10.5% (เทียบจากกราฟเส้นล่างสุด) และอากาศที่ผิวของแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พันอยู่บนหลอดไฟ UVA แบบลึกลไลท์ มีจำนวนอนุมูลอิสระมากกว่ากรณีที่ไม่เติมสาร oxidant อยู่ 0.5-13.7% แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างของการดูดอากาศจากหลอดไฟเคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ เป็น 0.5 เซนติ เมตร (รูปที่ 19 รูปบน-ขวามือ) ความแตกต่างระหว่างจำนวนอนุมูลอิสระในเขตที่ดูดอากาศจากหลอดไฟกับกรณีที่ไม่ได้เติมสาร oxidant เริ่มลดลงเหลือเพียง 0.3-6.6% จากอากาศบริเวณหลอดไฟเคลือบๆ และเหลือเพียง 1.4-8.8% จากอากาศบริเวณแผ่น

ใยแก้วเคลือบๆ และเมื่อเพิ่มระยะห่างให้มากขึ้นไปอีกเป็น 1 เซนติเมตร (รูปที่ 19 รูปล่าง) พบว่าเส้นกราฟการทำลายอนุมูลอิสระของ Trolox ในกรณีที่ดูดอากาศจากหลอดไฟเคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ไม่ต่างจากกรณีที่ไม่ได้เติมสาร oxidant หรือกระทั่งน้อยกว่าด้วยซ้ำ แสดงว่า อนุมูลอิสระที่พบบริเวณหลอดไฟเคลือบๆ หรือแผ่นใยแก้วเคลือบๆ นั้นอยู่เฉพาะบริเวณผิวหน้าของหลอดไฟ และเริ่มน้อยลงที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร จนแทบไม่พบเลย หรือไม่สามารถแยกออกจากอนุมูลอิสระที่พบโดยทั่วไปได้ ถ้าอยู่ห่างจากหลอดไฟออกมา 1 เซนติเมตร

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารละลาย ABTS ความเข้มข้น 2 mM ศึกษาในลักษณะเดียวกันควบคู่ไปด้วย โดยสาร oxidant ที่ใช้คือ 1 mM $K_2S_2O_8$ ผลของสีที่ปรากฏในสารละลาย แสดงได้ดังรูปที่ 20 และการกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox ในรูปของ % inhibition แสดงได้ดังรูปที่ 21

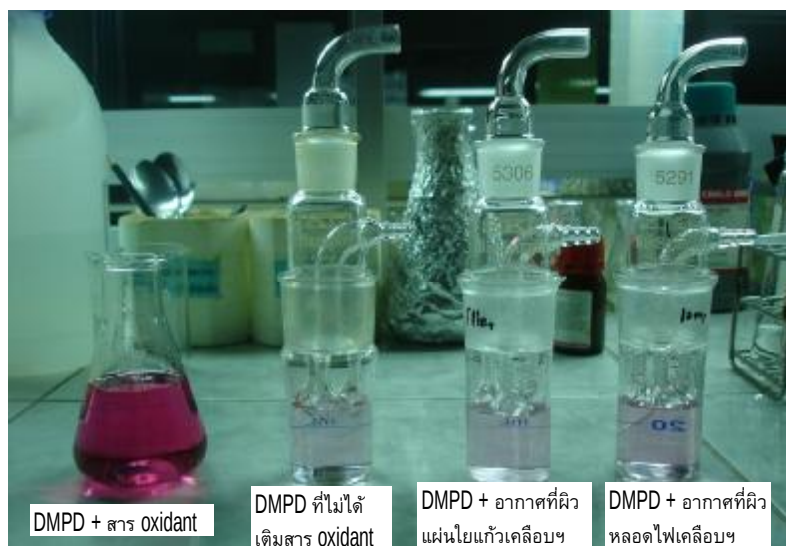


รูปที่ 20 สีของสารละลาย 2 mM ABTS ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์)

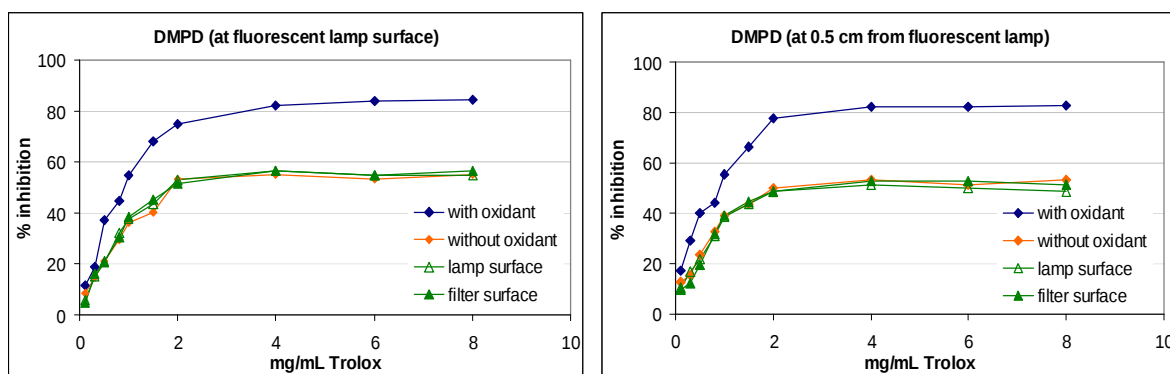


รูปที่ 21 การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ ABTS เติมสาร oxidant, ABTS ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ ABTS ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟ UVA เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน

ในกรณีที่ใช้ 2 mM ABTS พบว่าการเติม Trolox 1.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร กำจัดอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ ในสารละลายได้ถึง 99% (กราฟเส้นบนสุดในรูปที่ 21) โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ Trolox ไปจนถึง 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ไม่มีผลในการกำจัดอนุมูลอิสระมากไปกว่านี้ ซึ่งพอจะอนุมานได้ว่าจำนวนอนุมูลอิสระในสารละลายมีเทียบเท่า ~1.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร Trolox ซึ่งในกรณีที่สารละลาย ABTS ไม่มีสาร oxidant อยู่ด้วย (หรือค่า background ตามธรรมชาติ) การเติม Trolox พบ % inhibition สูงสุดประมาณ 60% ส่วนในกรณีที่ดูดอากาศที่ผิวหน้าของหลอดไฟเคลือบๆ (รูปที่ 21 ซ้ายมือ) พบว่า จำนวนอนุมูลอิสระมีมากกว่าค่า background 0.3-14% ขณะที่อากาศที่ผิวของแผ่นใยแก้วเคลือบๆ มีจำนวนอนุมูลอิสระมากกว่าค่า background 0.5-12.2% แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างของการดูดอากาศจากหลอดไฟเป็น 0.5 เซนติเมตร พบว่า จำนวนอนุมูลอิสระนั้นไม่ต่างกับค่า background อีกต่อไป การศึกษาที่ระยะ 1 เซนติเมตรจึงไม่ได้กระทำ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาซ้ำกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ ในลักษณะเดียวกัน โดยผลของการใช้สารละลาย 5 mM DMPD และ % inhibition จาก Trolox แสดงได้ดังรูปที่ 22-23 ตามลำดับ

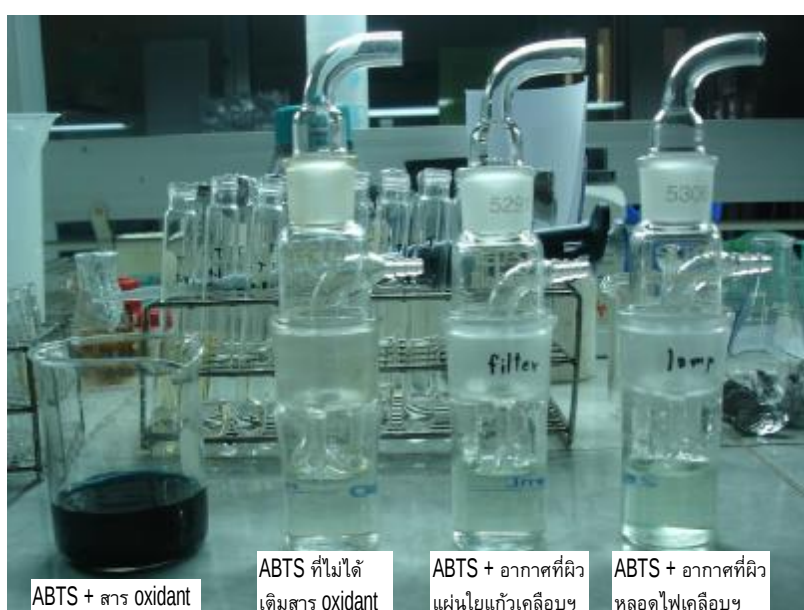


รูปที่ 22 สีของสารละลาย 5 mM DMPD ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์)

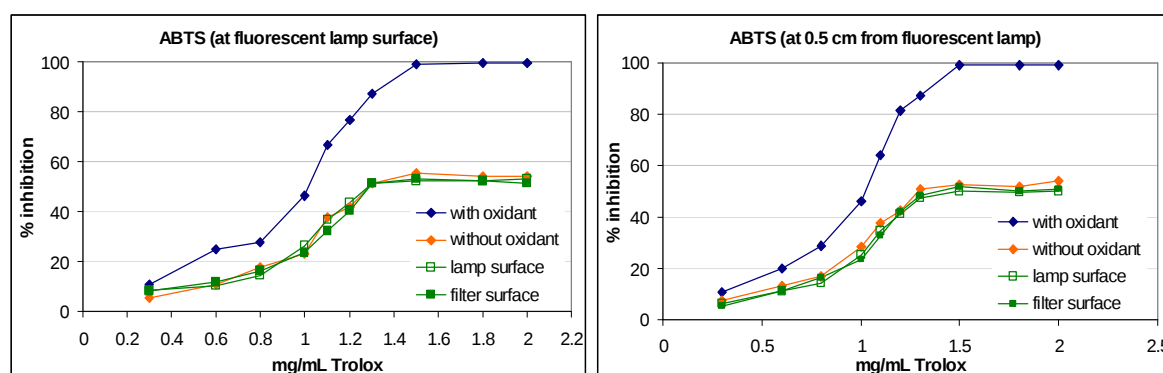


รูปที่ 23 การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ DMPD เติมสาร oxidant, DMPD ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ DMPD ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างๆกัน

ผลการศึกษาพบว่าการดูดอากาศที่ผิวหน้าของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ให้ผลในการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย DMPD แตกไม่ต่างจากการไม่เติมสาร oxidant หรือ background ตามธรรมชาติ (รูปที่ 22) และเมื่อนำสารละลายมาเติมสารต้านอนุมูลอิสระ Trolox พบว่าการกำจัดอนุมูลอิสระหรือ % inhibition ของ Trolox ยังคงไม่ต่างกับค่า background ตามธรรมชาติ และน้อยกว่าค่า background เล็กน้อยด้วยซ้ำเมื่อเพิ่มระยะห่างเป็น 0.5 เซนติเมตรจากผิวของหลอดไฟ แสดงว่า ในกรณีที่ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ หรือพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ จำนวนอนุมูลอิสระที่ปรากฏมีน้อยมาก จนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างออกจากค่า background ตามธรรมชาติได้ ลำดับต่อไปจึงเป็นการทดสอบซ้ำกับสารละลาย 0.2 mM ABTS ซึ่งผลของการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 24-25 ดังนี้



รูปที่ 24 สีของสารละลาย 2 mM ABTS ในเงื่อนไขต่างๆ (หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์)



รูปที่ 25 การกำจัดอนุมูลอิสระของ Trolox เมื่อใช้ ABTS เติมสาร oxidant, ABTS ที่ไม่ได้เติมสาร oxidant และ ABTS ที่ดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ และแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ระยะห่างต่างกัน

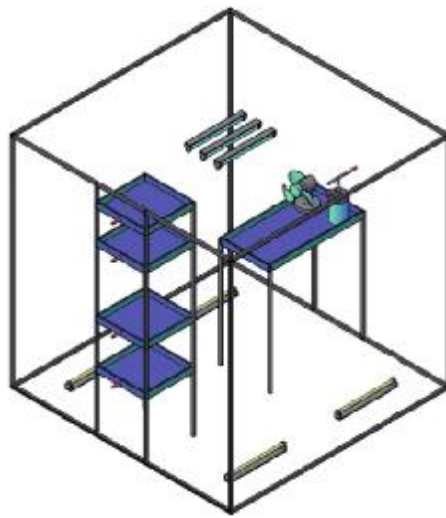
จากรูปที่ 25 ยังคงพบว่า สารละลาย 2 mM ABTS ที่เติม 1 mM $K_2S_2O_8$ ให้อนุมูลอิสระเทียบเท่ากับ 1.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร Trolox โดยประมาณ และ % inhibition จากสารต้านอนุมูลอิสระนั้นเกิดได้สูงสุด 99% การดูดอากาศจากผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์หรือที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่พบว่ามีจำนวนอนุมูลอิสระมากไปกว่าค่า background ตามธรรมชาติแต่อย่างใด และเมื่อดูดอากาศลอยห่างออกไปจากหลอดไฟ 0.5 เซนติเมตร จำนวนอนุมูลอิสระนั้นมีน้อยกว่าค่าตามธรรมชาติอีกด้วย การศึกษานี้จึงสรุปว่า การเกิดและการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระบนผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ขณะที่การเกิดอนุมูลอิสระที่ผิวของหลอดไฟ UVA แบบสไลต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์พอจะสังเกตเห็นได้ แต่มีจำนวนที่มากกว่าค่า background ตามธรรมชาติ ประมาณ 14% เท่านั้น ซึ่งจำนวนดังกล่าวจะลดลงไปเมื่ออยู่ห่างจากหลอดไฟมากขึ้น จนเท่ากับค่า background ตามธรรมชาติหรือกระทั่งน้อยกว่า ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร

ทั้งนี้ การศึกษานี้สอดคล้องกับการรายงานของ Maness et al. (1999) ที่ระบุว่า อนุมูลอิสระนั้นมิอาจยืนและอยู่เฉพาะบนผิวหน้าของตัวกลางที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเท่านั้น ซึ่งจุลินทรีย์หรือสารมลพิษใดๆจำเป็นต้องมาสัมผัสกับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นโดยตรงจึงจะเกิดประสิทธิภาพของการกำจัดได้ รวมถึงการศึกษาของ Murakami et al. (2007) ที่ใช้การฉายแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร ลงบนผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความชื้น (เพื่อช่วยเพิ่มจำนวน $OH^\cdot$ ให้เปลี่ยนเป็น $^{\circ}OH$) แล้วใช้ probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร วัดสัญญาณฟลูออเรสเซนต์ (สเปกตรัม) จากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นตามเทคนิคของ Laser-induced-fluorescence ที่ระยะห่างจากผิวหน้าของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5-8 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตร (0.5 เซนติเมตร) พบความเข้มของสเปกตรัมจากอนุมูลอิสระมากที่สุด โดยความเข้มของสเปกตรัมลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว จนเท่ากับเส้น baseline หรือค่า background ภายในเวลา 350-400 μs หรือ 0.0004 วินาที ขณะที่ probe ที่วัดที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร พบความเข้มของสเปกตรัมน้อยกว่าที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรประมาณ 6 เท่า และลดจำนวนลงจนถึงระดับเส้น baseline ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน (0.0004 วินาที) ซึ่งการศึกษาของ Murakami นั้นใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง จึงมีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่าการศึกษานี้มาก (การศึกษานี้ใช้ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) ดังนั้น การแพร่กระจายของอนุมูลอิสระจากหลอดไฟเคลือบในการศึกษานี้ จึงน่าจะมีจำนวนที่น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการศึกษาของ Murakami et al. (2007) จนน่าจะไม่มีผลกระทบใดๆต่อผู้ใช้งาน

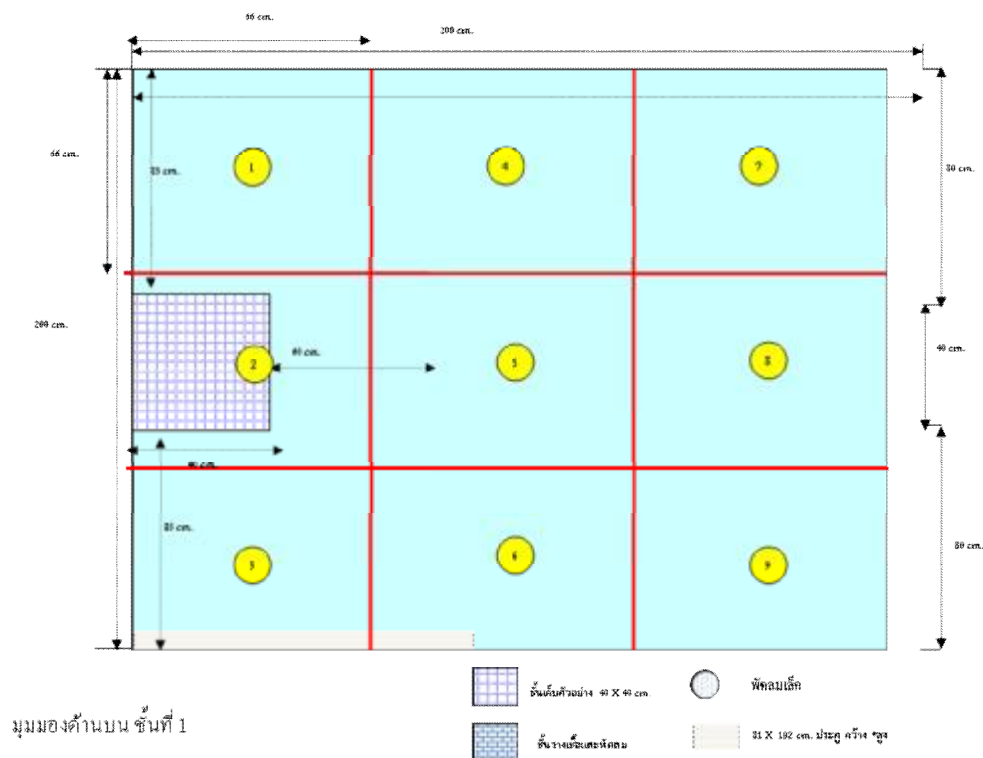
อนึ่ง การศึกษานี้กระทำในสภาวะที่เอื้อต่อการเกิดอนุมูลอิสระสูงสุดแล้ว (ที่อุณหภูมิ 30.5-31.2 $^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ 58-63% ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที) การศึกษาการเกิดอนุมูลอิสระภายใต้สภาวะอื่นที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมแตกต่างกัน คณะผู้วิจัยลงความเห็นว่าไม่จำเป็นต้องกระทำการศึกษาอีก

4.2 การใช้แบบจำลอง Computational Fluid Dynamics

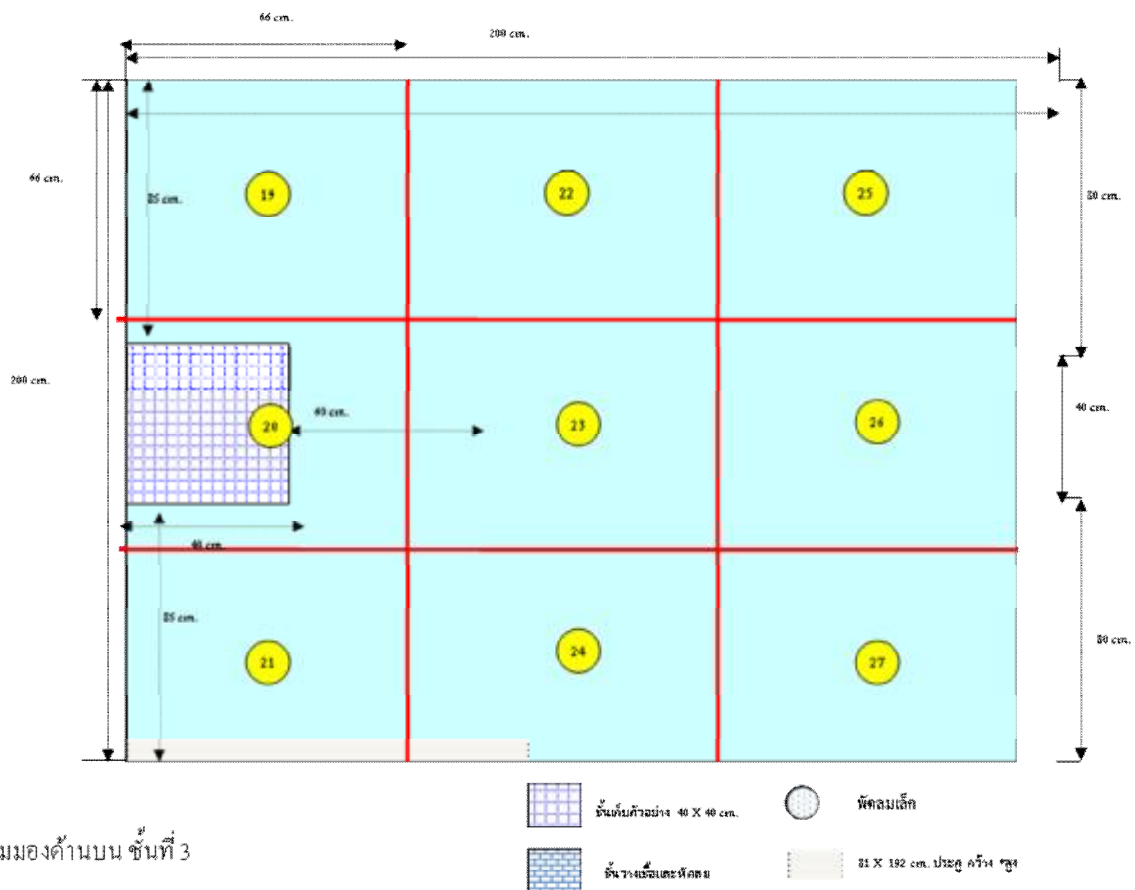
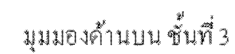
การศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์ความเร็วลมภายในห้องทดลองขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร และสูง 2 เมตร ที่มีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น พัดลม อุปกรณ์พ่นเชื้อจุลินทรีย์ และอุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศอยู่ภายใน (รูปที่ 26) เปรียบเทียบกับการคำนวณพลศาสตร์การไหลของอากาศภายในห้อง ซึ่งลมภายในห้องมาจากการเปิดพัดลมที่ปรับระดับให้มีความเร็ว 2.3 เมตร/วินาที การวัดความเร็วลมกระทำที่ระดับความสูง 60, 120 และ 180 เซนติเมตรจากพื้นห้อง ในแต่ละระดับความสูงในแนวระนาบได้แบ่งพื้นที่ออกเป็น 9 ส่วนเท่าๆกัน (รูปที่ 27) และวัดความเร็วลมที่กึ่งกลางของแต่ละพื้นที่ ซึ่งผลของความเร็วลมที่วัดได้จริงในห้องทดลองใน 3 ระดับความสูง ระดับละ 9 จุดๆละ 9 ครั้ง แสดงได้ในตารางที่ 1



รูปที่ 26 ลักษณะของห้องทดลอง



(ยังมีต่อ)

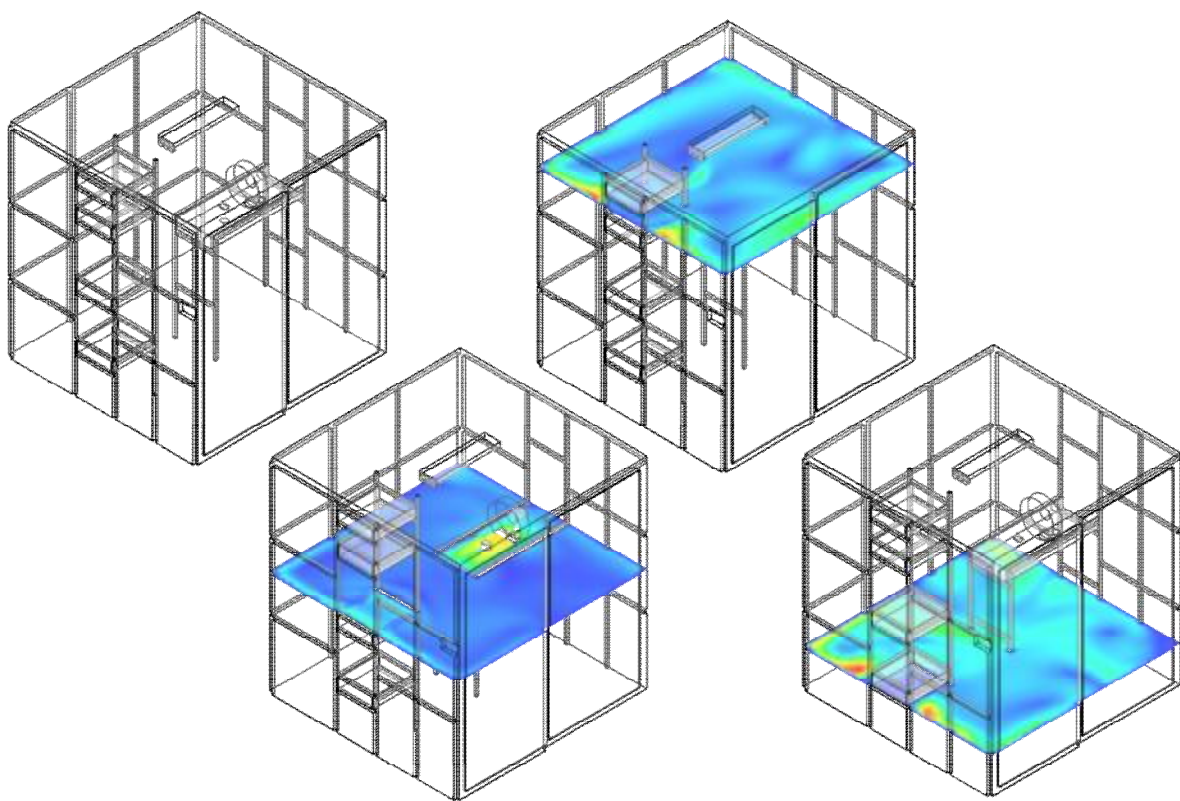


รูปที่ 27 ตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลม (มุมมองจากด้านบนของห้องทดลอง)

ตารางที่ 1 ความเร็วลมที่วัดได้จริงในแต่ละจุดภายในห้องทดลอง

จุดที่ ครั้งที่	ความเร็วลมที่วัดได้จริง (เมตร/วินาที)									ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตร/วินาที)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0.32	0.27	0.24	0.31	0.28	0.25	0.35	0.32	0.28	0.29
2	0.12	0.08	0.05	0.19	0.12	0.08	0.15	0.09	0.07	0.11
3	0.22	0.18	0.13	0.24	0.15	0.11	0.21	0.17	0.13	0.17
4	0.18	0.12	0.08	0.15	0.11	0.06	0.16	0.13	0.06	0.12
5	0.29	0.26	0.21	0.27	0.23	0.20	0.29	0.22	0.19	0.24
6	0.37	0.27	0.21	0.36	0.28	0.24	0.36	0.29	0.20	0.29
7	0.31	0.27	0.22	0.29	0.26	0.21	0.30	0.28	0.24	0.26
8	0.29	0.23	0.18	0.27	0.22	0.16	0.31	0.26	0.19	0.23
9	0.14	0.10	0.05	0.13	0.11	0.07	0.14	0.10	0.08	0.10
10	0.17	0.11	0.06	0.18	0.12	0.05	0.15	0.12	0.03	0.11
11	0.49	0.43	0.37	0.52	0.45	0.34	0.48	0.41	0.33	0.42
12	0.24	0.19	0.12	0.25	0.17	0.13	0.24	0.16	0.12	0.18
13	0.13	0.07	0.02	0.14	0.10	0.05	0.15	0.09	0.07	0.09
14	0.25	0.21	0.16	0.23	0.19	0.12	0.26	0.20	0.13	0.19
15	0.24	0.2	0.16	0.25	0.18	0.13	0.27	0.21	0.18	0.20
16	0.21	0.18	0.11	0.23	0.16	0.12	0.25	0.19	0.14	0.18
17	2.14	1.93	1.74	2.18	1.81	1.65	2.21	2.03	1.83	1.95
18	0.14	0.09	0.03	0.12	0.10	0.06	0.14	0.08	0.05	0.09
19	0.12	0.08	0.01	0.13	0.10	0.02	0.13	0.11	0.06	0.08
20	0.12	0.06	0.01	0.10	0.07	0.03	0.11	0.05	0.02	0.06
21	0.16	0.12	0.08	0.19	0.12	0.07	0.14	0.10	0.05	0.11
22	0.25	0.22	0.18	0.26	0.21	0.18	0.23	0.19	0.14	0.21
23	0.15	0.11	0.04	0.18	0.11	0.06	0.13	0.07	0.03	0.10
24	0.12	0.10	0.08	0.11	0.11	0.07	0.13	0.09	0.06	0.10
25	0.09	0.06	0.05	0.10	0.06	0.04	0.11	0.08	0.03	0.07
26	0.13	0.11	0.06	0.16	0.12	0.07	0.15	0.13	0.07	0.11
27	0.18	0.14	0.10	0.15	0.11	0.08	0.19	0.14	0.11	0.13

จากนั้นได้นำเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาทำการจำลองการไหลของอากาศภายในห้องทดลองเพื่อหาพฤติกรรมของอากาศภายในห้อง โดยใช้การแก้ระบบสมการที่ทดแทนความเป็นจริงของการไหลใน 3 มิติ เรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) เมื่อดำเนินการแก้ระบบสมการดังกล่าวแล้ว จะทำให้ทราบถึงค่าความเร็วของอากาศ และ/หรือค่าความดันที่เกิดขึ้นในจุดต่างๆภายในห้องทดลอง โดยสามารถแสดงเป็นแถบสีที่บ่งบอกถึงระดับความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 28 โดยสีแดงหมายถึงค่าความเร็วสูงสุด และไล่ระดับค่ามาเป็นสีเหลือง สีเขียว จนถึงสีน้ำเงินที่มีค่าความเร็วต่ำที่สุด



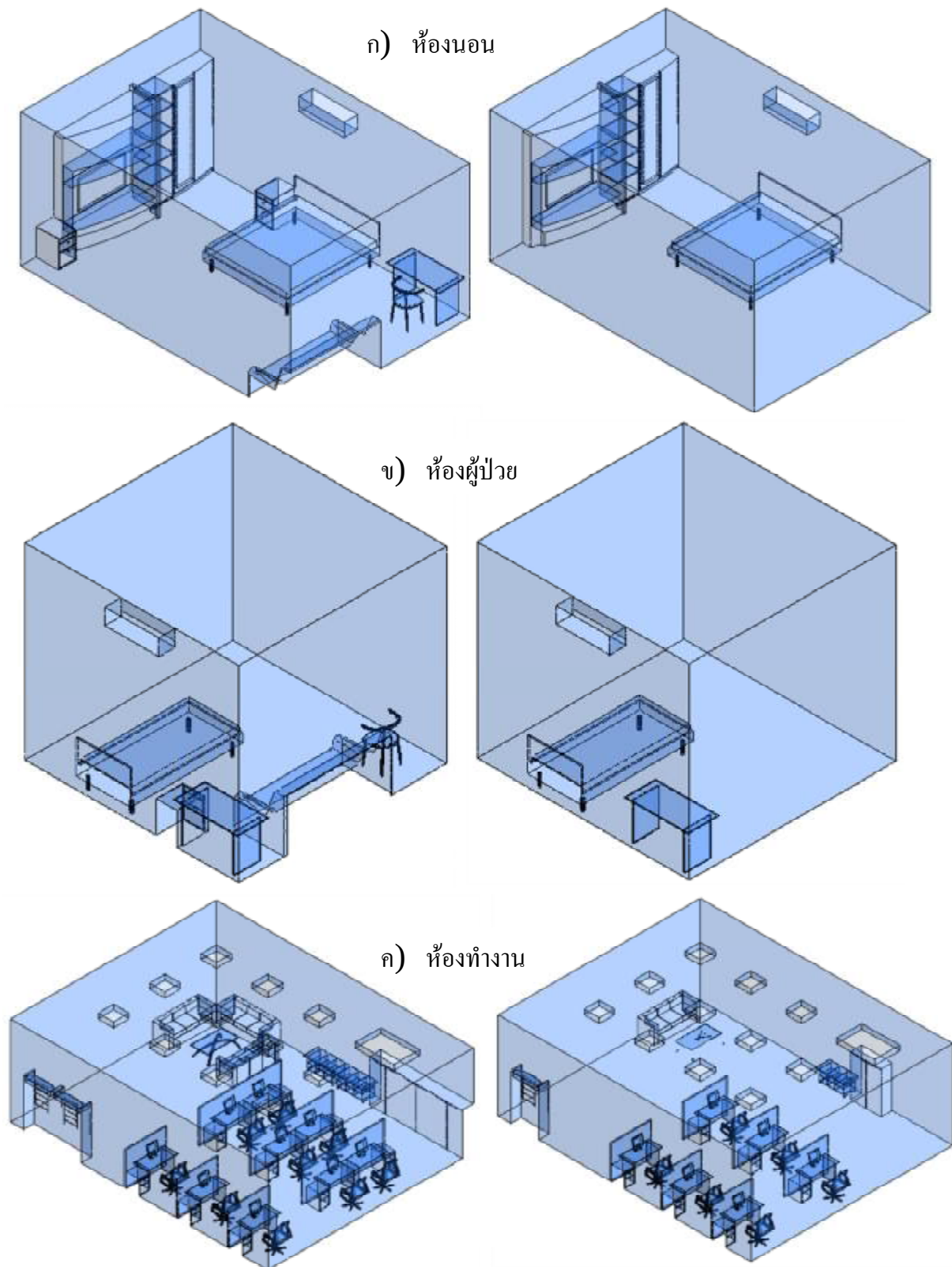
รูปที่ 28 ผลการคำนวณความเร็วลมภายในห้องด้วยพลศาสตร์ของไหลที่เกิดขึ้นในห้องทดลอง

จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมที่ได้จากการวัดจริง ณ จุดต่างๆในตารางที่ 1 กับค่าการคำนวณโดยสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ได้จากตำแหน่งเดียวกัน เพื่อทราบถึงความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับสถานะจริง ซึ่งผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ร้อยละของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดจริง

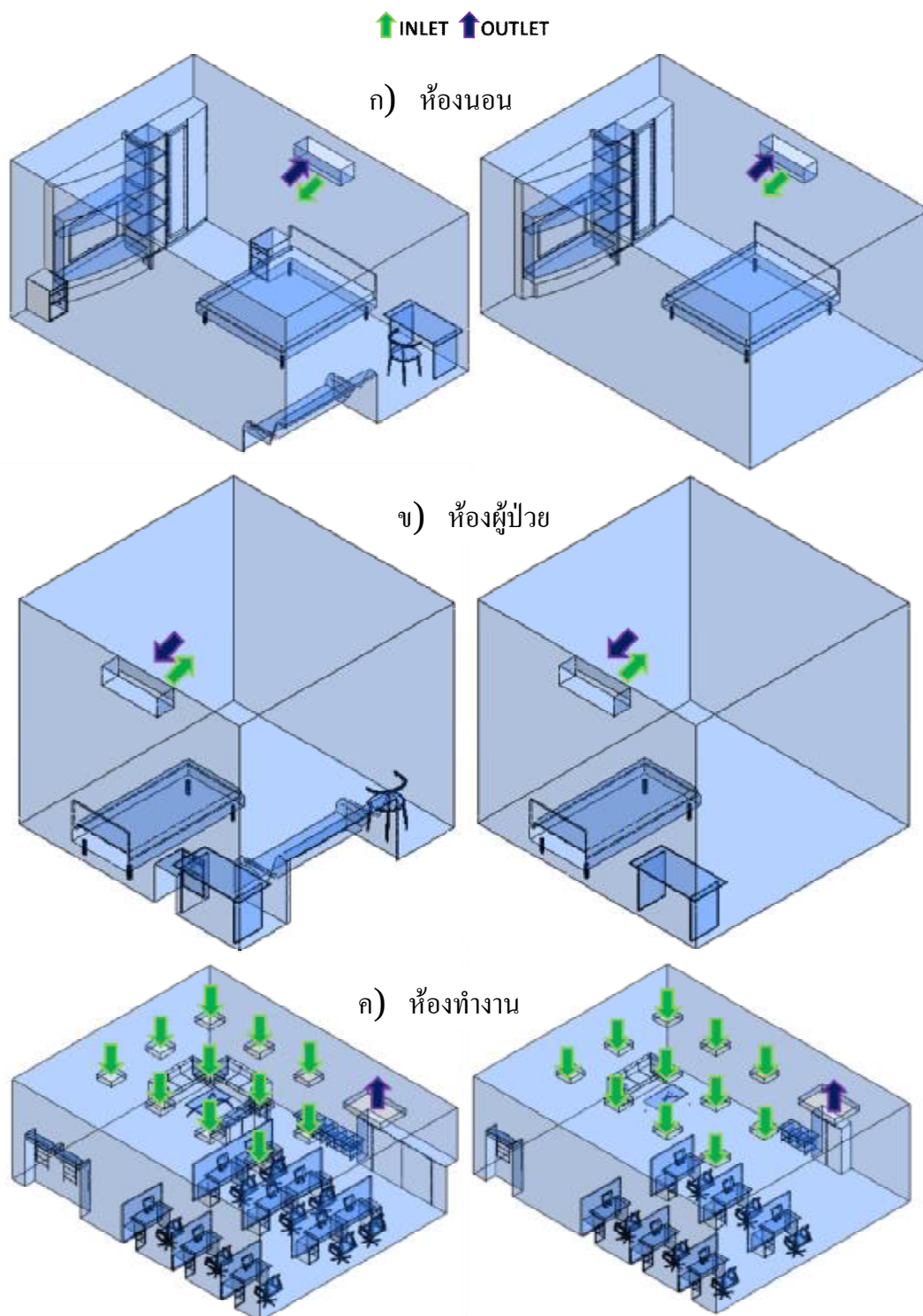
ตำแหน่ง	ความเร็วลมจากการคำนวณ (เมตร/วินาที)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
1	0.30	3.05
2	0.08	-24.21
3	0.21	22.73
4	0.13	11.43
5	0.22	-8.33
6	0.36	25.58
7	0.29	9.66
8	0.26	10.90
9	0.10	-2.17
10	0.16	45.45
11	0.44	3.66
12	0.17	-5.56
13	0.09	-1.22
14	0.14	-28.00
15	0.25	23.63
16	0.23	30.19
17	2.04	4.79
18	0.09	0.00
19	0.18	113.16
20	0.05	-21.05
21	0.14	22.33
22	0.24	16.13
23	0.18	84.09
24	0.10	3.45
25	0.13	88.71
26	0.14	26.00
27	0.17	27.50

จากการเปรียบเทียบ พบว่าความเร็วลมจากการคำนวณและการวัดจริงมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 17.85% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ การศึกษาลำดับต่อไปจึงเป็นการนำผลการคำนวณพลศาสตร์ของไหลมาทดแทนการทดสอบจริงในห้องรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ห้องนอน ห้องผู้ป่วย และห้องทำงาน ซึ่งในแต่ละรูปแบบของห้องมีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์ 2 แบบ คือ แบบโล่ง และแบบไม่โล่ง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอากาศที่เกิดขึ้นในห้อง เนื่องจากการทดสอบจริงมีค่าใช้จ่ายที่สูงและใช้เวลามาก ในที่นี้จึงประยุกต์ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลมาทดแทนการทดลองจริง โดยทั้งหมดมีกรณีศึกษาทั้งสิ้น 6 กรณี ดังรูปที่ 29



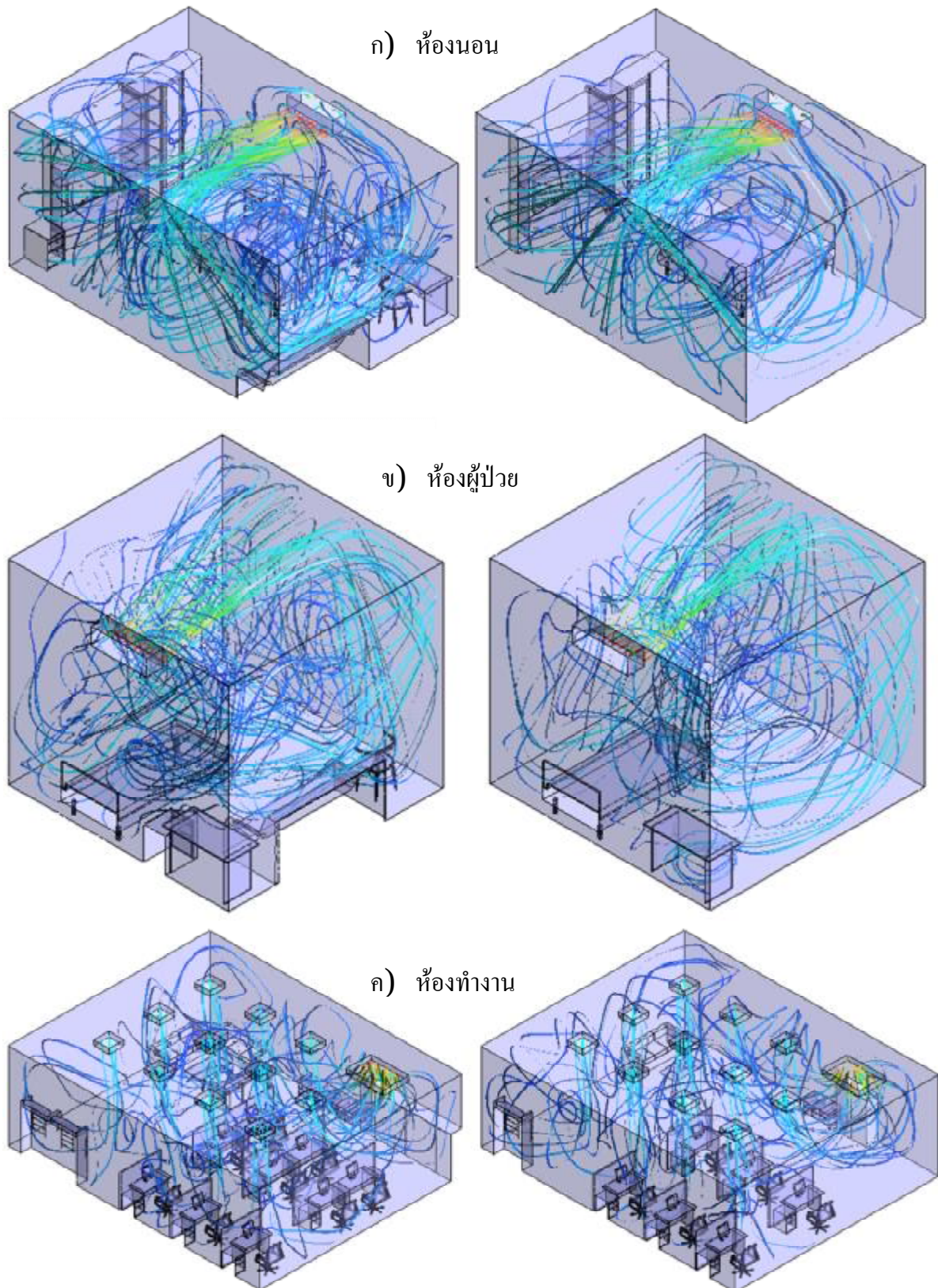
รูปที่ 29 ลักษณะห้องรูปแบบต่างๆ ที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่ง (ซ้าย) และแบบโล่ง (ขวา)

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เริ่มต้นกำหนดให้มีจุลินทรีย์กระจายสม่ำเสมอทั่วห้อง และกำหนดให้ความเร็วลมจากเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 4 เมตรต่อวินาที เมื่ออากาศไหลผ่านในห้องแล้ว อากาศจะไหลกลับมายังช่องไหลกลับของอากาศ ดังรูปที่ 30

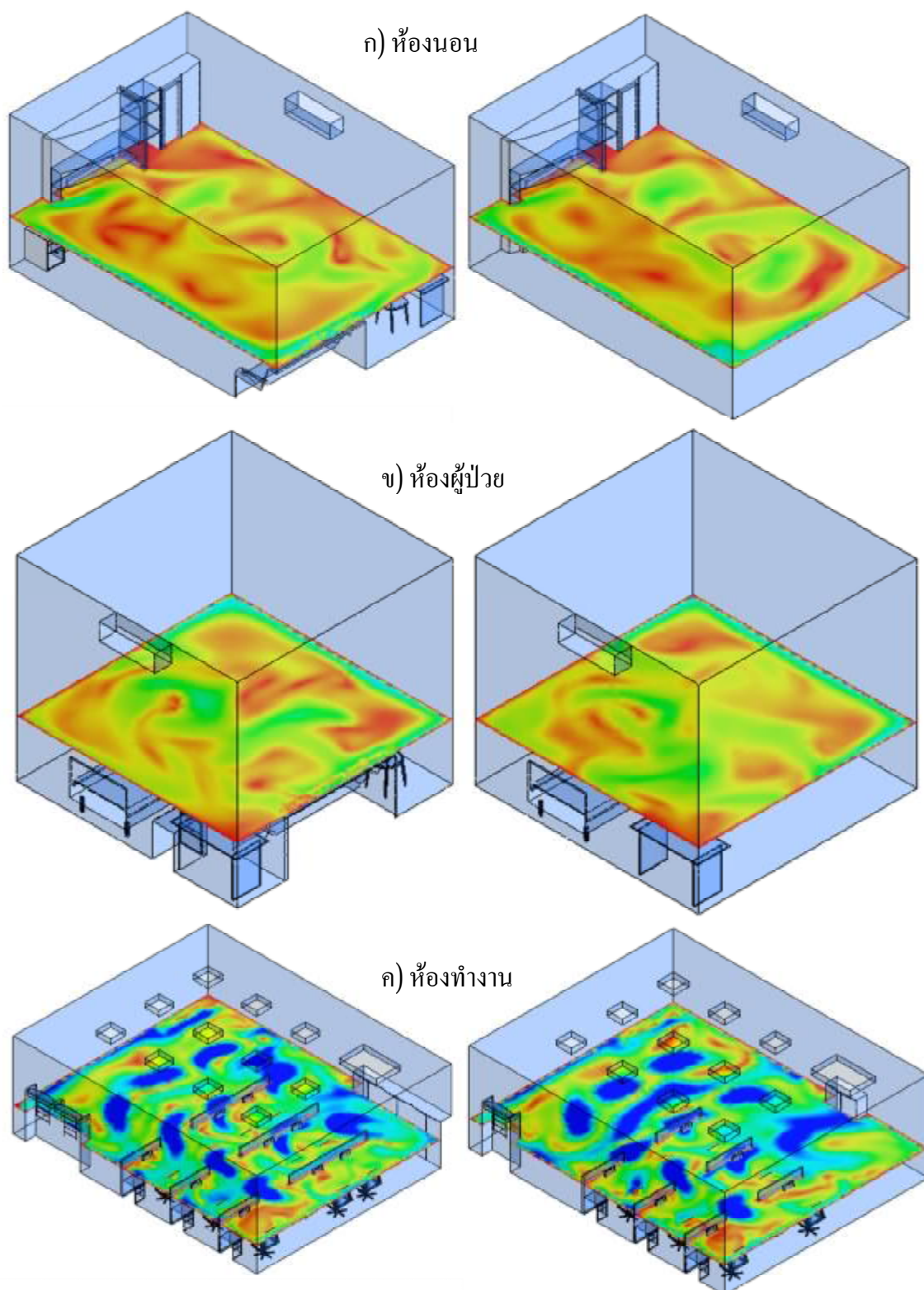


รูปที่ 30 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตห้องที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่ง (ซ้าย) และแบบโล่ง (ขวา)

ผลการวิเคราะห์พบว่า การไหลของอากาศในห้องแบบไม่โล่งนั้น จะเกิดการหมุนวนของอากาศในปริมาณมาก (รูปที่ 31) โดยสีที่แสดงความเร็วลมเรียงจากมากไปน้อย คือ สีแดง เหลือง เขียว ฟ้า และน้ำเงิน ตามลำดับ บริเวณที่มีความเร็วลมต่ำจะเกิดเป็นจุดอับที่ทำให้เกิดการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ (รูปที่ 32) มากกว่ากรณีห้องแบบโล่งที่อากาศมีการไหลเวียนได้ดีกว่า โดยสีแดงเป็นบริเวณที่เป็นจุดอับมากที่สุด ส่วนสีน้ำเงินเป็นบริเวณที่เป็นจุดอับน้อยที่สุด



รูปที่ 31 การไหลของอากาศในห้องที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่ง (ซ้าย) และแบบโล่ง (ขวา)



รูปที่ 32 ปริมาณจุลื่นทรีย์ในห้องที่มีการจัดวางเฟอร์นิเจอร์แบบไม่โล่ง (ซ้าย) และแบบโล่ง (ขวา)

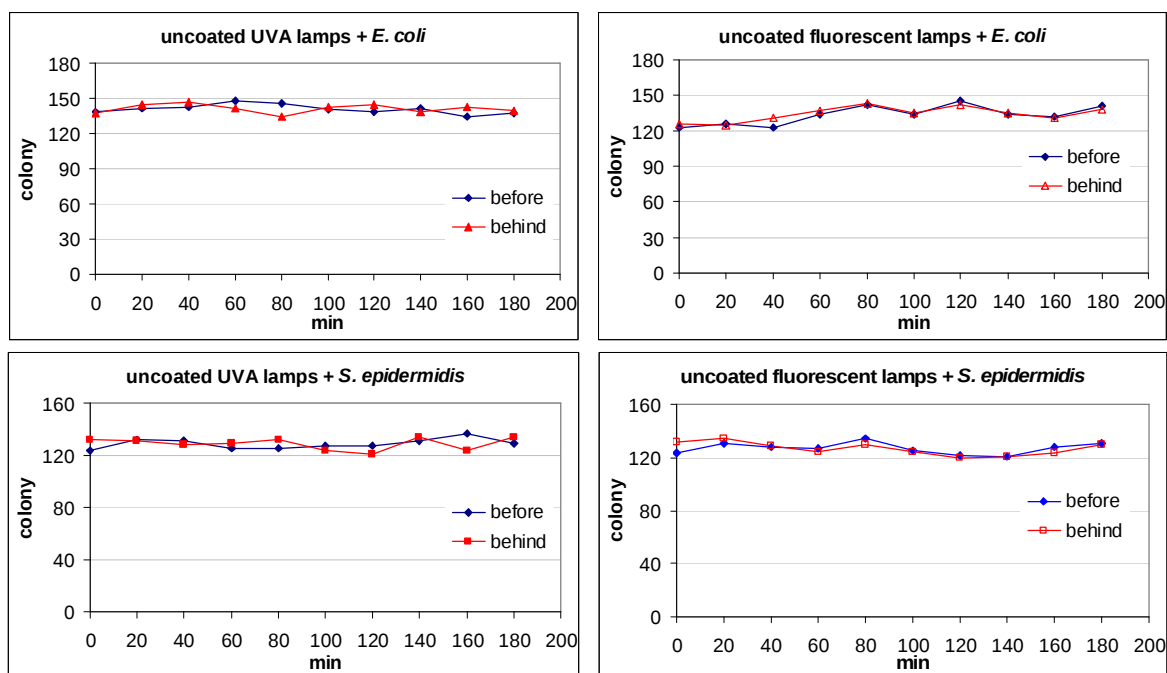
จากผลการวิเคราะห์ พบว่าตำแหน่งที่ควรติดตั้งหลอดไฟมาเชื้อโรค ควรอยู่ห่างจากช่องลมที่ออกจากเครื่องปรับอากาศประมาณ 50 เซนติเมตร (ค่าประมาณเบื้องต้น) เนื่องจากบริเวณดังกล่าว ค่าความเร็วลมมีความเหมาะสมและทิศทางของลมจะถูกบังคับให้อากาศสัมผัสกับผิวของหลอดไฟมาเชื้อโรคโดยตรง

4.3 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

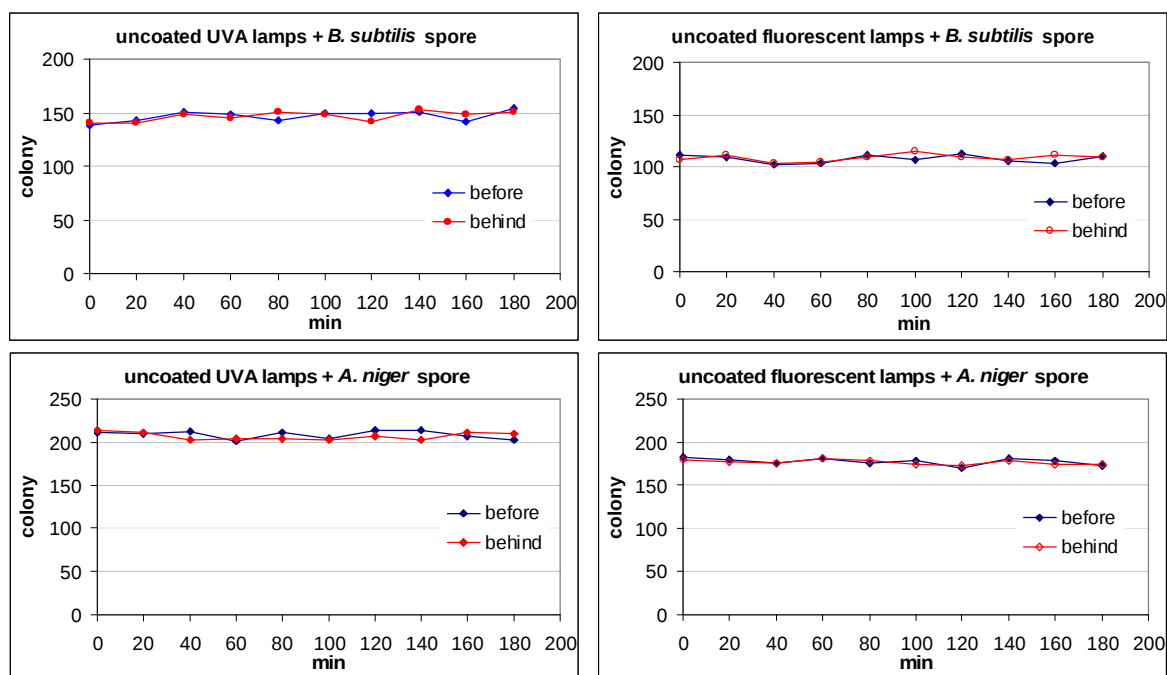
จุลินทรีย์ในอากาศในที่นี้ได้แก่ *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis*, สปอร์ของ *Bacillus subtilis* และสปอร์ของ *Aspergillus niger* การศึกษาเริ่มจากการทดสอบว่าหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ไม่มีการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศได้หรือไม่ ก่อนเข้าสู่ส่วนของการศึกษาถึงชนิดของสารยึดติด (binder) ที่เหมาะสมต่อการเคลือบที่กำจัดจุลินทรีย์ได้มากที่สุด และผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีต่อประสิทธิภาพของหลอดไฟเคลือบฯ ซึ่งผลของการศึกษาแสดงได้ดังนี้

4.3.1 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของหลอดไฟที่ไม่ได้เคลือบฯ

ผลของการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ไม่ได้เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ เปรียบเทียบระหว่างจำนวนโคโลนีที่พบก่อนและหลังหลอดไฟเรียงตามชนิดของจุลินทรีย์ แสดงได้ดังรูปที่ 33 โดยอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วงของ 24.3-25.4 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 43-56% ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที และความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอที่ผิวของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ วัดได้ 3.33-3.45 mW/cm² และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์วัดได้ 0.13-0.15 mW/cm²



(ยังมีต่อ)

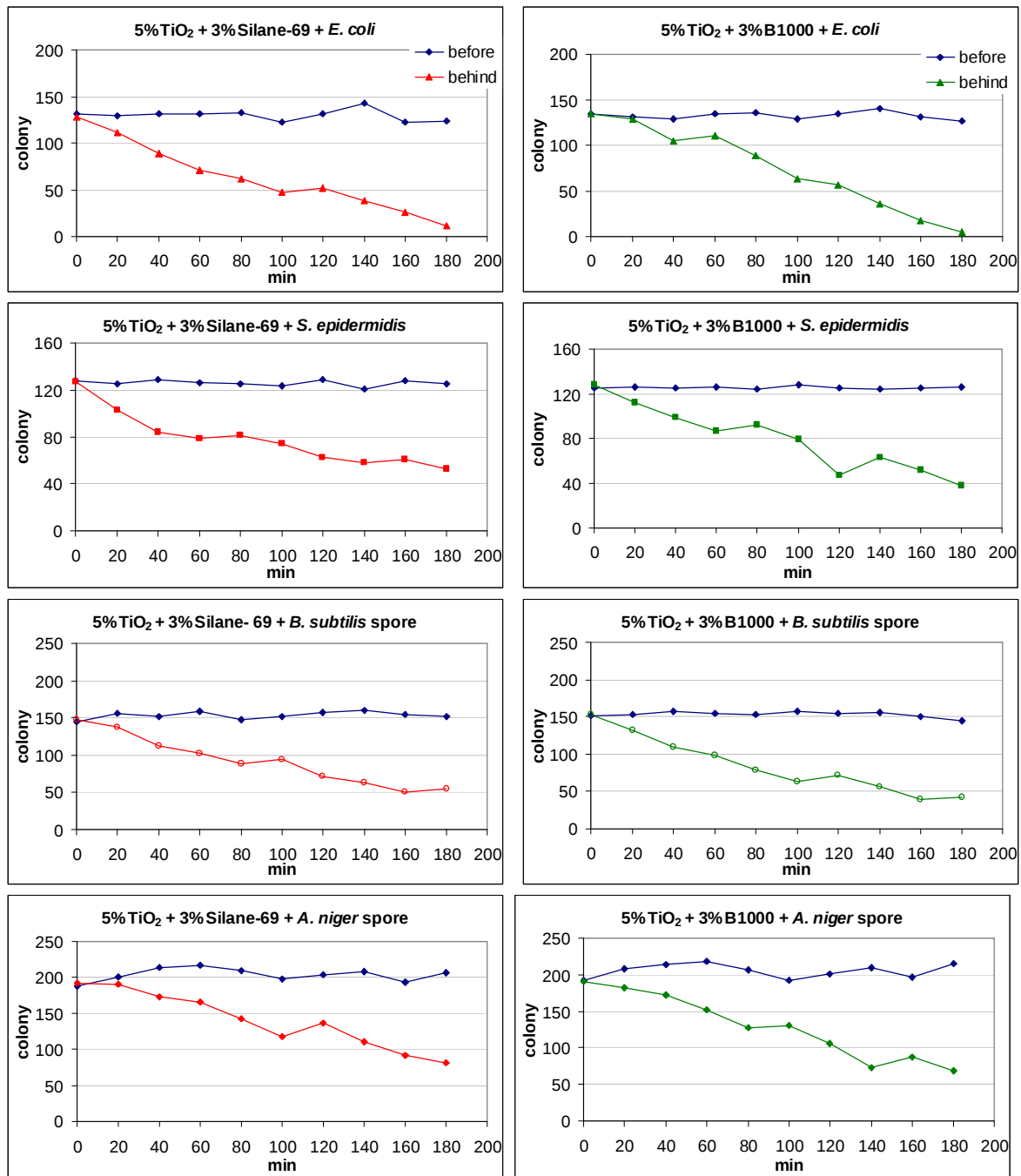


รูปที่ 33 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของหลอดไฟที่ไม่ได้เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการศึกษาชัดเจนว่าหลอดไฟปกติที่ไม่ได้เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่ว่าจะเป็นหลอด UVA แบล็คไลท์ หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ส่วนแต่ไม่สามารถกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศได้เลย การศึกษาลำดับต่อไปจึงเป็นการพ่นสเปรย์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมสารสารยึดติดชนิดต่างๆและทดสอบความสามารถกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศในลักษณะเดิม

4.3.2 สารยึดติดที่เหมาะสมกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

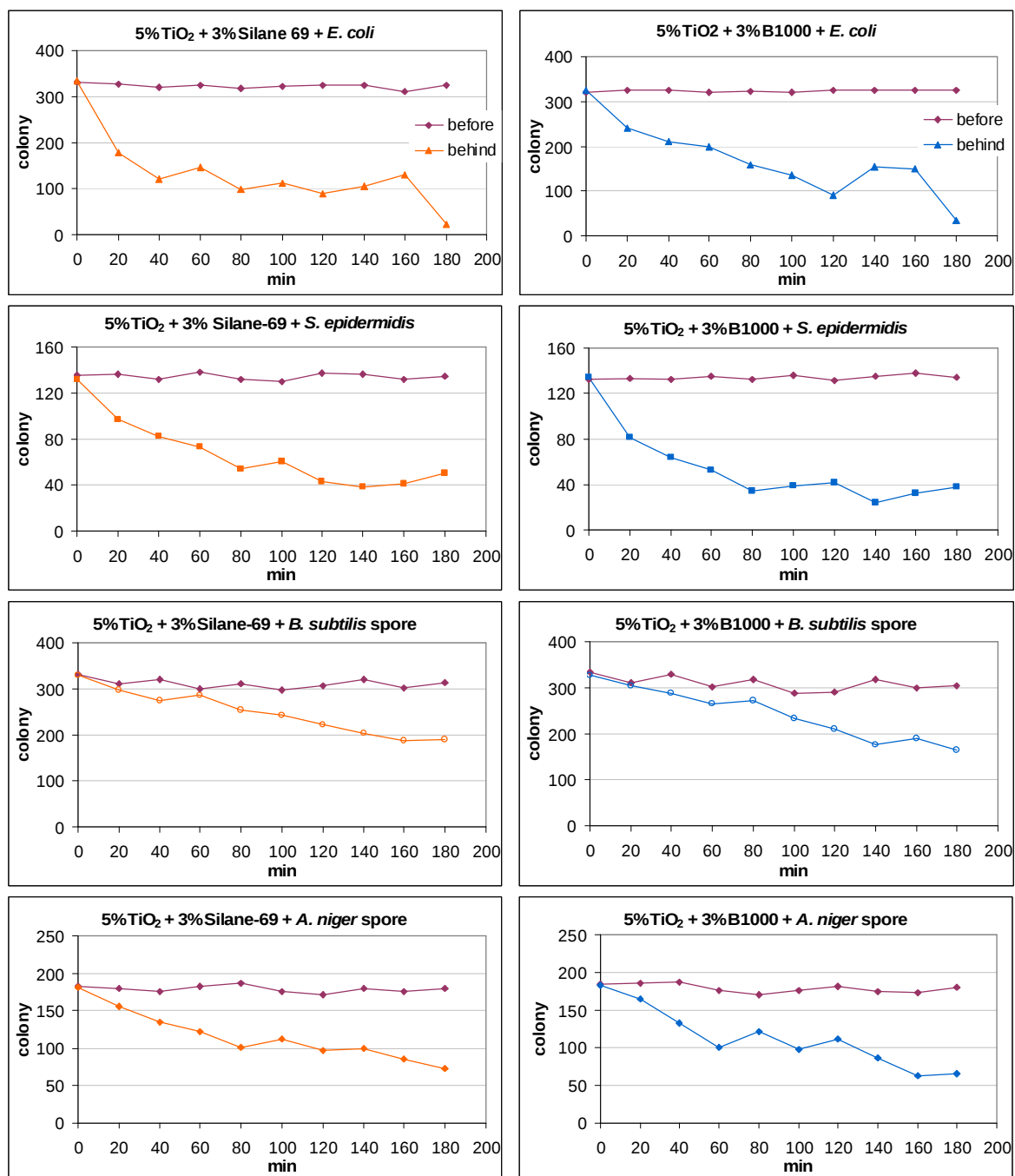
สารยึดติดที่ทำการศึกษามี 2 ชนิด คือ Silane-69 และ B1000 ในความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ซึ่งการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์คงที่ 5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ในช่วงแรกของการศึกษาเป็นการทดลองใช้ 3% Silane-69 และ 3% B1000 ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศทั้ง 4 ชนิด โดยในการเคลือบหลอดไฟนั้นแบ่งเป็น 3% Silane-69 ครึ่งหนึ่งของหลอด และ 3% B1000 อีกครึ่งหนึ่งของหลอดแล้วศึกษาการกำจัดจุลินทรีย์แต่ละชนิดไปในคราวเดียวกัน ผลการศึกษาจากการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 34 ซึ่งเป็นจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ที่พบก่อนและหลังหลอดไฟ ส่วนการแสดงผลเป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์แต่ละชนิด แสดงไว้ในรูปที่ 36 อุณหภูมิภายใน chamber อยู่ในช่วงของ 25.1–25.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 51–53% ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอที่ผิวของหลอด UVA แบล็คไลท์ ผังที่ผสมด้วย 3% Silane-69 วัดได้ 1.87–1.9 mW/cm² ส่วนผังที่ผสมด้วย 3% B1000 วัดได้ 1.9 mW/cm²



รูปที่ 34 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบสีกไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 (ฝั่งซ้ายมือ) และผสม 3% B1000 (ฝั่งขวามือ)

จากรูปที่ 34 พบว่าการใช้ 3% Silane-69 กำจัด *E. coli* ได้มากที่สุดคือ 97.5% รองลงมาคือ กำจัดสปอร์ของ *A. niger* ได้ 71% ส่วน *B. subtilis* กำจัดได้ 64% และ *S. epidermidis* กำจัดได้ 51% ขณะที่ 3% B1000 กำจัด *E. coli* ได้มากที่สุดเช่นกันคือ 99% รองมาคือ *A. niger* 80% ส่วน *B. subtilis* กำจัดได้ 71% และ *S. epidermidis* กำจัดได้ 60% จากนั้นจึงลองเปลี่ยนเป็นหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 และ 3% B1000 ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 35 อุณหภูมิภายใน chamber อยู่ในช่วงของ 24.8-25.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 45-56% ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที

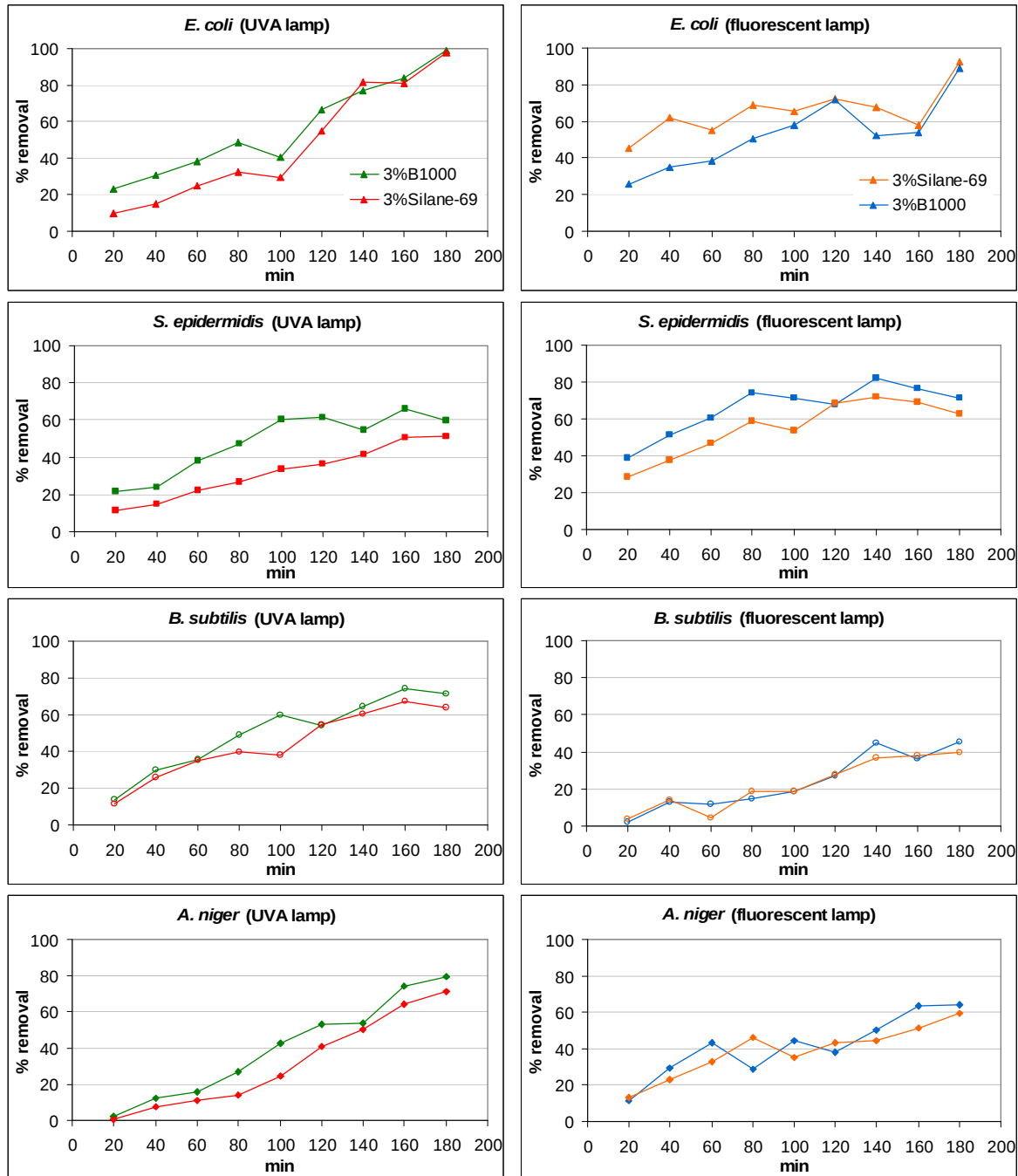
ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลตเอทีฟของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ฟุ้งที่ใช้ 3% Silane-69 วัดได้ 0.084-0.085 mW/cm² ส่วนฟุ้งที่ใช้ 3% B1000 วัดได้ 0.096 mW/cm²



รูปที่ 35 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 (ฟุ้งซ้ายมือ) และ 3% B1000 (ฟุ้งขวามือ)

จากรูปที่ 35 ยังคงพบว่า *E. coli* นั้นถูกกำจัดได้ง่ายที่สุดคือ 93% เมื่อใช้ 3% Silane-69 และ 89% เมื่อใช้ 3% B1000 รองลงมาได้แก่ *S. epidermidis* ถูกกำจัดได้ 63% เมื่อใช้ Silane-69 และ 72% เมื่อใช้ B1000 ส่วนสปอร์ของ *A. niger* นั้นถูกกำจัดไปได้ 59% เมื่อใช้ Silane-69 และ 64% เมื่อใช้ B1000

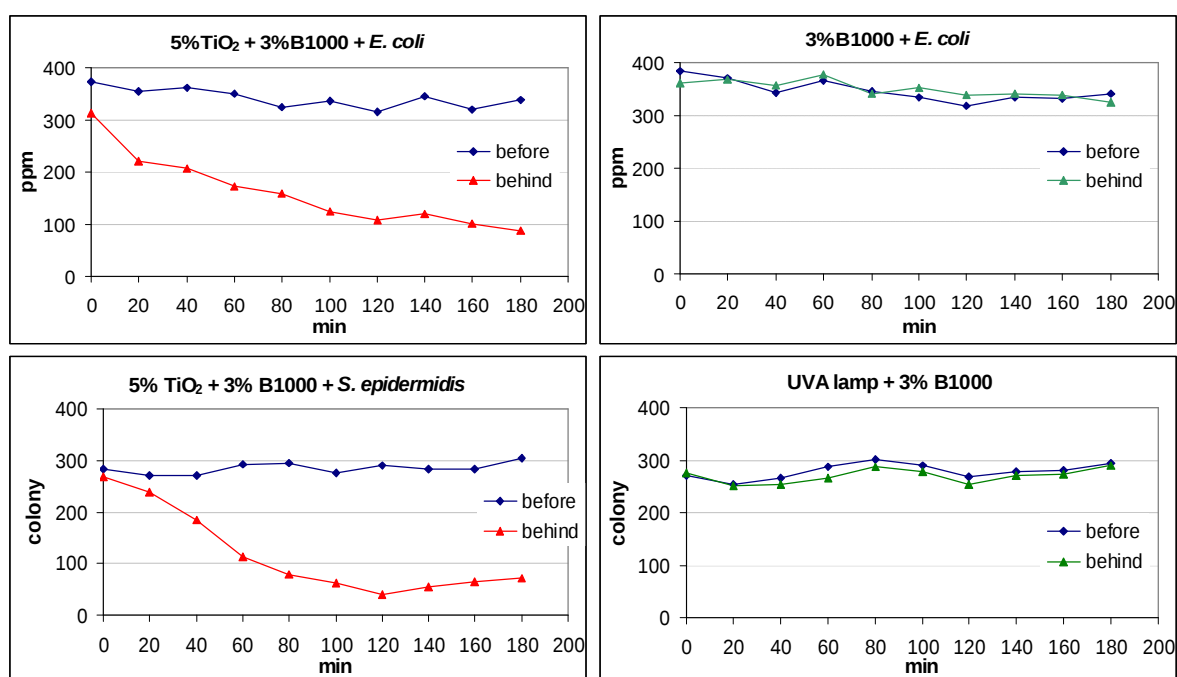
ขณะที่สปอร์ของ *B. subtilis* นั้นถูกกำจัดได้ยากที่สุดคือ ลดลง 40% เมื่อใช้ Silane-69 และ 46% เมื่อใช้ B1000 และเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบ รูปที่ 36 จึงแสดงเป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์แต่ละชนิด ระหว่างการใช้ 3% Silane-69 กับ 3% B1000 ทั้งหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 36 ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้ 3% Silane-69 เปรียบเทียบกับ 3% B1000

จากรูปจะเห็นได้ว่าการใช้ 3% B1000 เป็นสารยัดติด ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด จุลินทรีย์ในอากาศที่เหนือกว่าการใช้ 3% Silane-69 เป็นส่วนใหญ่ (ยกเว้นการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เคลือบๆ กำจัด *E. coli*) ลำดับต่อไปจึงทำการทดสอบว่าประสิทธิภาพที่ปรากฏนั้นมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะ

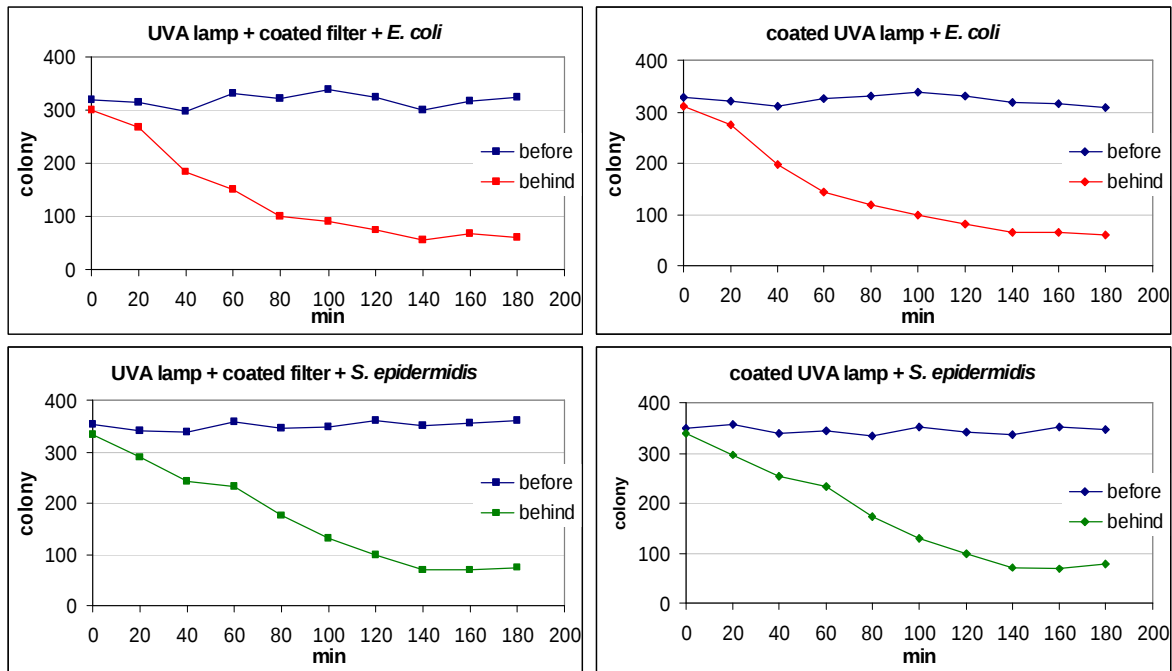
ตะไคร่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแสงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือมาจากการเกาะติดของ จุลินทรีย์ในอากาศ (adsorption) กับตัวสารยึดติดที่ใช้กันแน่ คณะผู้วิจัยจึงทำการเคลือบหลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำ ด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 ครึ่งหนึ่งของหลอดไฟ เปรียบเทียบกับการ เคลือบเฉพาะ 3% B1000 โดยไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์อีกครึ่งหนึ่งของหลอดไฟ ศึกษา กับ *E. coli* ใน คราวเดียวกัน และทดสอบซ้ำกับ *S. epidermidis* ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 37 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 26-27 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 38-47% ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ผิวของ หลอดไฟฝั่งที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์วัดได้ 2.43-3.18 mW/cm² ส่วนฝั่งที่เคลือบเฉพาะ 3% B1000 วัดได้ 4.38-4.54 mW/cm²



รูปที่ 37 การกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำ เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติด B1000 เปรียบเทียบกับหลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยึดติด B1000

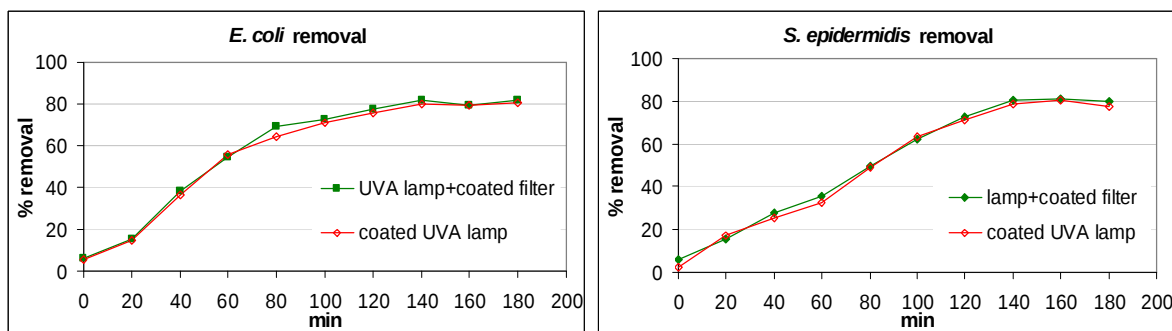
จากรูปนั้นชัดเจนว่าการลดลงของจุลินทรีย์ที่ปรากฏนั้นมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยแท้จริง ไม่ใช่มาจากการเกาะติดของจุลินทรีย์บนสารยึดติดแต่อย่างใด ทั้งนี้ การศึกษาการกำจัด จุลินทรีย์ได้กระทำควบคู่ไปกับการใช้หลอดไฟเคลือบในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ (หัวข้อ 4.4) ซึ่งผลของการศึกษาในหัวข้อ 4.4 พบว่า การพ่นหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับสารยึดติด 3% D3005 และเติมโลหะเหล็กกรัมด้วยอีก 1% ให้ผลที่ดีกว่าการ เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์(และสารยึดติด)บนหลอดไฟโดยตรง คณะผู้วิจัยจึงนำวิธีการดังกล่าวมา ทดสอบกับการกำจัดจุลินทรีย์ด้วยการพ่นหลอดไฟดังกล่าวจะให้ผลที่เหนือกว่าการใช้หลอดไฟที่ เคลือบโดยตรงหรือไม่ โดยทดสอบกับหลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำ ซึ่งครึ่งหนึ่งนั้นเคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe บนหลอดไฟโดยตรง (ในที่นี้จะเรียกว่า coated UVA

lamp) และอีกครั้งหนึ่งพันด้วยแผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe (ในที่นี้จะเรียกว่า UVA lamp+coated filter) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัด *E. coli* และ *S. epidermidis* ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 38 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 26.4-26.7 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 47-58% ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอทีผิวหน้าของหลอดไฟฟุ้งที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรงวัดได้ 2.38 mW/cm² ส่วนฟุ้งที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯวัดได้ 0.45 mW/cm²



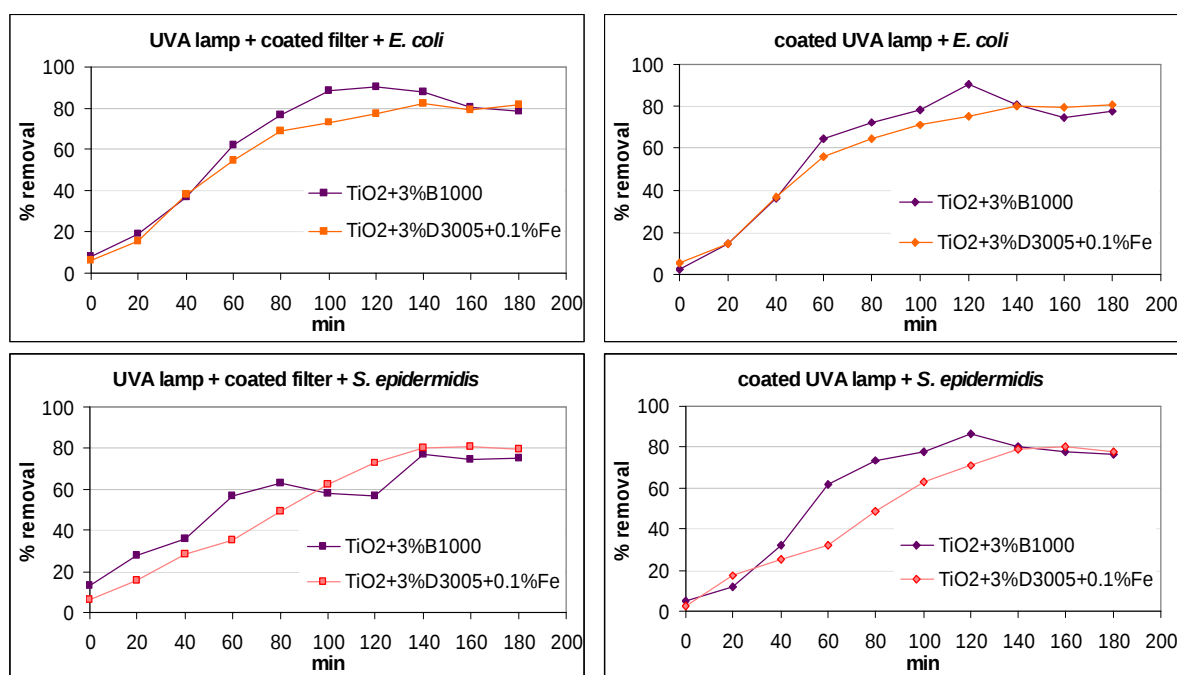
รูปที่ 38 การกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟUVA แบบลึกลูท เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยัคิด 3% D3005 + 0.1% Fe และหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ

จากรูปที่ 38 สามารถนำเสนอใหม่เป็นร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้หลอดไฟที่เคลือบฯ โดยตรงกับหลอดไฟที่พันด้วยใยแก้วเคลือบฯได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 39 ดังนี้



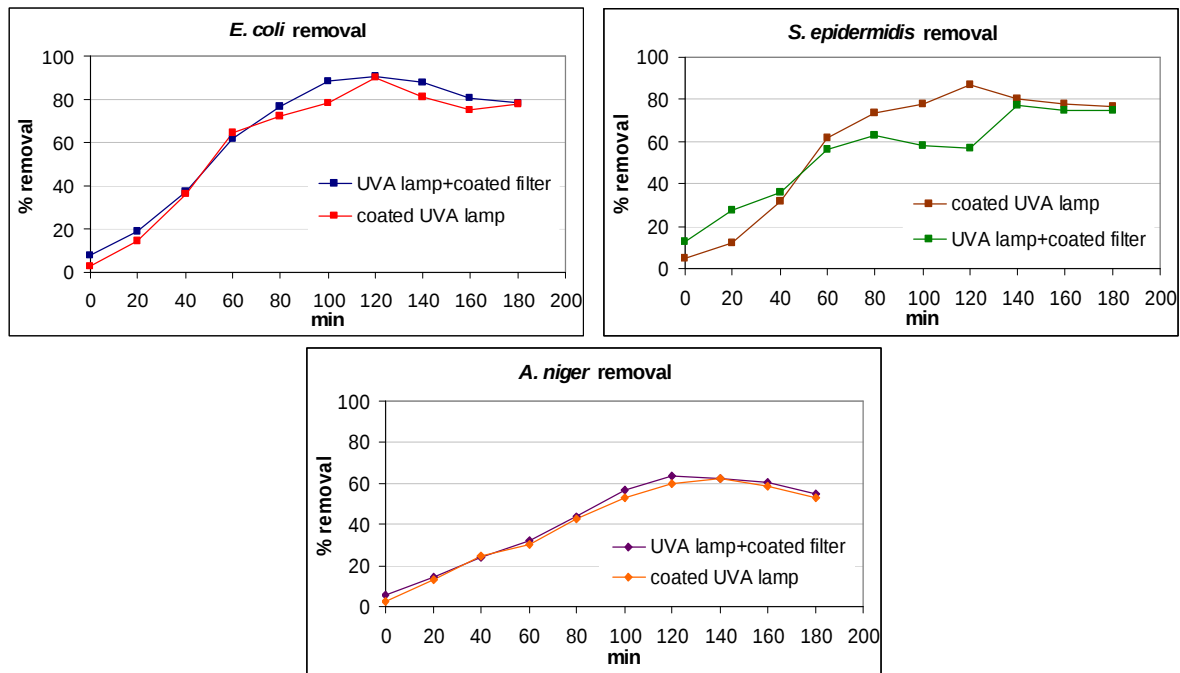
รูปที่ 39 ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกลูท เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยัคิด 3% D3005 + 0.1% Fe โดยตรง และหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ

ผลการศึกษานี้ชัดเจนว่าการพ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศแต่อย่างใด แม้ว่าแผ่นใยแก้วจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มากขึ้นก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงลองทดสอบเปรียบเทียบชนิดของสารยึดติดอีกครั้ง ระหว่างการใช้สารยึดติดชนิดเดิม (3% B1000 ผสม 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์) พ่นสเปรย์บนหลอด UVA แบล็กไลท์ครึ่งหนึ่งของหลอดกับการพ่นสเปรย์ด้วย 3% D3005+0.1% Fe อีกครึ่งหนึ่งของหลอด (coated UVA lamp) รวมถึงมีการศึกษาการพ่นหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติด 3% B1000 กับ 3% D3005+0.1% Fe อีกด้วย (UVA lamp + coated filter) ศึกษาทั้ง *E. coli* และ *S. epidermidis* ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็กไลท์ เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติดชนิด 3% D3005 + 0.1% Fe เปรียบเทียบกับชนิด 3% B1000

ผลปรากฏว่า การใช้สารยึดติด 3% B1000 ยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศที่เหนือกว่า 3% D3005 + 0.1% Fe เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น การศึกษาที่เหลือทั้งหมดจึงเลือกใช้ 3% B1000 เป็นสารยึดติดที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ซึ่งจากผลการศึกษาในรูปที่ 40 ยังสามารถเปรียบเทียบเป็นความสามารถของหลอดไฟที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 3% B1000 กับหลอดไฟที่เคลือบ 3%B1000 โดยตรงได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 41



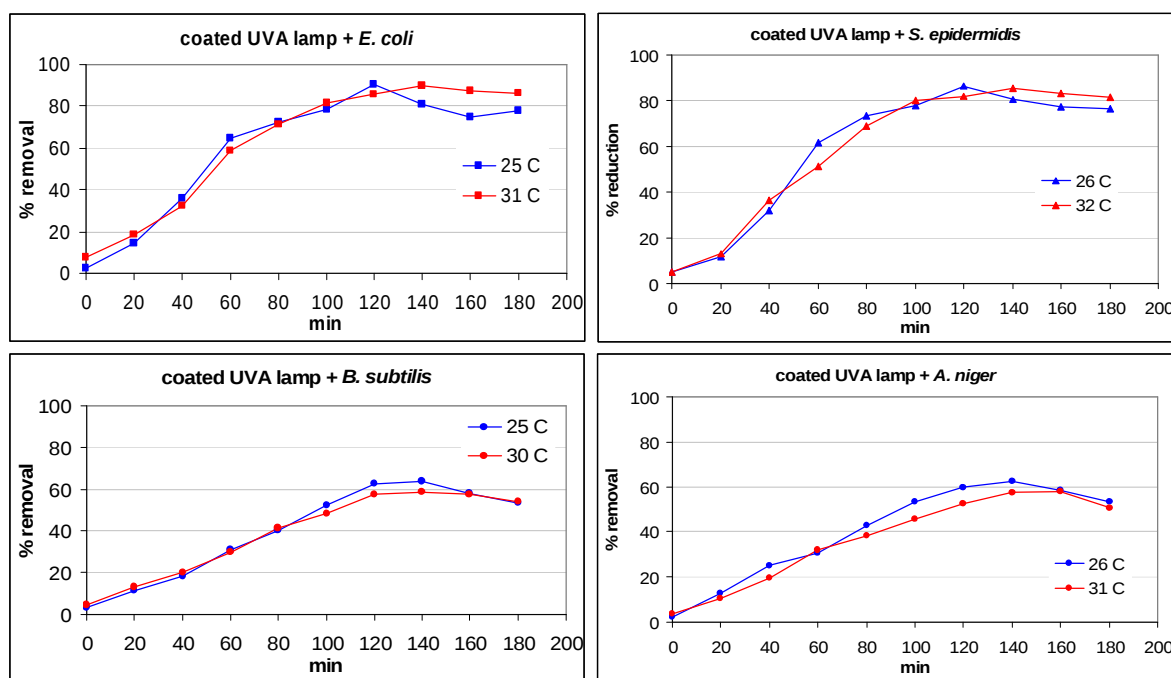
รูปที่ 41 ร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็กไลท์ เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยัดติด 3% B1000 โดยตรง และหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ

ในรูปที่ 41 มีการศึกษาซ้ำกับสปอร์ของ *A. niger* นอกเหนือจาก *E. coli* และ *S. epidermidis* อีกด้วย ซึ่งทั้งหมดยังคงพบว่าการพันหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ไม่ได้ให้ผลที่เหนือกว่าการเคลือบบนหลอดไฟโดยตรง แม้ว่าจะเปลี่ยนชนิดของสารยัดติดเป็น 3% B1000 ก็ตาม ซึ่งต่างจากผลของการศึกษาในหัวข้อ 4.4 ที่การกำจัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะได้ผลที่ดี ต้องมีการพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ โดยเป็นไปได้ว่าไอระนั้นมีลักษณะสมบัติเป็นก๊าซ ที่ไหลผ่านหลอดไฟเคลือบฯไปพร้อมกับอากาศ การพันด้วยแผ่นใยแก้วช่วยให้ไอระเหยกระจายแทรกซึมไปตามเส้นใย (diffusion) และสัมผัสกับอนุภาคลิสรบนเส้นใยได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดจึงดีขึ้น ขณะที่จุลินทรีย์นั้นมีขนาดใหญ่กว่า และมีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ เมื่อจุลินทรีย์ปะทะกับหลอดไฟโดยตรง อนุภาคลิสรที่กระจายอยู่บนหลอดไฟสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้โดยตรงและเพียงพอ จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่การสัมผัสดังเช่นที่ต้องการกับไอระเหวดังกล่าว ซึ่งหลังจากได้ข้อสรุปถึงสารยัดติดที่เหมาะสมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศแล้ว การศึกษาลำดับต่อไป จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

4.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม

คณะผู้วิจัยกำหนดอุณหภูมิที่ประสงค์จะศึกษาในข้อเสนอของโครงการวิจัยเอาไว้ที่ 25 ± 3 °C เปรียบเทียบกับ 35 ± 3 °C แต่ช่วงที่คณะผู้วิจัยทำการศึกษายู่ในช่วงเดือนพฤษภาคม-มิถุนายน ซึ่งอุณหภูมิของอากาศอยู่ที่ 30-31 °C จึงไม่สามารถทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 35 ± 3 °C ดังประสงค์ได้ การ

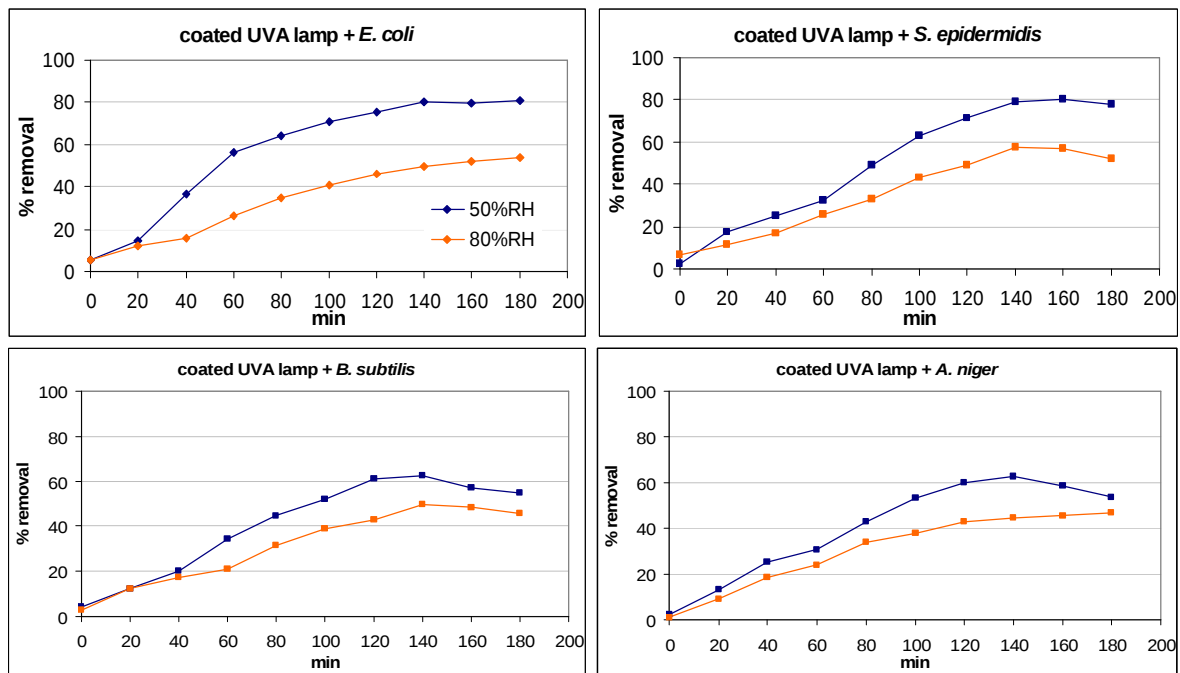
เปรียบเทียบจึงกระทำที่อุณหภูมิ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และ $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ แทน โดยผลของการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 ในการกำจัดจุลินทรีย์ชนิดต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 42 ความเร็วลมอยู่ที่ 0.05 เมตร/วินาที ความชื้นสัมพัทธ์ 46-50% อุณหภูมิอยู่ในช่วงของ $25.4\text{-}26.3^{\circ}\text{C}$ และ $30.1\text{-}31.6^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ วัดได้ $2.11\text{-}2.43\text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 42 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์

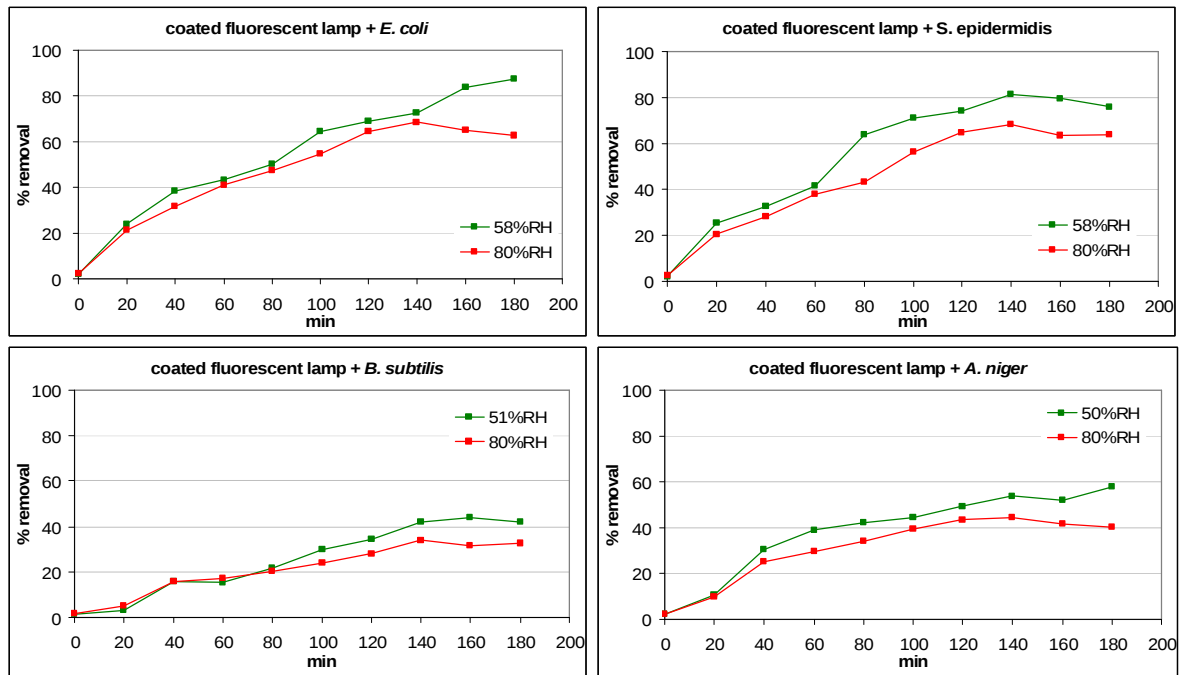
ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $5\text{-}6^{\circ}\text{C}$ ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ แต่อย่างใด สอดคล้องกับการศึกษาของซูลีวัลย์ ชาญศิรินันท์ และคณะ (2554) ที่ศึกษาการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 18 วัตต์ ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด (Sylvania nanotitania lamp) โดยใช้อุณหภูมิ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ในการกำจัด *S. epidermidis* และ *A. niger* โดยพบว่าในเชิงสถิติแล้วการกำจัดจุลินทรีย์นั้นต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แม้ว่าจำนวนของจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ จะพบได้น้อยกว่าที่ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ก็ตาม โดยเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการรอดชีวิตจากการเพาะเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อมีน้อยลง รวมถึงอุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ นั้นเข้าใกล้ heat shock temperature ของ *A. niger* ซึ่งอยู่ที่ 40°C (Zhao et al., 2009) จึงทำให้จำนวน *A. niger* ที่พบที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ มีน้อยกว่าที่ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในการศึกษาของซูลีวัลย์ ชาญศิรินันท์ และคณะ ก็ไม่สามารถสรุปสาเหตุที่ชัดเจนได้ แม้ว่าจะใช้อุณหภูมิที่ต่างกัน 10°C แล้วก็ตาม ดังนั้นในการศึกษานี้จึงไม่ได้ศึกษาต่อกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ในส่วนของผลกระทบเรื่องความชื้น การศึกษานี้เลือกใช้ความชื้นสัมพัทธ์สองระดับคือ ความชื้นสัมพัทธ์ปานกลาง ในช่วงของ 47-58% และความชื้นสัมพัทธ์สูงที่ 80% ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 43 อุณหภูมิที่ใช้อยู่ที่ 25.4-26.7 °C ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ บนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 วัดได้ 2.11-2.38 mW/cm²



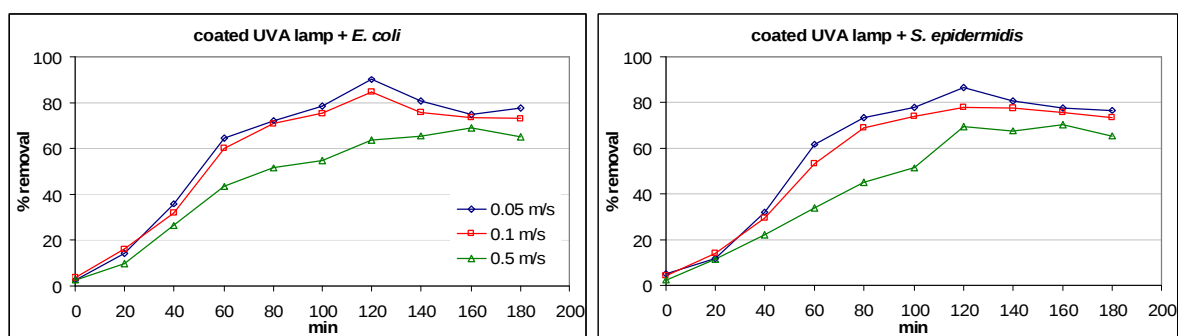
รูปที่ 43 ผลกระทบของความชื้นในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000

ผลการศึกษานี้ชัดเจนว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง เนื่องจากความชื้นจะไปแย่งเกาะกับ active site ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เหลือพื้นที่ว่างในการทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ลดลง นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลให้จุลินทรีย์เกิดการอึดตัวด้วยน้ำ เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเซลล์และ/หรือความหนาของผนังเซลล์ ทำให้การทำลายผนังเซลล์ของอนุโมลิสระยะทำได้ยากขึ้น อัตราการรอดชีวิตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย (Goswami et al., 1997, 2003; Li and Wu, 2006) ซึ่งการศึกษาได้กระทำซ้ำอีกครั้งหนึ่งกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 44 อุณหภูมิที่ใช้อยู่ที่ 25.1-26.3 °C ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ บนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 วัดได้ 0.070-0.074 mW/cm²

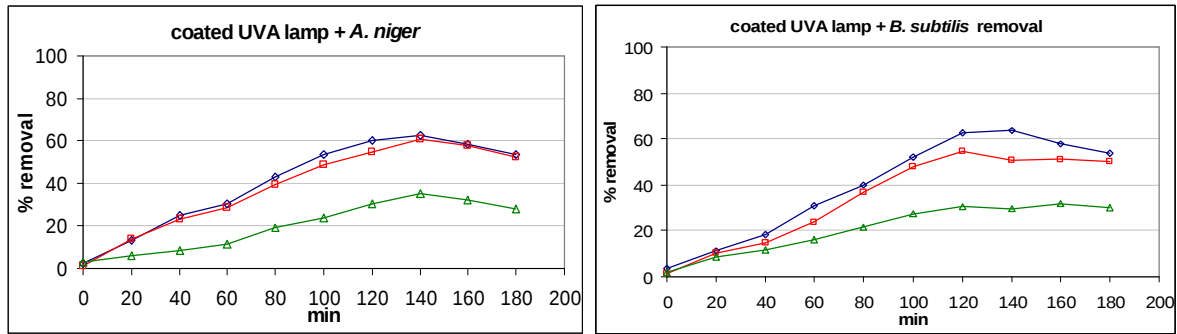


รูปที่ 44 ผลกระทบของความชื้นในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000

ผลการศึกษาที่ปรากฏยังคงสอดคล้องกับการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ กล่าวคือความชื้นมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ลดลงตั้งแต่ 10% ถึง 25% (ขึ้นกับชนิดจุลินทรีย์) การศึกษาลำดับต่อไปจึงเป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วลมที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ ในอากาศของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ความเร็วลม 0.05, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที ซึ่งการทดลองใช้หลอดไฟชุดเดียวกันทั้งหมด ศึกษาทั้งจุลินทรีย์ที่ละชนิดเพื่อลดความแปรปรวนหรือความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนชุดของหลอดไฟ การศึกษาเริ่มจากการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 โดยร้อยละของการกำจัดจุลินทรีย์แสดงได้ดังรูปที่ 45 อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วงของ 25.3-27.0 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 47-59% ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟวัดได้ 2.11-2.43 mW/cm²

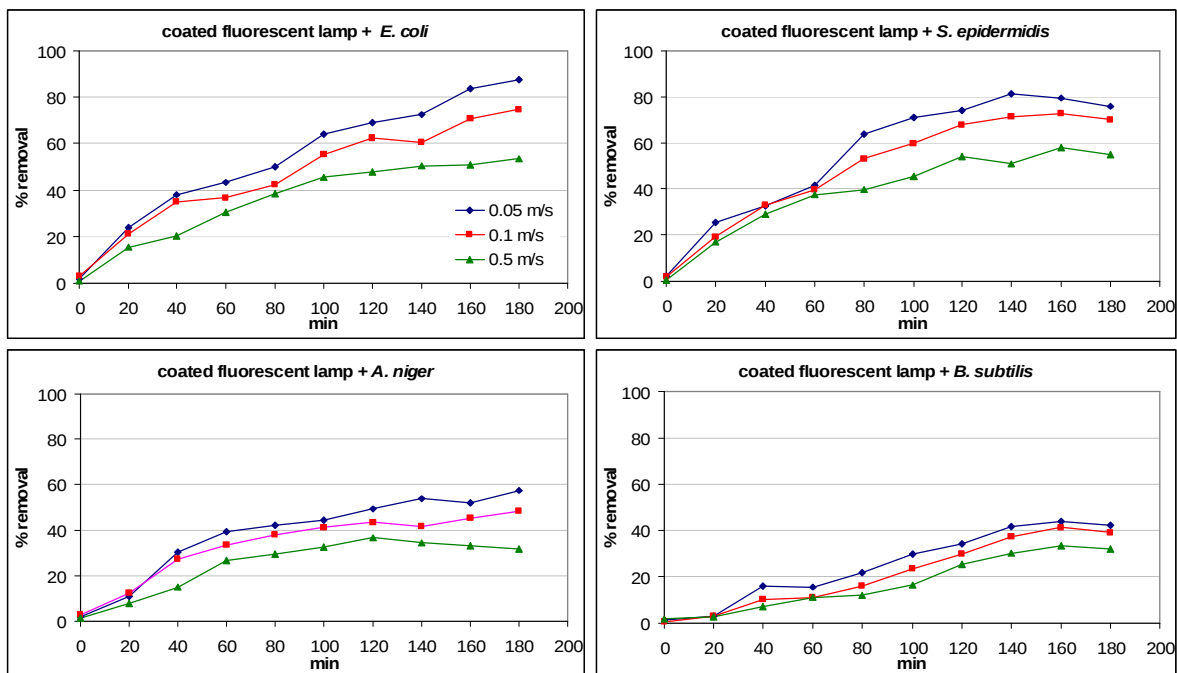


(ยังมีต่อ)



รูปที่ 45 ผลกระทบของความเร็วมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบสีกไลท์ เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000

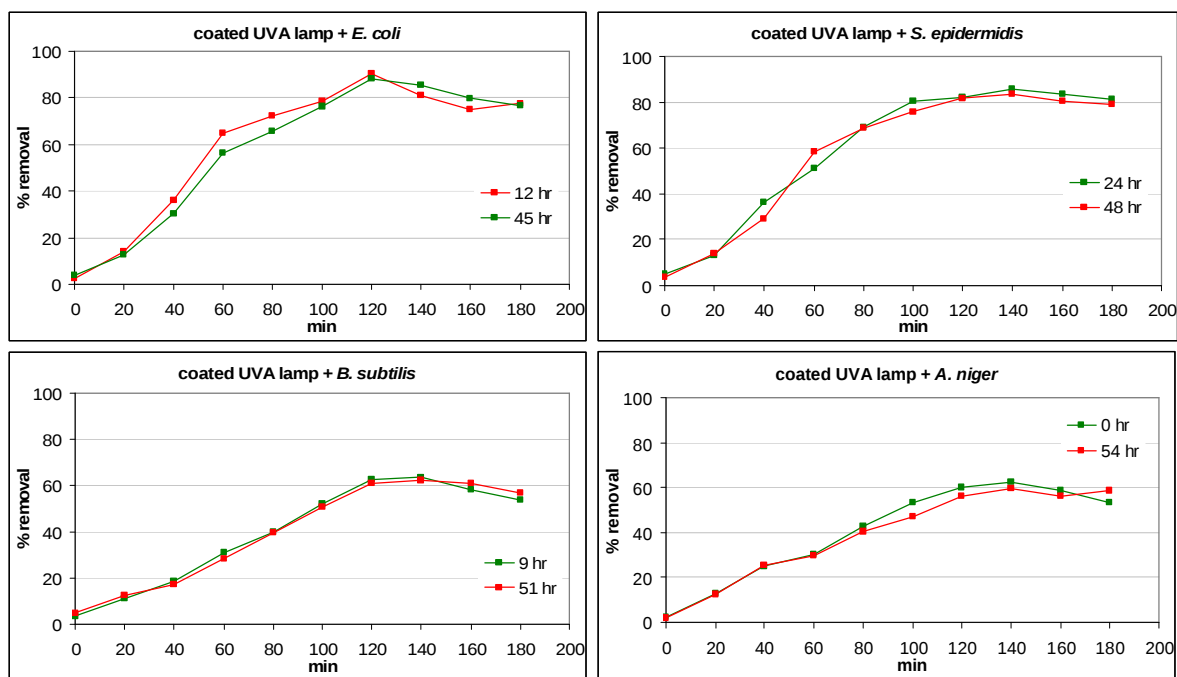
ผลการศึกษานี้ชัดเจนว่าการเพิ่มความเร็วมมีผลในการลดความสามารถในการกำจัด จุลินทรีย์ โดยเป็นไปได้ว่า ความเร็วมยิ่งเพิ่ม อากาศที่มีจุลินทรีย์ปนอยู่ด้วยไหลไปปะทะกับหลอดไฟ และไหลผ่านหลอดไฟออกไปอย่างรวดเร็ว จนทำให้ระยะเวลาสัมผัสกับอนุภาคลิสมะมีสั้นลง การกำจัดจึง เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม การใช้ความเร็วม 0.05 กับ 0.1 เมตร/วินาที ให้ผลในการกำจัดที่ ใกล้เคียงกัน ขณะที่ความเร็วม 0.5 เมตร/วินาที มีผลในการลดประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่า อนุภาคลิสมะที่อยู่ผิวของหลอดไฟ UVA แบบสีกไลท์เคลือบๆ มีจำนวนมากพอที่จะกำจัดจุลินทรีย์ที่มา ปะทะในระดับความเร็ว 0.05-0.1 เมตร/วินาที แต่ความเร็วมที่สูงจนเกินไปอาจเกินวิสัยที่อนุภาคลิสมะจะ กำจัดได้ทัน ซึ่งการศึกษาได้กระทำซ้ำกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ ดังแสดงผลในรูปที่ 46 อุณหภูมิอยู่ในช่วงของ 25.1-26.5 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 48-59% ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตจาก หลอดไฟวัดได้ 0.074 mW/cm²



รูปที่ 46 ผลกระทบของความเร็วมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000

ผลของการศึกษากับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ยังคงสอดคล้องกับการศึกษากับหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ แต่ต่างกันที่การเพิ่มความเร็วลมจาก 0.05 เมตร/วินาที เป็น 0.1 เมตร/วินาที มีผลต่อการลดประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟมากกว่า ซึ่งในกรณีของการใช้หลอดไฟที่ให้แสงขาวหรือ visible white light ที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 400-600 นาโนเมตร พลังงานโฟตอนที่กระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบนหลอดไฟนั้นน้อยกว่าหลอด UVA แบล็คไลท์ที่ให้แสงในความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร จำนวนอนุมูลอิสระบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์จึงน่าจะมีไม่เพียงพอที่จะกำจัดจุลินทรีย์ที่มาปะทะอย่างรวดเร็ว เฉพาะความเร็วลมต่ำขนาด 0.05 เมตร/วินาทีเท่านั้นที่พาจุลินทรีย์ไปปะทะกับอนุมูลอิสระบนหลอดไฟอย่างช้าๆ การกำจัดจึงเกิดขึ้นได้ดีที่สุด ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น 0.1 เมตร/วินาที ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนกว่าดังที่ปรากฏ

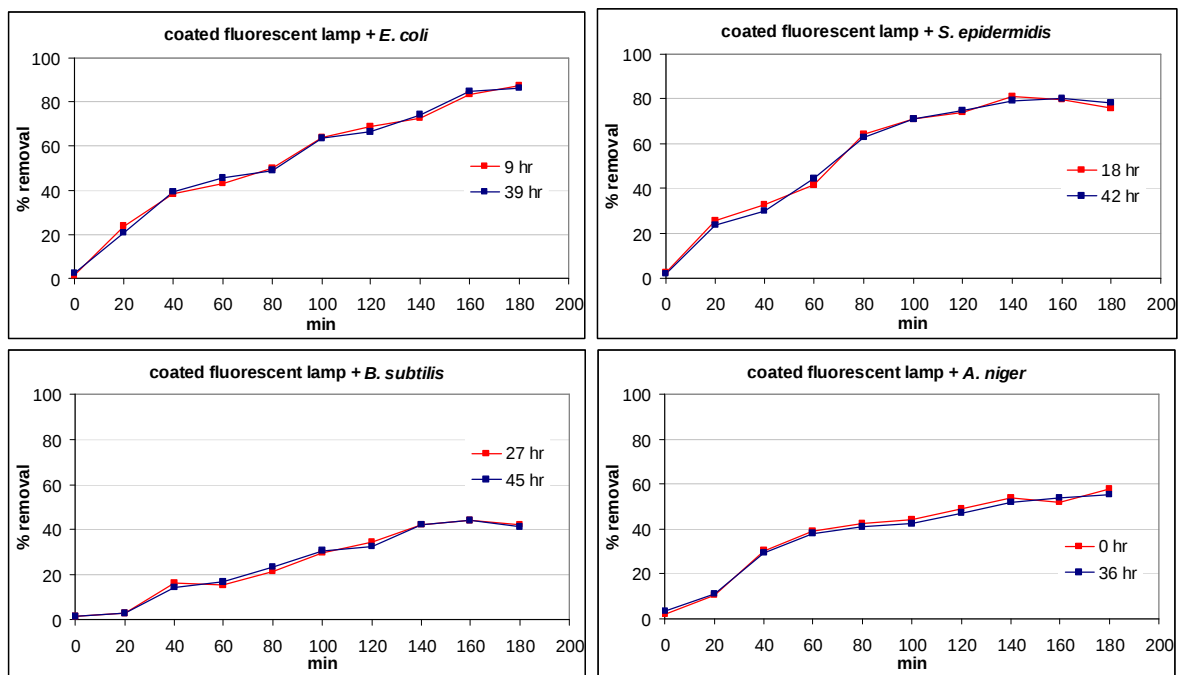
ทั้งนี้ การศึกษาในหัวข้ออุณหภูมิและความเร็วลมในที่นี้มาจากการใช้หลอดไฟเคลือบๆ ในชุดเดียวกันทั้งหมด หลังจากผ่านการใช้งานหลากหลายอุณหภูมิและความเร็วลมมาระยะหนึ่งแล้ว คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาซ้ำใหม่กับจุลินทรีย์แต่ละชนิด โดยกำหนดการเปรียบเทียบเฉพาะที่อุณหภูมิ $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟเคลือบๆ ที่ผ่านการใช้งานในจำนวนชั่วโมงต่างๆ กัน แสดงได้ดังรูปที่ 47 ดังนี้



รูปที่ 47 ความสามารถของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ตามจำนวนชั่วโมงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

ผลการศึกษา พบว่า หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบๆ ในที่นี้ สามารถกำจัดจุลินทรีย์ในแต่ละชนิดแทบไม่แตกต่างกันแม้จะผ่านการใช้งานมาแล้ว 45-54 ชั่วโมงก็ตาม โดยตัวเลขในรูปหมายถึงจำนวนชั่วโมงที่ใช้งานไปแล้ว เช่น ในการกำจัด *E. coli* ครั้งที่ 1 หลอดไฟเคลือบๆ นี้ผ่านการใช้งาน

มาแล้ว 12 ชั่วโมงจึงนำมาทดสอบกับ *E. coli* จากนั้นนำไปใช้กำจัดเชื้อชนิดอื่นๆในสถานะอื่น ก่อนวนกลับมาทดสอบกับ *E. coli* อีกครั้งในครั้งที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกล่าวนี้นี้ผ่านการใช้งานมาแล้ว 48 ชั่วโมง หรือกรณีของการกำจัด *A. niger* จำนวน 0 ชั่วโมง หมายถึงหลังเสร็จจากการเคลือบฯ หลอดไฟนี้นำมาใช้กับ *A. niger* เป็นครั้งแรก จำนวนที่ผ่านการใช้งานจึงนับเป็น 0 ชั่วโมง เป็นต้น โดยการใช้งานของหลอด UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ ไม่ได้ใช้งานกับจุลินทรีย์ชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวเป็นการเฉพาะ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟนี้ค่อนข้างคงที่ในแต่ละชนิดของจุลินทรีย์มากทีเดียว โดยการจัด *E. coli* เกิดขึ้นมากที่สุด 90% รองลงมาได้แก่ *S. epidermidis* 86% ลำดับที่สามได้แก่การจัดสปอร์ของ *B. subtilis* 63% และลำดับสุดท้ายคือการกำจัด *A. niger* 63% โดยคณะผู้วิจัยได้ทดสอบกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ ในลักษณะเดียวกันด้วย โดยใช้ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 25.4-26.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 48-58% ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอวได้ 0.074-0.08 mW/cm² ดังแสดงผลในรูปที่ 48



รูปที่ 48 ความสามารถของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% B1000 ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ตามจำนวนชั่วโมงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

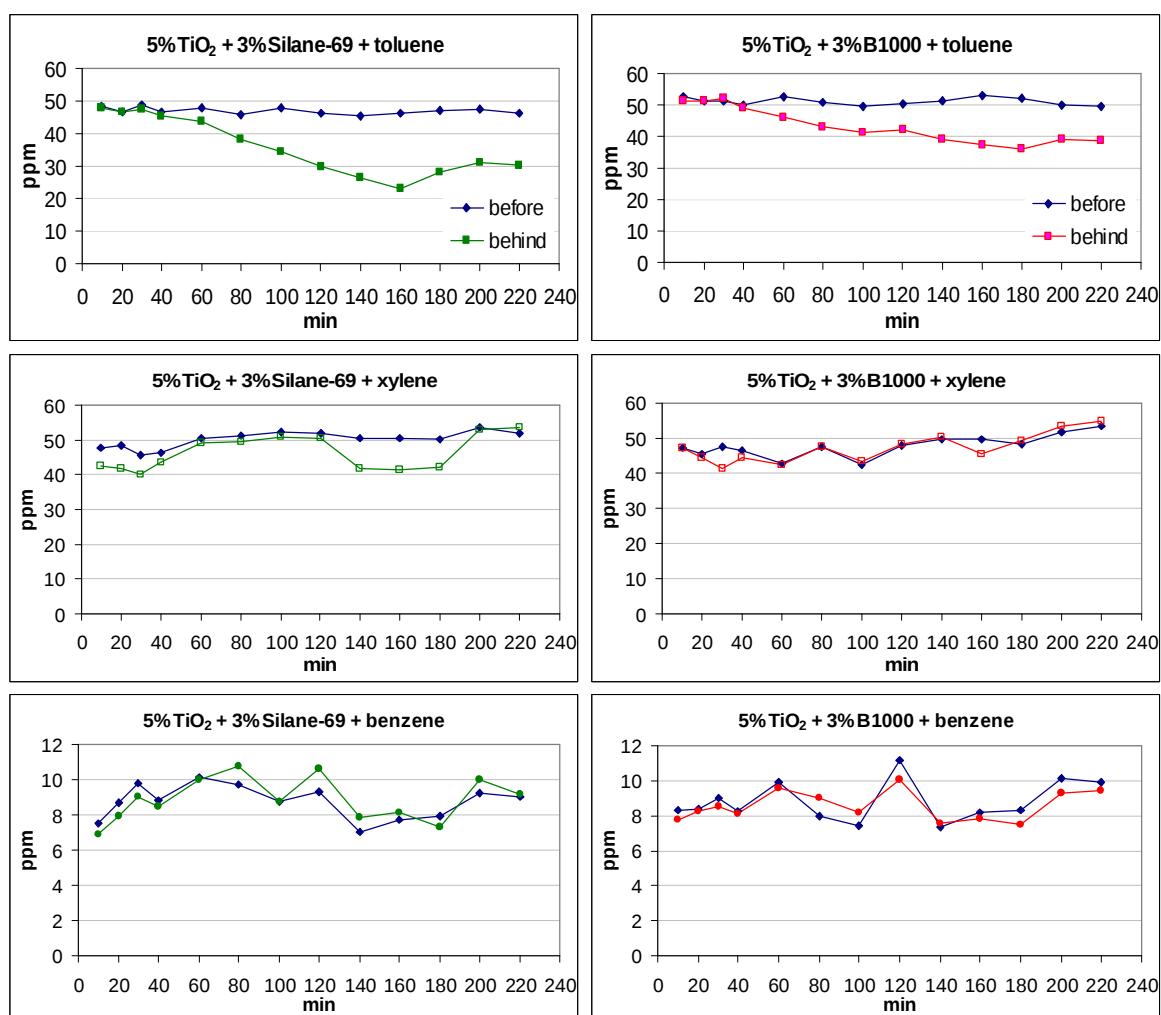
จากรูป ยิ่งชัดเจนว่าการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ ซ้ำๆกัน มากถึง 45 ชั่วโมง ยังคงให้ผลที่แทบจะไม่แตกต่างกับการใช้หลอดไฟในครั้งก่อนหน้า (0-27 ชั่วโมง) โดยรูปแบบของการกำจัดจุลินทรีย์นั้นคล้ายกับการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบฯ กล่าวคือ *E. coli* ถูกกำจัดได้มากที่สุด 88% รองลงมาได้แก่ *S. epidermidis* 81% ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์มาก ลำดับที่สามได้แก่การกำจัดเชื้อรา *A. niger* 58% และสุดท้ายคือการกำจัดสปอร์ของ *B. subtilis* 44% ซึ่งต่ำกว่าการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์

4.4 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

การศึกษาเริ่มจากการทดสอบหาสารยึดติดที่เหมาะสมต่อการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนผิวของหลอดไฟ ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม และนำหลอดไฟไปทดสอบการใช้งานจริงในร้านซ่อมรถจักรยานยนต์และศาลเจ้า ผลการศึกษาทั้งหมด มีดังนี้

4.4.1 สารยึดติดที่เหมาะสมกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

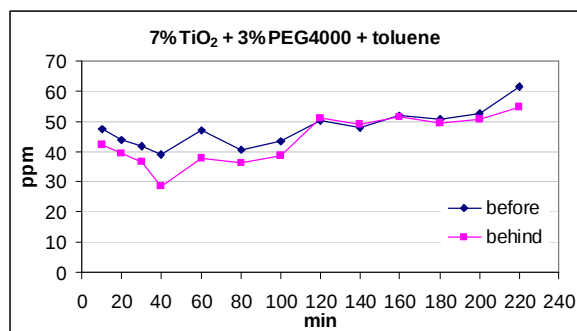
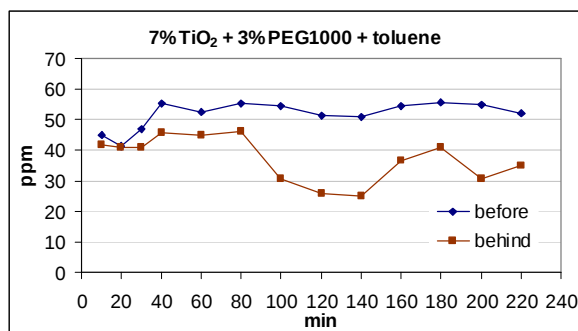
สารยึดติดที่นำมาศึกษาได้แก่ Silane-69, B1000, Polyethylene glycol (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 1000 และ 4000 และ Dispersant 3005 โดยทุกชนิดกำหนดความเข้มข้นที่ใช้เท่ากันคือ 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ การศึกษาเริ่มจากการใช้ 3% B1000 เปรียบเทียบกับ 3% Silane-69 ในการสลายโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน โดยใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 49 ในรูปของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ตำแหน่งก่อนหน้าหลอดไฟเปรียบเทียบกับหลังหลอดไฟ อุณหภูมิอยู่ในช่วงของ 24.2-25.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 49-66% ความเร็วลม 0.04-0.06 เมตร/วินาที ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอที่ผิวหน้าของหลอดไฟวัดได้ 4.50-4.56 mW/cm²



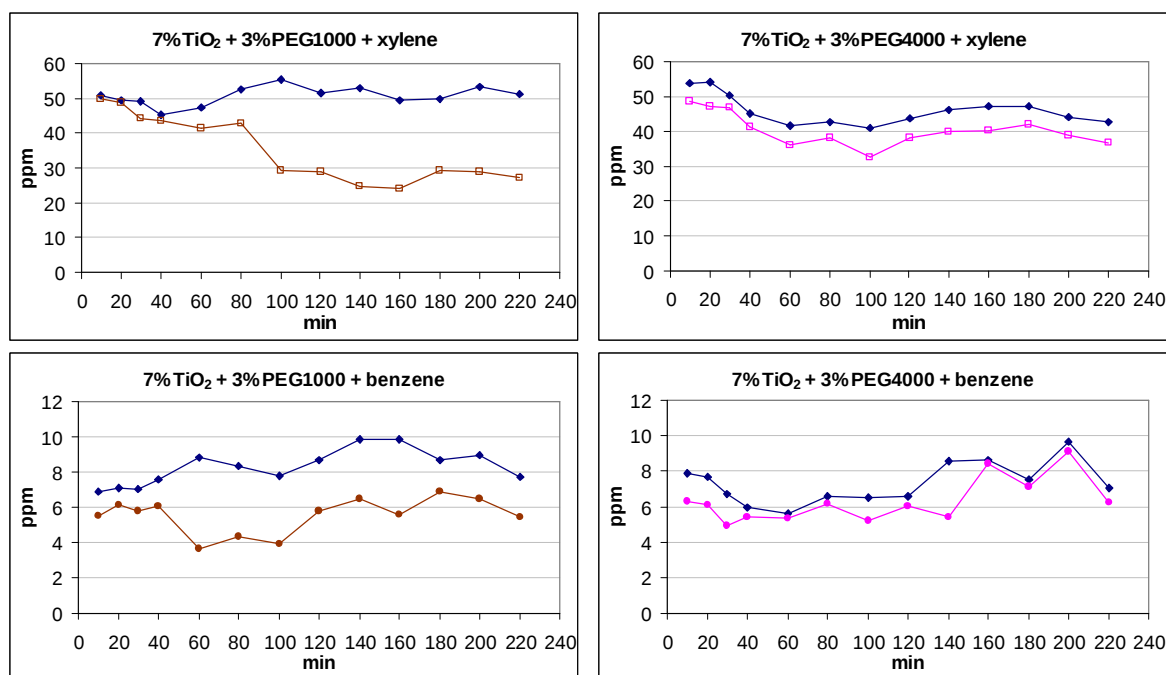
รูปที่ 49 การสลายโทลูอีน ไซลีน และเบนซีน ของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% Silane-69 เปรียบเทียบกับ 3% B1000

จากรูปจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการสลายโทลูอินมีน้อยมาก (สูงสุด 50% จากการใช้ 3% Silane-69 และ 30% จากการใช้ 3% B1000) และแทบไม่สามารถสลายไซลีนและเบนซีนได้เลย ซึ่งความเข้มข้นของโทลูอินและไซลีนที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 50 ppm เนื่องจาก OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ได้กำหนดความเข้มข้นของโทลูอินในอากาศสำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงไว้ที่ 200 ppm ขณะที่ NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) กำหนดไว้ที่ 100 ppm สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมง และค่าที่ยอมให้มีได้ในช่วงเวลาสั้นๆ คือ 150 ppm ส่วน ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) กำหนดความเข้มข้นของโทลูอินไว้ที่ 50 ppm สำหรับการสัมผัสทางผิวหนัง การศึกษาจึงเลือกใช้โทลูอินความเข้มข้นประมาณ 50 ppm ส่วนไซลีนนั้น ความเข้มข้นที่ยอมให้มีได้สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงกำหนดโดย OSHA, NIOSH และ ACGIH อยู่ที่ 100 ppm โดยความเข้มข้นในช่วงเวลาสั้นๆ NIOSH และ ACGIH กำหนดไว้ที่ 150 ppm แต่เพื่อให้สอดคล้องกับการศึกษาในส่วนของโทลูอิน การศึกษาจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของไซลีนที่ประมาณ 50 ppm เช่นเดียวกัน ในกรณีของเบนซีน ความเข้มข้นที่ยอมให้มีได้สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมง กำหนดไว้ตั้งแต่ 0.1 ppm ไปจนถึง 10 ppm กล่าวคือ OSHA กำหนด 1 ppm ส่วน NIOSH กำหนดไว้ที่ 0.1 ppm และค่าเพดานสูงสุดที่ยอมให้มีได้ คือ 1 ppm ขณะที่ ACGIH กำหนดไว้ที่ 10 ppm (NIOSH Manual of Analytical Method, 1994) ในการศึกษาจึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่ไม่เกิน 10 ppm เนื่องจากง่ายต่อการสังเคราะห์และการตรวจวัดด้วยเครื่องมือชนิด direct reading มากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ

นอกจากการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 3% Silane-69 หรือ 3% B1000 บนหลอด UVA แบล็กไลท์แล้ว คณะผู้วิจัยยังได้ทดลองกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลการศึกษาปรากฏว่าหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ กำจัดโทลูอินได้ไม่ถึง 10% และไม่สามารถกำจัดไซลีนและเบนซีนได้เลย (ไม่ได้แสดงรูปไว้) คณะผู้วิจัยจึงทดลองเปลี่ยนไปใช้ 3% PEG1000 เปรียบเทียบกับ 3% PEG4000 และลองเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 7% โดยเริ่มกับหลอดไฟ UVA แบล็กไลท์ก่อน ดังแสดงผลในรูปที่ 50 ในรูปของความเข้มข้นก่อนและหลังหลอดไฟ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 24.2-25.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 49-52% ความเร็วลม 0.05-0.06 เมตร/วินาที ความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตเอว็ดได้ 4.25-4.56 mW/cm²



(ยังมีต่อ)

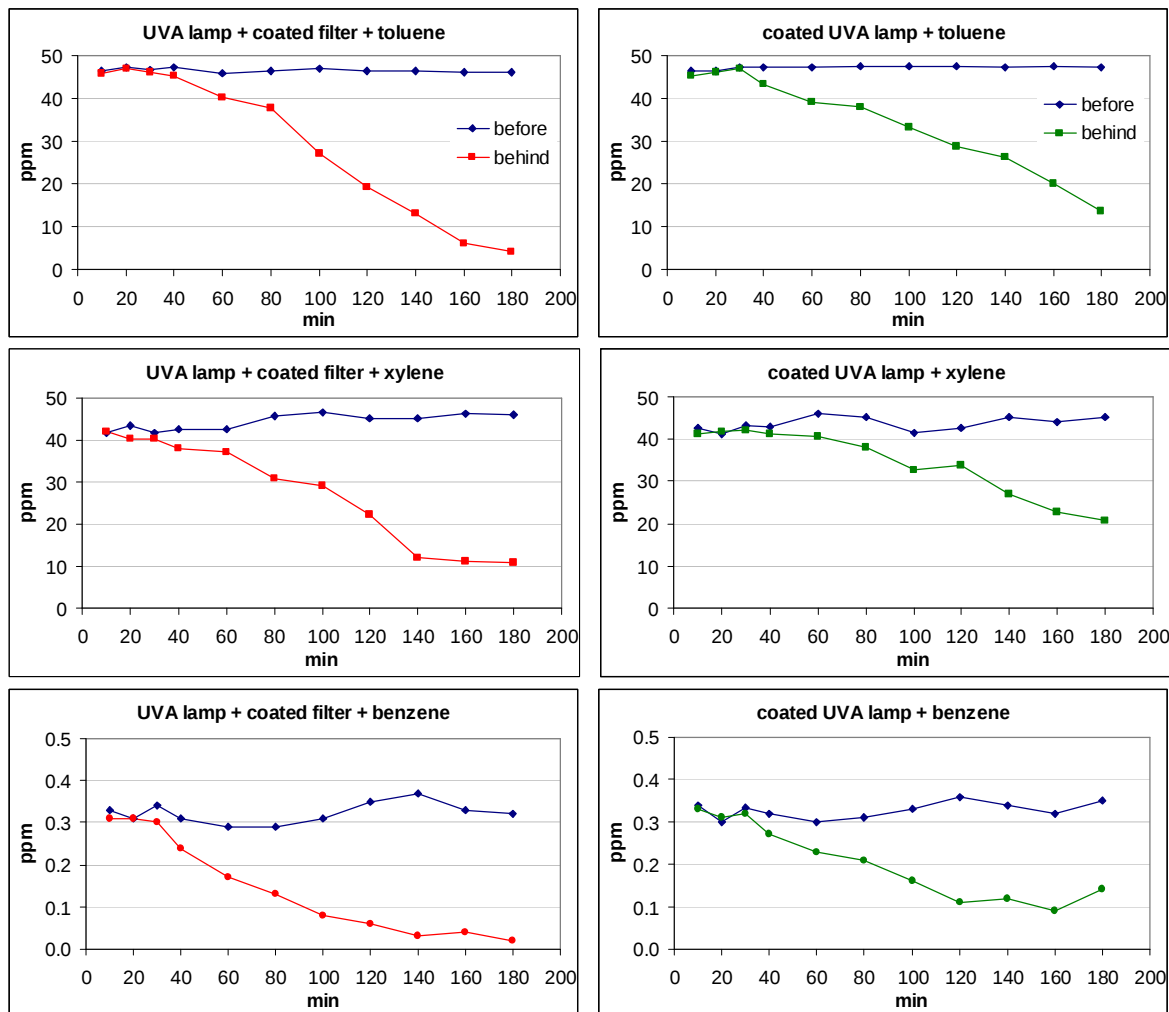


รูปที่ 50 การสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีนของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลื่อนที่เทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% PEG1000 เปรียบเทียบกับ 3% PEG4000

จากการศึกษาชัดเจนว่าการใช้ 3% PEG1000 ให้ผลที่ดีกว่า 3% PEG4000 โดยสามารถสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีนได้สูงสุด 51%, 53% และ 58% ตามลำดับ แต่เมื่อนำไปเคลือบบนหลอดฟลูออเรสเซนต์กลับพบว่าประสิทธิภาพของการใช้ 3% PEG1000 มีน้อยมาก โดยสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ไม่เกิน 20% (ไม่ได้แสดงรูปไว้) และเมื่อทดลองเคลือบ 3% PEG4000 บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พบว่าปฏิกิริยาแทบไม่สามารถสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้เลยเช่นกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าความเข้มของรังสี UVA จากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์นั้นมีพลังงานไม่เพียงพอในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การศึกษาลำดับต่อไป คณะผู้วิจัยจึงทดลองใช้ 3% Dispersant 3005 (D3005) ผสมกับ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ และเติมโลหะเหล็กด้วยอีก 0.1% พ่นลงบนหลอด UVA แบล็คไลท์ เปรียบเทียบกับการพ่นหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วย 3% D3005 + 5% TiO₂ + 0.1% Fe เนื่องจากโลหะที่เติมลงไปจะไปช่วยแยก electron-hole หรือลดการกลับมารวมตัวกันใหม่ (recombination) ของ electron-hole ในไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ รวมถึงช่วยเพิ่มการถ่ายเทประจุที่ผิว (interfacial charge-transfer) (van Grieken et al., 2009) ในการศึกษาครั้งนี้จึงทดลองเติม Fe³⁺ ในอัตราส่วน 0.1% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 51 ในรูปของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบก่อนและหลังหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ ส่วนร้อยละของการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดเปรียบเทียบระหว่างการเคลือบหลอดไฟโดยตรง กับการเคลือบบนแผ่นใยแก้วก่อนแล้วจึงพ่นบนหลอดไฟอีกที แสดงได้ดังรูปที่ 52 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 21.1-28.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 45-53% ความเร็วลม

0.01-0.1 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสี UVA จากหลอดไฟ UVA แบตเตอรี่เคลื่อนที่ วัดได้ 2.67-3.17 mW/cm² ขณะที่ความเข้มของรังสีจากหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้ววัดได้ 1.98-2.98 mW/cm²

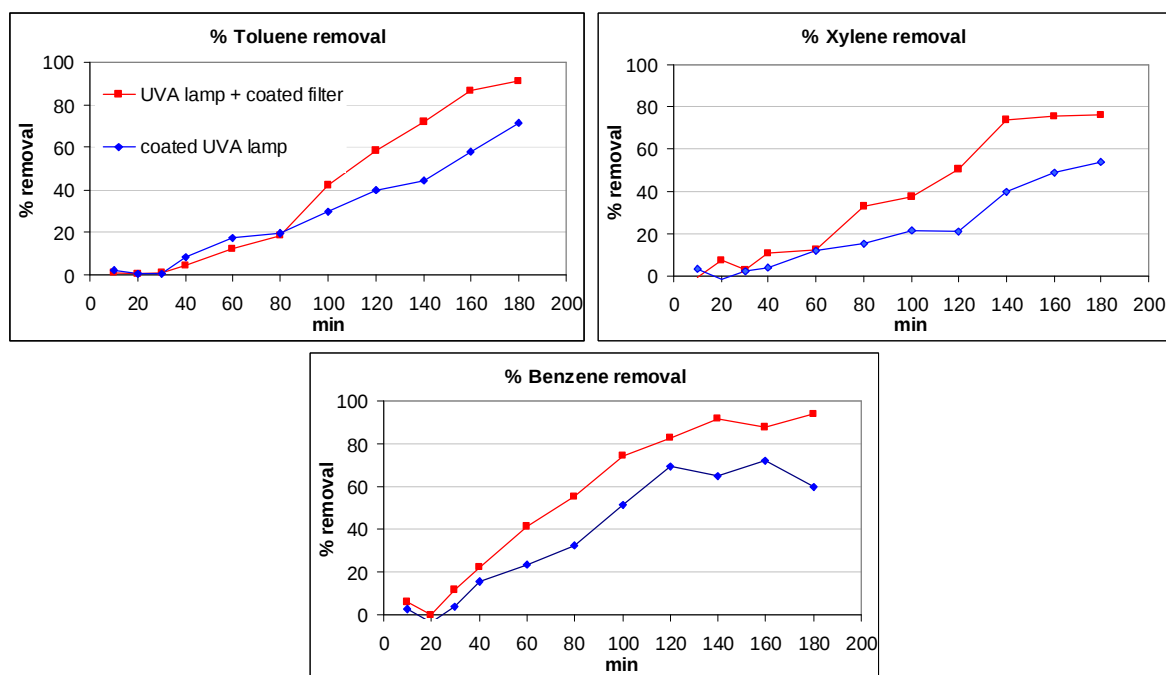


หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาทีที่ 40

รูปที่ 51 การสลายโทลูอิน ไซลีน และเบนซีนของหลอดไฟ UVA แบตเตอรี่เคลื่อนที่ เปรียบเทียบกับหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลื่อนที่

ผลการศึกษาพบว่า การเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ 3% D3005 และ 0.1% Fe ลงบนแผ่นใยแก้วก่อนแล้วจึงพันบนหลอดไฟให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการเคลือบหลอดไฟโดยตรงมาก โดยเป็นไปได้ว่าการเคลือบบนเส้นใยแก้วนั้นช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มากขึ้น รวมถึงแผ่นใยแก้วอาจกักเก็บ (ดูดซับ) สารอินทรีย์ระเหยง่ายไว้บางส่วน ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการที่สารอินทรีย์ระเหยง่ายไหลมาปะทะกับหลอดไฟแล้วไหลออกไป

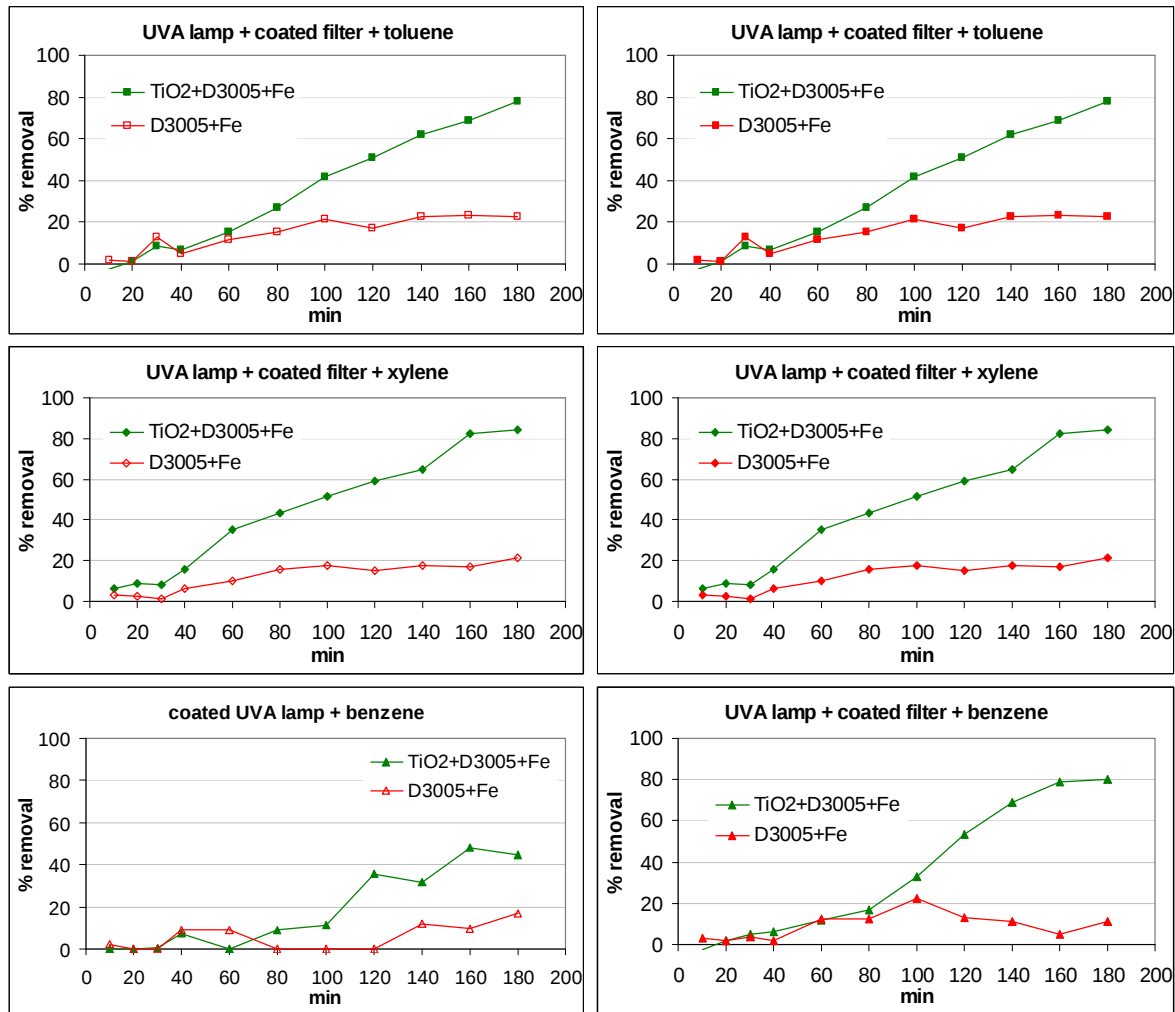
ในทันทีดังในกรณีของการใช้หลอดไฟแต่เพียงลำพัง ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วจึงสูงกว่าการเคลือบลงบนหลอดไฟโดยตรง ซึ่งการนำเสนอในรูปแบบของร้อยละของการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดแสดงได้ดังรูปที่ 52 ดังนี้



หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาทิตี่ 40

รูปที่ 52 ร้อยละของการสลายอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบบสีกไลต์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ เปรียบเทียบกับการเคลือบหลอดไฟ UVA แบบสีกไลต์ โดยตรง

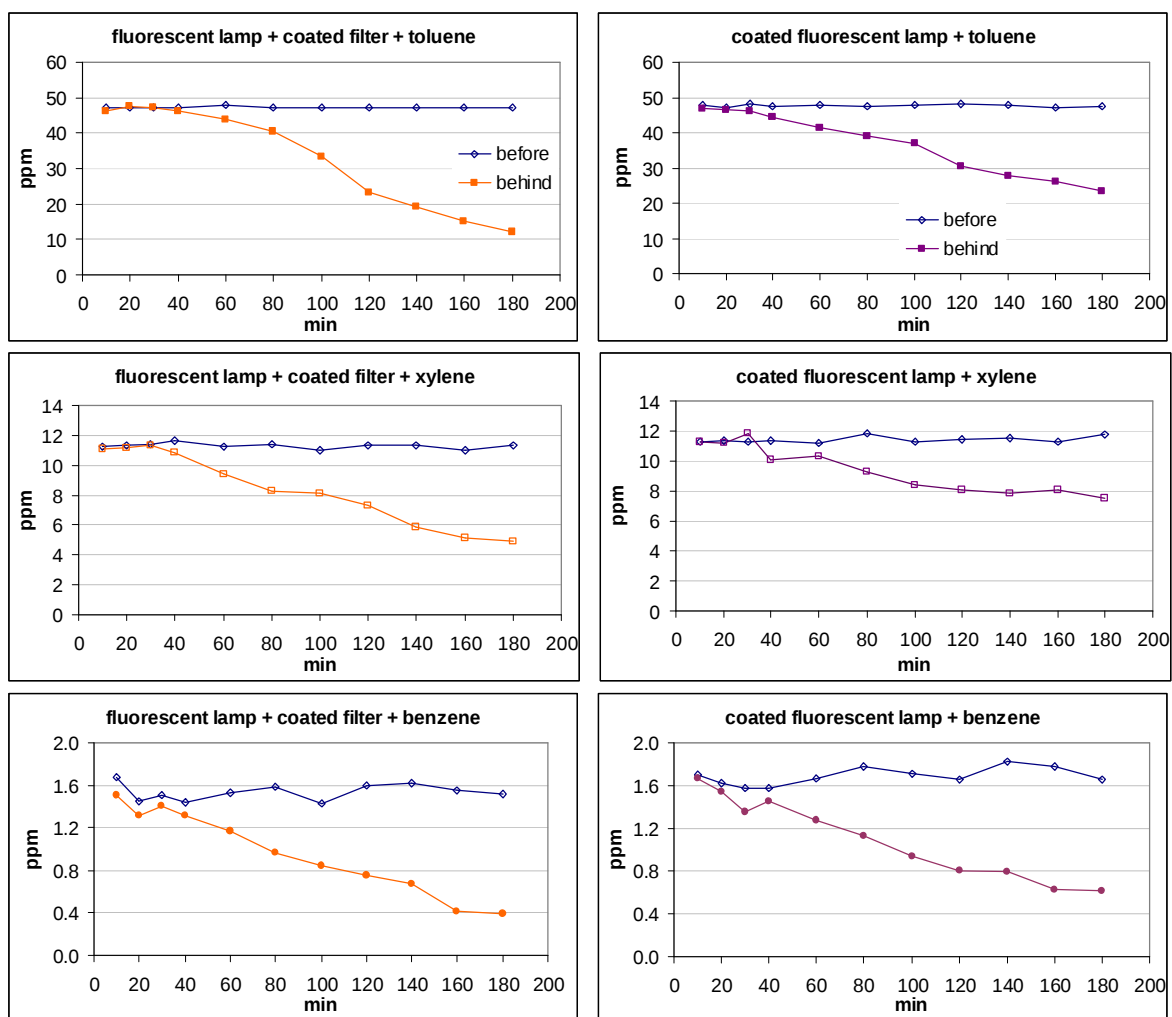
จากรูปที่ 52 พบว่าการพันหลอดไฟ UVA แบบสีกไลต์ด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ สามารถกำจัดโทลูอินและเบนซีนได้ 91-94% เมื่อเวลาผ่านไป 140 นาที (เริ่มเปิดไฟในนาทิตี่ 40) ส่วนการกำจัดไซลีน พบสูงสุด 76% ขณะที่การใช้หลอดไฟ UVA แบบสีกไลต์เคลือบๆ กำจัดโทลูอินและเบนซีนได้สูงสุด 72% และกำจัดไซลีนได้สูงสุด 54% ในช่วงเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้น มาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ไม่ใช่มาจากการดูดซับบนสารยึดติดการศึกษาลำดับต่อไปจึงเป็นการเปรียบเทียบการใช้หลอดไฟ UVA แบบสีกไลต์เคลือบด้วย 5%TiO₂ + 3% D3005 + 0.1% Fe เพียงครั้งเดียว ส่วนอีกครั้งหนึ่งเคลือบด้วยสารยึดติดที่ไม่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (3% D3005 + 0.1% Fe) ทดสอบการสลายโทลูอิน ไซลีน เบนซีน รวมถึงใช้การพันหลอดไฟ UVA แบบสีกไลต์ด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ข้างหนึ่งมี 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมด้วย ส่วนอีกข้างหนึ่งมีเฉพาะสารยึดติดและเหล็กแต่เพียงลำพัง ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 53 โดยเปรียบเทียบในรูปของร้อยละของการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิด



หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาที่ที่ 40

รูปที่ 53 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยหลอดไฟที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับโฟโตไลซิส (และการดูดซับ) ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์

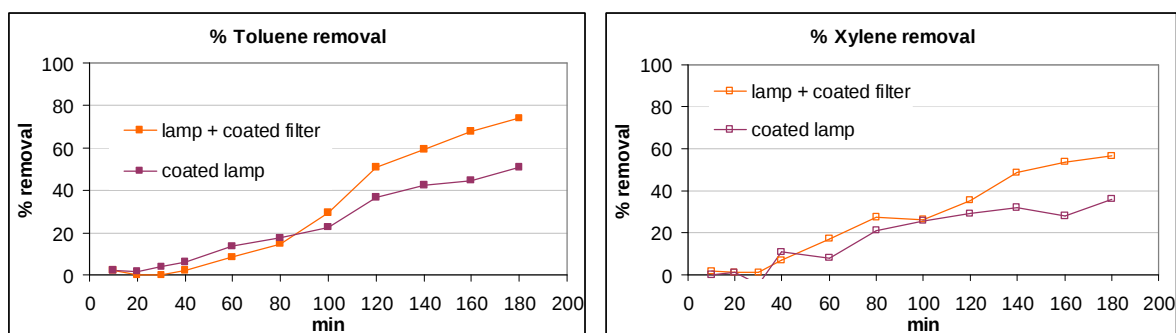
จากรูป ชัดเจนว่าการดูดซับด้วยสารยัดติดแต่เพียงลำพัง และ/หรือ การสลายตัวด้วยแสงแต่เพียงอย่างเดียว (photolysis) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นมีน้อยมาก การลดลงที่ปรากฏจึงเป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสอย่างชัดเจน การศึกษาลำดับต่อไป จึงเป็นการทดสอบการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ในลักษณะเดียวกับหลอดไฟ UVA แบบเล็กไลท์ คือใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ เปรียบเทียบกับการเคลือบลงบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์โดยตรง ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 54 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 22.4-27.2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 48-51% ความเร็วลม 0.01-0.1 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสี UVA จากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ วัดได้ 1.27-1.68 mW/cm² ขณะที่ความเข้มของรังสีจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พันด้วยแผ่นใยแก้ววัดได้ 0.86-0.92 mW/cm²



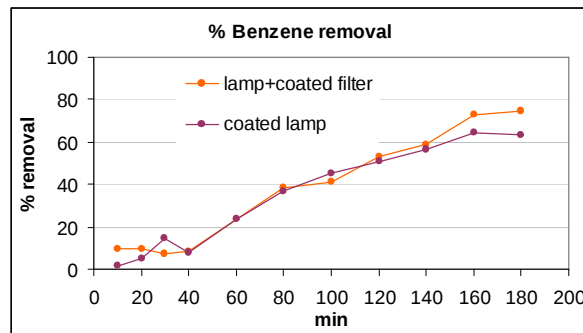
หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาที่ที่ 40

รูปที่ 54 การสลายโทลูอีน ไซลีน และเบนซีนของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ เปรียบเทียบกับหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ

จากรูป จะเห็นได้ว่าการเคลือบหลอดไฟด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ 3% D3005 และ 0.1% Fe ให้ผลที่ดีในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายแม้ว่าจะใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ก็ตาม ซึ่งในแง่ของประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ รูปที่ 55 สามารถเปรียบเทียบเป็นร้อยละของการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายระหว่างหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ กับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ ดังนี้



(ยังมีต่อ)



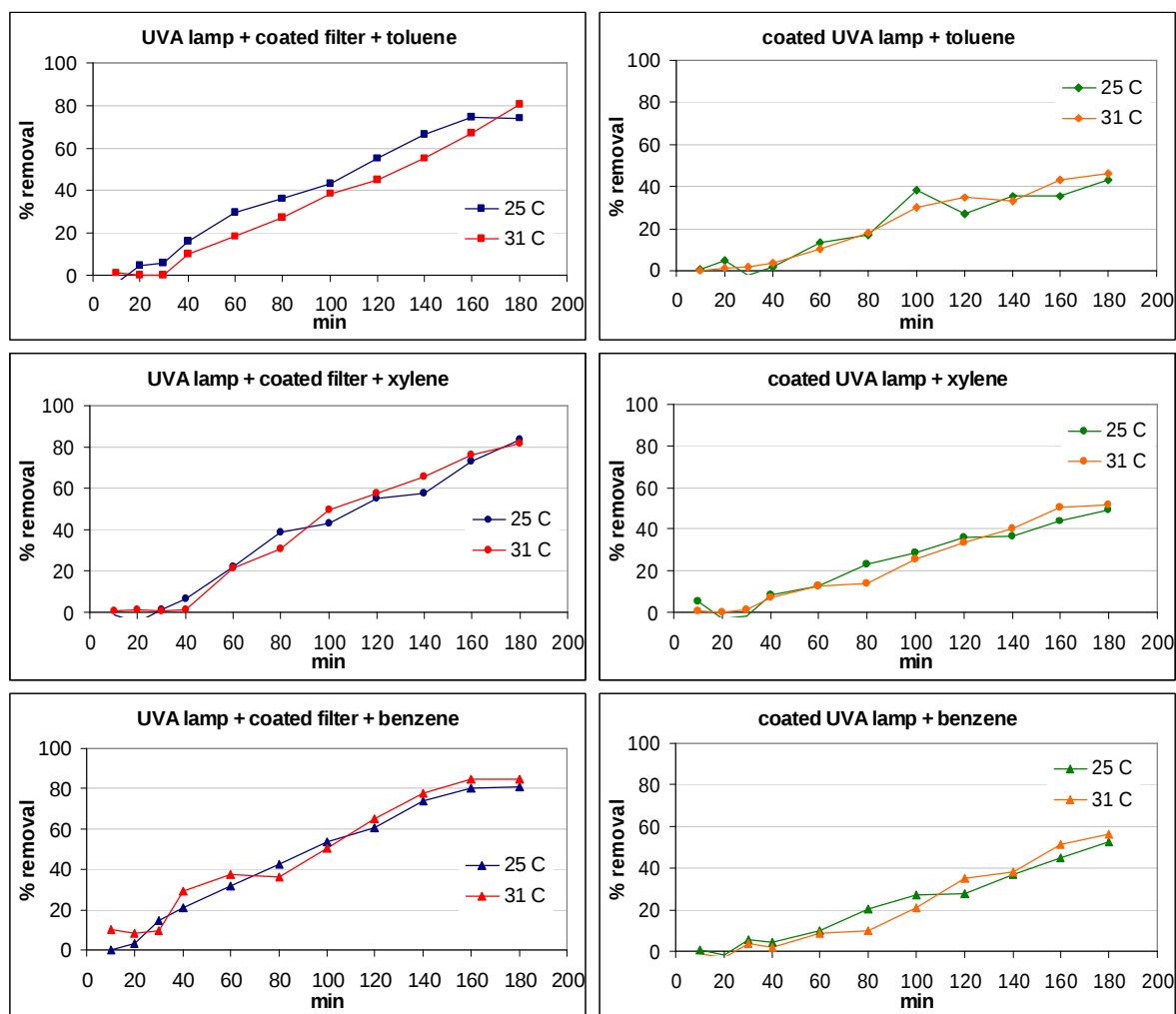
หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาที่ที่ 40

รูปที่ 55 ร้อยละของการสลายอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศเมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ เปรียบเทียบกับการเคลือบหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์โดยตรง

จากรูป พบว่าการพันหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ 3% D3005 และ 0.1% Fe ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอินได้สูงสุด 74% กำจัดไซลีนได้ 56% และเบนซีน 74% ขณะที่หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับ 3% D3005 และ 0.1% Fe โดยตรง กำจัดโทลูอินลดลงเหลือเพียง 51% กำจัดไซลีนได้ 36% และกำจัดเบนซีนได้ 63% ซึ่งในกรณีของเบนซีน หลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ กับหลอดไฟที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรงแทบจะให้ประสิทธิภาพที่ไม่ต่างกัน ในแง่ของการเปรียบเทียบกับหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ ถึงแม้ว่าการเคลือบบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์จะให้ประสิทธิภาพที่น้อยกว่าการเคลือบลงบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ก็ตาม แต่ในแง่ของการนำไปใช้งานจริง หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เป็นที่นิยมในการใช้งานมากกว่า และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ ดังกล่าว ก็สามารถสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศได้เกินครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นตั้งต้นที่มี ซึ่งจัดว่ามีประโยชน์มากกว่าที่ไม่มีการเคลือบใดๆเลย

4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม

ในข้อเสนอของโครงการวิจัย กำหนดจะศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ 25 ± 3 °C เปรียบเทียบกับ 35 ± 3 °C แต่เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดลองอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคม-มิถุนายน ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดพบอยู่ที่ 30-31 °C จึงไม่สามารถศึกษาที่อุณหภูมิ 35 °C ดังความต้องการได้ ในที่นี้จึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ 24.5-25.5 °C กับ 30.8-31.0 °C แทน ซึ่งผลของการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง กับหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ แสดงได้ดังรูปที่ 56 ความเร็วลมอยู่ที่ 0.01 เมตร/วินาที ความชื้นสัมพัทธ์ 48-53% ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอข้างที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ อยู่ที่ 1.83-1.87 mW/cm² ส่วนข้างที่ไม่ได้พันอยู่ที่ 2.14-2.4 mW/cm²

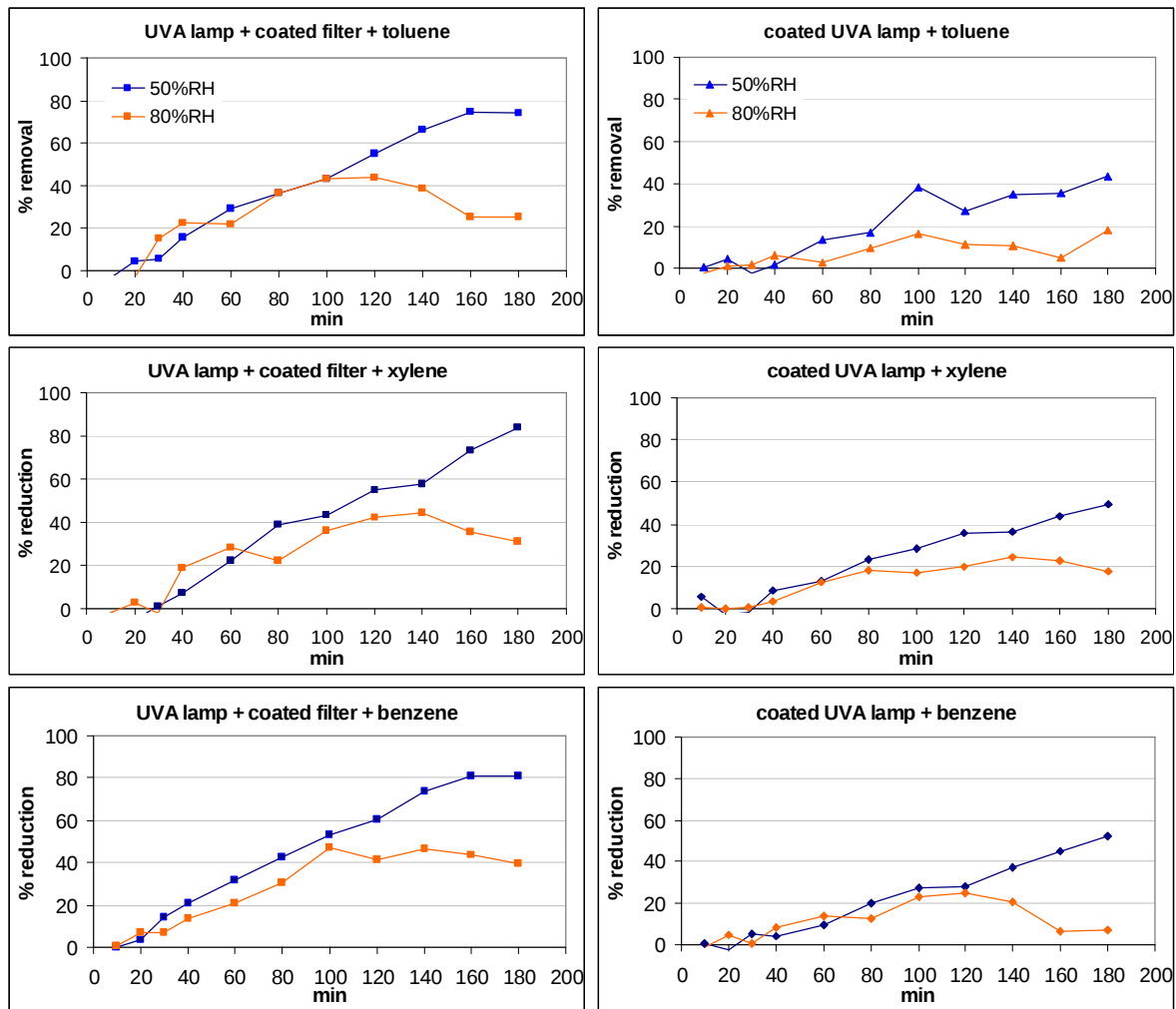


รูปที่ 56 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำ

จากรูปพบว่าอุณหภูมิที่ต่างกัน 6 °C ไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแต่อย่างใด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในส่วนของกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ (หัวข้อ 4.3.3) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ ซ้ำ

ในส่วนของผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์กับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ การศึกษานี้กระทำที่ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ และ $80 \pm 5\%$ โดยใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำ หรือ ฟลูออเรสเซนต์ที่ข้างหนึ่งเคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe โดยตรง ส่วนอีกข้างหนึ่งพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe การศึกษาเริ่มจากการปรับความชื้นสัมพัทธ์ใน chamber ทดลองเป็น $50 \pm 5\%$ ทำการศึกษานาน 3 ชั่วโมงจนแล้วเสร็จ ก่อนจะปรับความชื้นโดยใช้เครื่องสร้างความชื้นเป็น $80 \pm 5\%$ และทำการศึกษาต่อเนื่องไปอีก 3 ชั่วโมงจนแล้วเสร็จโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนชุดหลอดไฟเป็นชุดใหม่แต่อย่างใดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้หลอดไฟคนละชุดกัน ผลการศึกษาของการใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำ แสดงได้ดังรูปที่ 57 ใน

รูปของร้อยละของการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิด อุณหภูมิภายใน chamber ระหว่างที่ทำการศึกษายู่ที่ 24.5-26.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ปานกลางอยู่ในช่วง 48-53% ความชื้นสัมพัทธ์สูงอยู่ในช่วง 75-80% ความเร็วลม 0.01 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอซังที่พื้นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ อยู่ที่ 1.83-1.87 mW/cm² ส่วนข้างที่ไม่ได้พื้นอยู่ที่ 2.14-2.32 mW/cm²

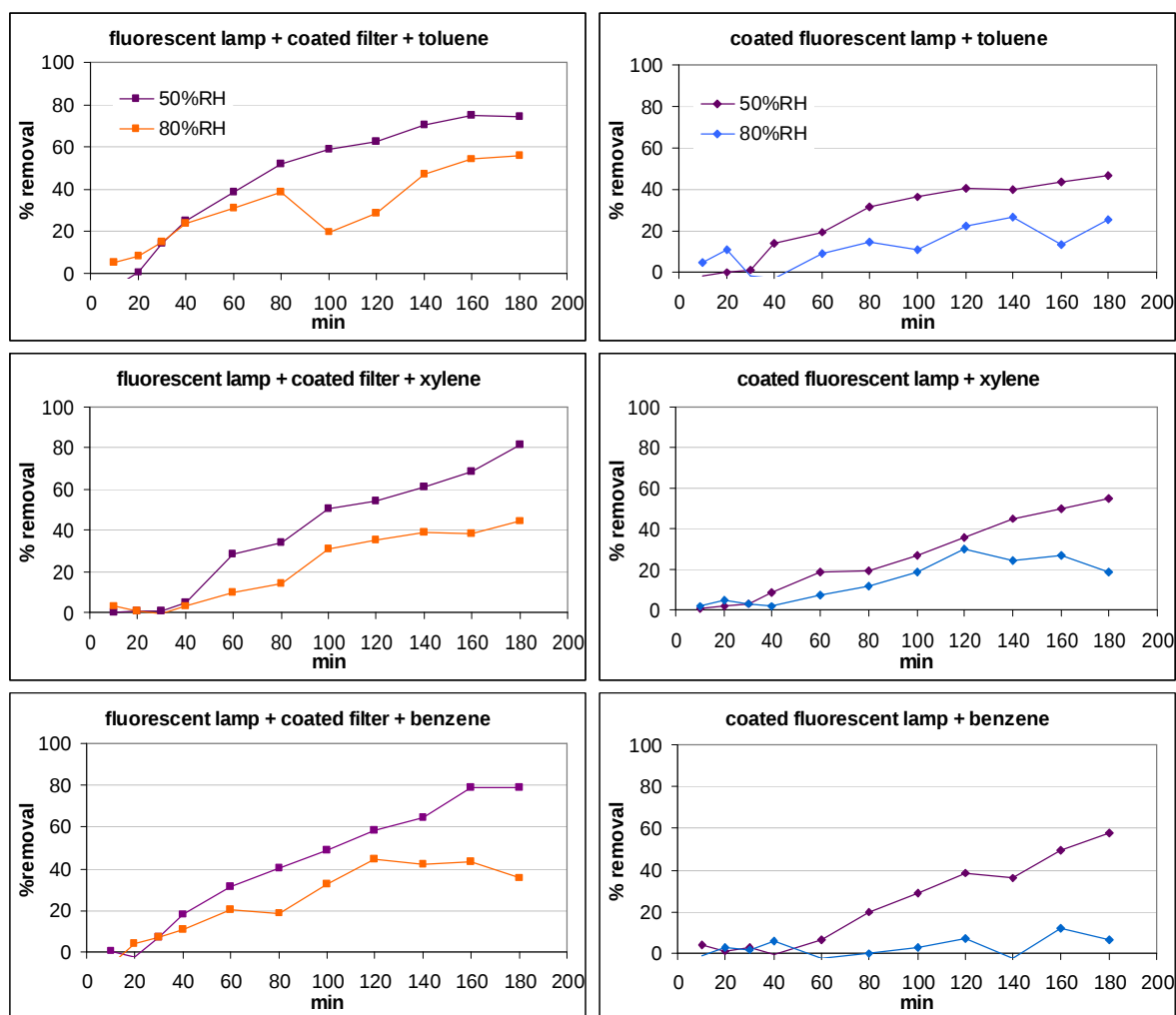


หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาทีกี่ 40

รูปที่ 57 ผลกระทบของความชื้นต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบบเคลือบ

จากรูป จะเห็นได้ว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลในการลดประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสอย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นหลอดที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของหลอดไฟโดยตรง หรือหลอดที่พื้นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ก็ตาม สอดคล้องกับการศึกษาของ Li et al. (2005) ที่พบว่ากำจัด benzene, toluene, ethylbenzene และ o-xylene ลดลงจาก 27%, 67%, 76% และ 80% เหลือเพียง 2%, 15%, 28% และ 35% ตามลำดับ เมื่อมีความชื้นสูงถึง 22000 ppm_v เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เหลือพื้นที่ว่างในการเกิดปฏิกิริยาลดน้อยลง

ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ก็ให้ผลในทำนองเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 58 ซึ่งระหว่างการศึกษาคอนเซนตรูอยู่ที่ 24.3-25.6 °C ความชื้นสัมพัทธ์ปานกลางอยู่ในช่วง 50-51% ความชื้นสัมพัทธ์สูงอยู่ที่ 80% ความเร็วลม 0.01 เมตร/วินาที ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอซังที่พื้นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ วัดได้ 0.84-0.93 mW/cm² ส่วนข้างที่ไม่ได้พื้นวัดได้ 1.63-1.79 mW/cm²

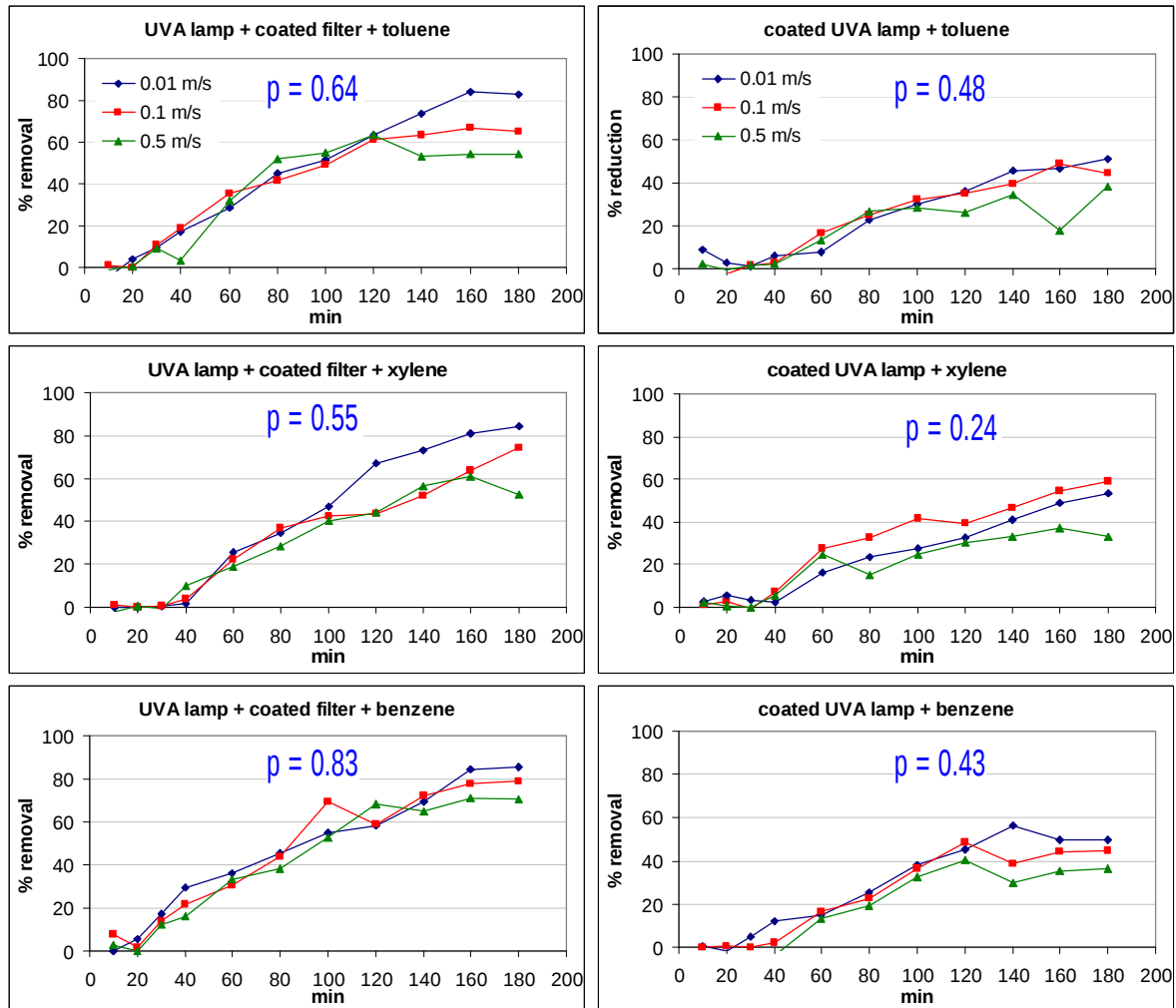


หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาที่ที่ 40

รูปที่ 58 ผลกระทบของความชื้นต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์

ผลการศึกษาของการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์นั้นสอดคล้องกับการใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำทุกประการ โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของการใช้งานลดลงอย่างเห็นได้ชัด ลำดับสุดท้าย จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วลม โดยใช้ความเร็ว 0.01 เมตร/วินาที เปรียบเทียบกับ 0.1 เมตร/วินาที และ 0.5 เมตร/วินาที ตามลำดับ ใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกล้ำและหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ทั้งที่เคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe โดยตรง และที่พื้นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe ในลักษณะเดิม ผลการศึกษาของหลอดไฟ

UVA แบล็คไลท์ แสดงได้ดังรูปที่ 59 โดยนำเสนอเป็นร้อยละของการกำจัดเพื่อให้่ายต่อการเปรียบเทียบ อุณหภูมิภายใน chamber อยู่ในช่วง 23.8-25.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 41-57% ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต เอว็ดที่ผิวหน้าของหลอดไฟเคลือบๆ อยู่ที่ 2.32 mW/cm² ส่วนความเข้มรังสีฯ ที่ผิวหน้าของหลอดไฟพัน ด้วยแผ่นใยแก้ววัดได้ 1.87-1.88 mW/cm² ทั้งนี้ ผลการศึกษาในรูปที่ 59 ทั้งหมด มาจากการใช้หลอดไฟชุด เดิม ทำการศึกษากับสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดแบบต่อเนื่องกันไป โดยปรับความเร็วลมเพิ่มขึ้นทีละ ช่วงเท่านั้นเพื่อลดความแปรปรวนที่อาจเกิดจากการใช้หลอดคนละชุดกันหรือเคลือบๆ ทีละครั้งกัน



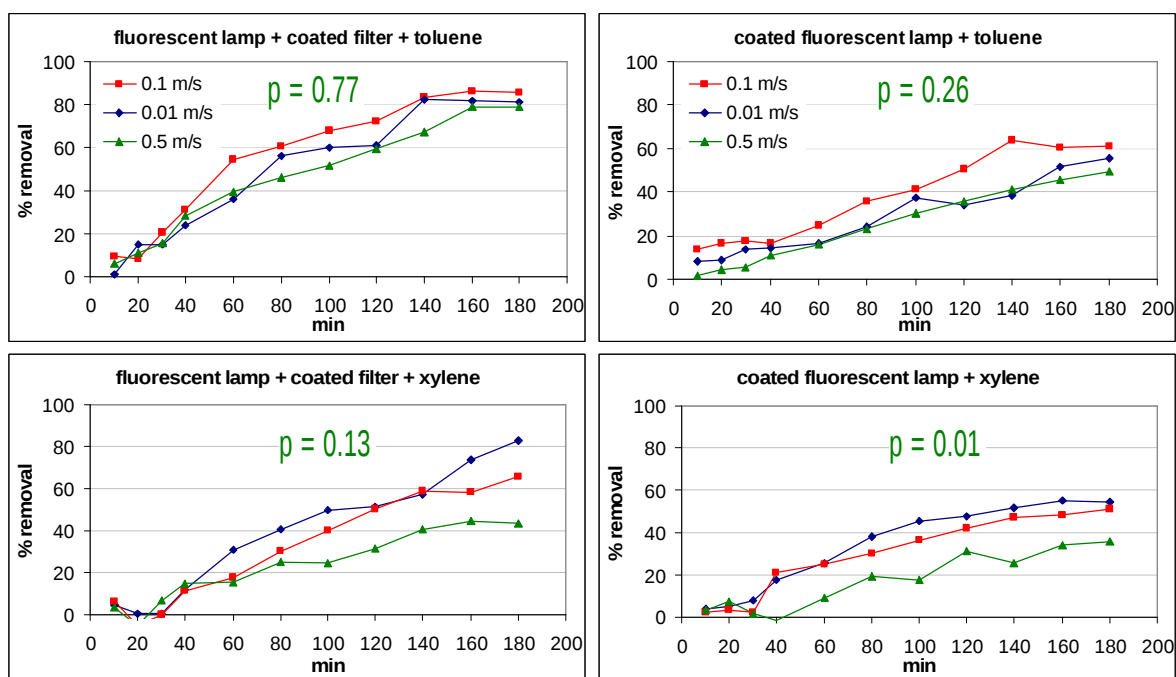
หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาที่ที่ 40

รูปที่ 59 ผลกระทบของความเร็วลมต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์

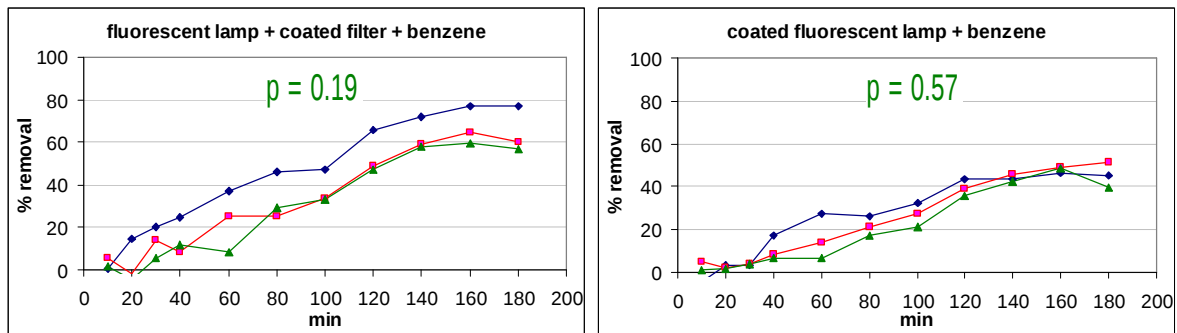
จากรูปที่ 59 พบว่า ความเร็วลมต่ำ (0.01 เมตร/วินาที) ให้ผลในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ผ่านเข้ามากระทบกับหลอดไฟดีกว่าการใช้ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที และ 0.5 เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนั้นเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นตั้งแต่นาทีที่ 140 เป็นต้นไปในหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ โดยเหตุผลน่าจะมาจากการที่สารอินทรีย์ระเหยง่ายมีเวลาสัมผัสกับอนุภาคลิซิสบนผิวของเส้นใยได้นานขึ้น หรือถูกกักไว้ในเส้นใยได้นาน โอกาสที่จะถูกทำลายจึงมากขึ้นตามไปด้วย แต่ในกรณี

ของหลอดไฟที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง พบว่าที่ความเร็ว 0.01 และ 0.1 เมตร/วินาที ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากกว่า โดยในการกำจัดไซลิน ยังพบว่าที่ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที ประสิทธิภาพกลับเหนือกว่าที่ความเร็ว 0.01 เมตร/วินาทีอีกด้วย ซึ่งเป็นไปได้ว่า หลอดไฟที่ไม่ได้หุ้มด้วยเส้นใยมีพื้นที่ผิวที่น้อยและไม่สามารถกักเก็บสารอินทรีย์เอาไว้ได้ การที่ความเร็วใน chamber ต่ำ (0.01 เมตร/วินาที) สารอินทรีย์ระเหยง่ายอาจฟุ้งกระจายไปทั่ว ทำให้มาสัมผัสกับหลอดไฟได้น้อยลง เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 0.1 เมตร/วินาที อากาศหรือลมจึงเป็นตัวนำพาให้สารอินทรีย์มาปะทะกับหลอดไฟโดยตรง จึงเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น แต่ถ้าความเร็วลมนั้นมีมากจนเกินไป (0.5 เมตร/วินาที) สารอินทรีย์ระเหยง่ายอาจผ่านหลอดไฟไปอย่างรวดเร็วจนเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ทันหรือเกิดได้ไม่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ในเชิงสถิติแล้ว ความเร็วลมทั้งสามระดับให้ความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งสิ้น ไม่ว่าจะใช้การเคลือบแบบใด

เมื่อเปลี่ยนเป็นหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ และหลอดไฟเคลือบๆ โดยใช้ความเร็วลมสามระดับคือ 0.01, 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาที ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 60 โดยการทดสอบทั้งหมดมาจากหลอดไฟชุดเดียวกัน ทำการทดสอบต่อเนื่องในแต่ละความเร็วลมโดยไม่มีการเปลี่ยนเป็นหลอดไฟชุดใหม่เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในเรื่องของความแตกต่างของหลอดที่ใช้ในแต่ละครั้ง อุณหภูมิภายใน chamber อยู่ที่ 23.5-25.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 43-55% ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอวัดจากผิวหน้าของหลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ อยู่ในช่วง 0.81-0.95 mW/cm² ส่วนความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอวัดจากผิวหน้าของหลอดไฟที่เคลือบๆ อยู่ในช่วง 1.19-1.89 mW/cm²



(ยังมีต่อ)

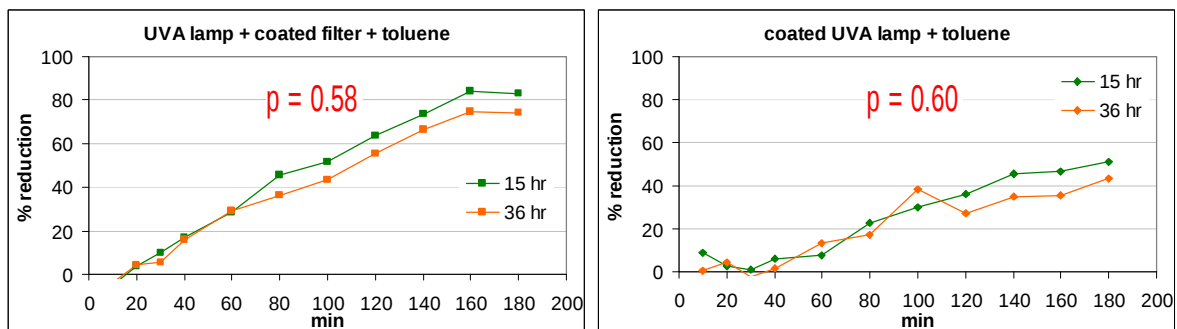


หมายเหตุ เริ่มเปิดไฟในนาทีที่ 40

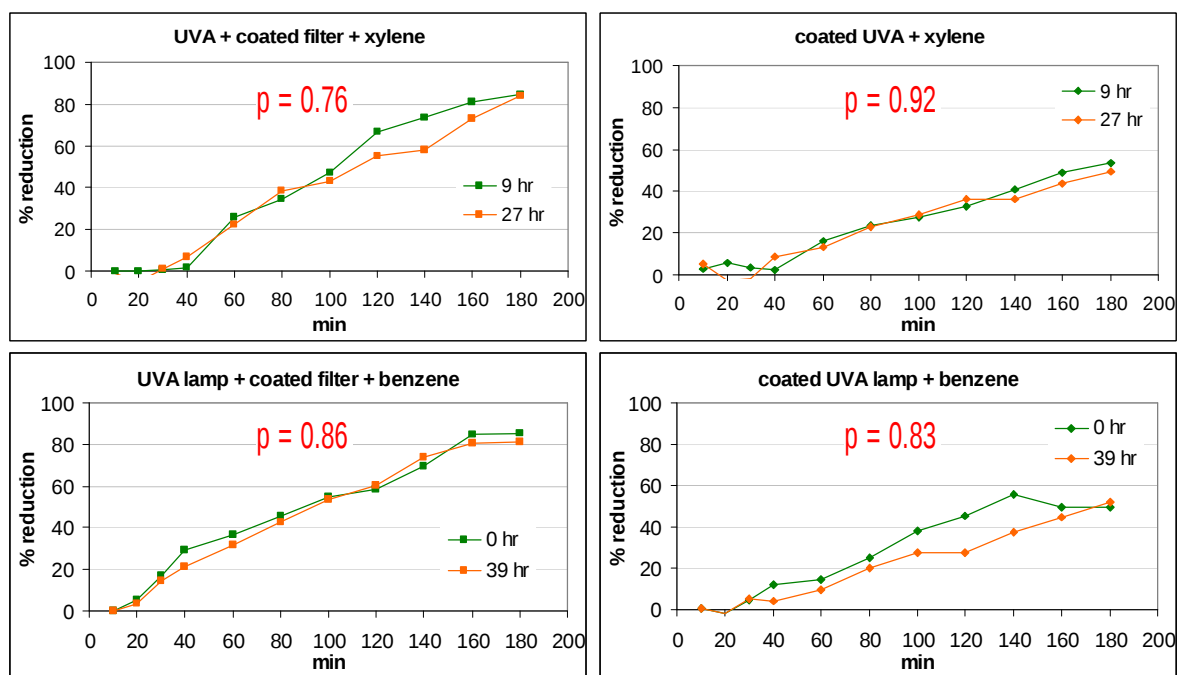
รูปที่ 60 ผลกระทบของความเร็วลมต่อความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์

ในกรณีของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ พบว่าความเร็วลม 0.01 เมตร/วินาที ไม่ได้ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่สูงที่สุดเสมอไป กล่าวคือในการกำจัดโทลูอีน พบว่าความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที ให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าความเร็วลม 0.01 เมตร/วินาที ขณะที่ความเร็วลม 0.5 เมตร/วินาที ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดในทุกกรณี อย่างไรก็ตาม ในการสลายไอระเหยของเบนซีน พบว่าหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่ความเร็วลม 0.1 เมตร/วินาที แทบจะให้ผลที่ไม่ต่างจากการใช้ความเร็วลม 0.5 เมตร/วินาที และในกรณีที่ใช้หลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง การกำจัดเบนซีนด้วยความเร็วลมสามระดับก็ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งความแปรปรวนดังกล่าว อาจต้องมีการศึกษาซ้ำให้มากขึ้นอีก

ทั้งนี้ ในการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4.2 นี้ เป็นการใชหลอดไฟในชุดเดิมทั้งสิ้น คณะผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหลอดไฟที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ว่ามีอายุการใช้งานได้มากน้อยเพียงใด โดยเปรียบเทียบเป็นร้อยละของการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังจากหลอดนั้นๆ ผ่านการใช้งานมาแล้วในจำนวนชั่วโมงต่างๆ กัน สำหรับหลอด UVA แบตเตอรี่ไลท์เคลือบๆ แสดงผลได้ดังรูปที่ 61 โดยหลอดเหล่านี้ผ่านการใช้งานที่ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ และ $80 \pm 5\%$ มาแล้ว และผ่านการทดสอบความเร็วลมตั้งแต่ 0.01 เมตร/วินาที ไปจนถึง 0.5 เมตร/วินาที แล้วเช่นกัน โดยสถานะที่นำมาใช้เปรียบเทียบในรูปที่ 61 นี้ ใช้ความเร็วลม 0.01 เมตร/วินาที อุณหภูมิ $25 \pm 3^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ เหมือนๆ กัน

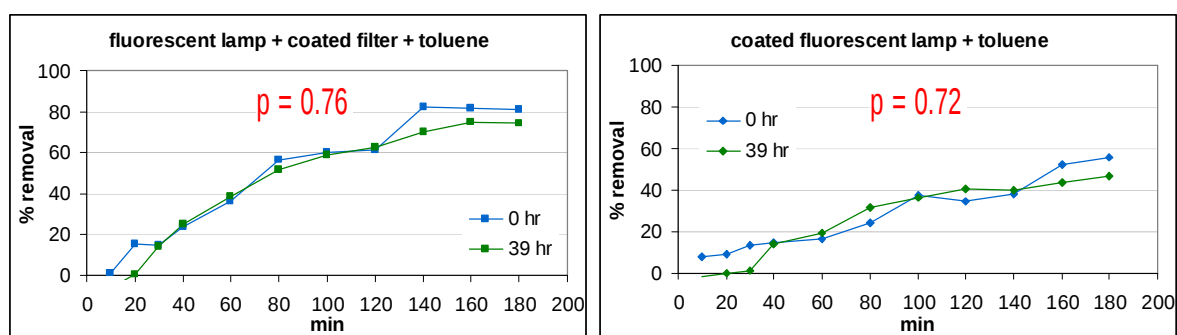


(ยังมีต่อ)

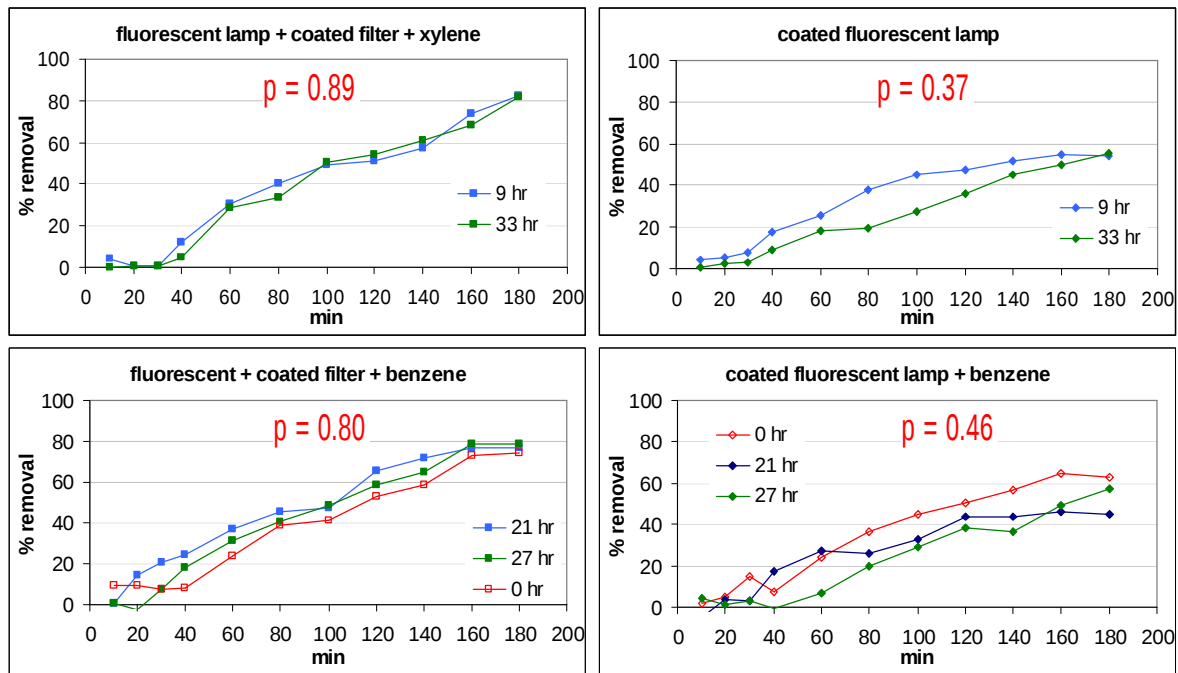


รูปที่ 61 ประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของหลอดไฟ UVA แบตเตอรี่เคลื่อนที่ ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในจำนวนชั่วโมงต่างกัน

จากรูปพบว่า การใช้หลอดไฟ UVA แบตเตอรี่เคลื่อนที่ ซ้ำๆ กัน ไม่ว่าจะผ่านความชื้นสูง ($80 \pm 5\%$) มาแล้ว หรือความเร็วลมตั้งแต่ 0.01 ไปจนถึง 0.5 เมตร/วินาที มาแล้วก็ตาม ประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายยังคงกลับมาเหมือนเดิมได้เมื่อกลับมาอยู่ที่สภาวะเดิม (ความชื้น $50 \pm 5\%$ ความเร็วลม 0.01 เมตร/วินาที) ไม่ว่าจะเป็หลอดไฟที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ หรือหลอดไฟที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติก็พบว่าความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เช่นกัน แสดงว่าการเคลือบหลอดไฟในการศึกษานี้ให้ความสามารถในการใช้งานได้อย่างน้อยเกือบ 40 ชั่วโมง สำหรับการศึกษากับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 62



(ยังมีต่อ)

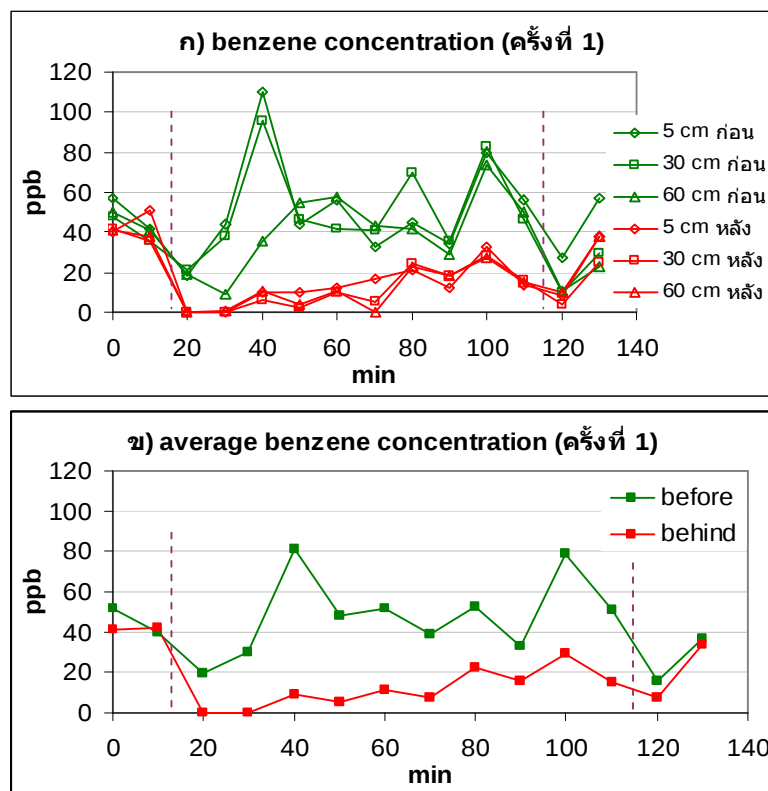


หมายเหตุ กรณี benzene หลอดไฟที่ผ่านการใช้งาน 21 ชม.กับ 27 ชม. เป็นหลอดไฟชุดเดียวกัน ส่วน 0 ชม. เป็นชุดที่เคลือบใหม่

รูปที่ 62 ประสิทธิภาพการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบฯ ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในจำนวนชั่วโมงต่างกัน

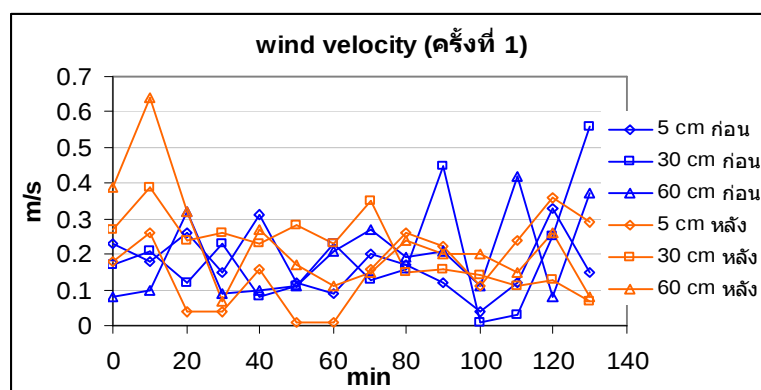
4.5 การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสถานะการใช้งานจริง

หลังจากเสร็จสิ้นการศึกษาใน chamber ทดลองและพบว่าการทำงานของหลอดไฟ UVA แบบสติกไลท์ด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ + 3% D3005 + 0.1% Fe ให้ผลที่ดีที่สุด คณะผู้วิจัยจึงจัดทำเป็นแผงหลอดไฟ UVA แบบสติกไลท์พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ จำนวน 10 หลอด นำไปวางไว้ที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ และทำการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบริเวณตำแหน่งเหนือลมทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟที่ระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับไอระเหยที่ผ่านแผงหลอดไฟออกมาทางด้านหลังของแผงหลอดไฟ (ใต้ลม) ที่ระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร เช่นกัน โดยใช้วิธีรูปเป็นดัวบ่งบอกทิศทางลม (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 3.6) ดังแสดงผลในรูปที่ 63 โดยในช่วงที่ทำการศึกษาพบเฉพาะไอระเหยของเบนซีน อุณหภูมิบรรยากาศวัดได้ 31 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 46% ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.01-0.39 เมตร/วินาที เริ่มตรวจวัดไอระเหยตั้งแต่เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป ในช่วงนาที่ที่ 0-10 (สองค่าแรก) เป็นการวัดความเข้มข้นของเบนซีนขณะที่ยังไม่ได้เปิดไฟ จากนั้นจึงเปิดไฟและวัดความเข้มข้นในนาที่ที่ 20-110 แล้วจึงปิดไฟอีกครั้งหนึ่งและวัดความเข้มข้นต่อในนาที่ที่ 120-130 (สองค่าสุดท้าย)



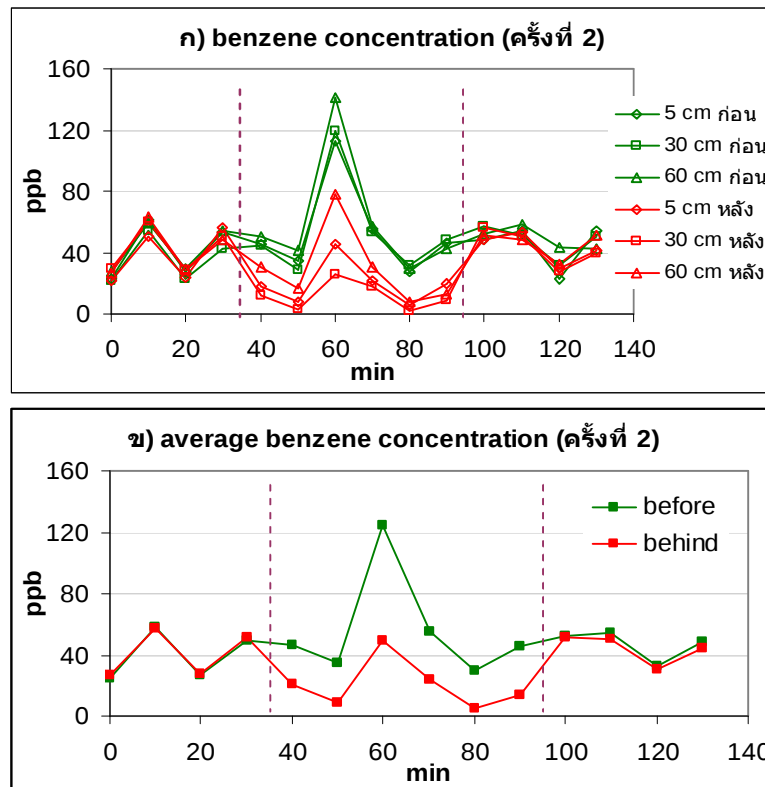
รูปที่ 63 ความเข้มข้นของเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแพลงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 1) ก) ความเข้มข้นที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ข) ความเข้มข้นเฉลี่ย

จากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงที่ไม่มีการเปิดไฟ (สองค่าแรกและสองค่าสุดท้าย) ความเข้มข้นของเบนซีนทางด้านหน้าและด้านหลังของแพลงหลอดไฟนั้นใกล้เคียงกันมาก แต่ทันทีที่เปิดไฟ ความเข้มข้นที่ด้านหลังต่ำกว่าทางด้านหน้าในทุกช่วงเวลาที่ยกมา และในระยะห่างตั้งแต่ 5 เซนติเมตรไปจนถึง 60 เซนติเมตรก็ยังพบการลดลงของเบนซีนในระดับที่ใกล้เคียงกันอยู่ โดยเฉลี่ยพบความเข้มข้นลดลง 17-72 ppb หรือคิดเป็นสัดส่วนตั้งแต่ 52% ไปจนถึง 100% ขณะที่ความเร็วลม ณ จุดที่วัดความเข้มข้นของเบนซีนทั้งด้านหน้าและด้านหลังมีความแปรปรวนไปมาและแทบไม่มีความแตกต่างกัน (รูปที่ 64)

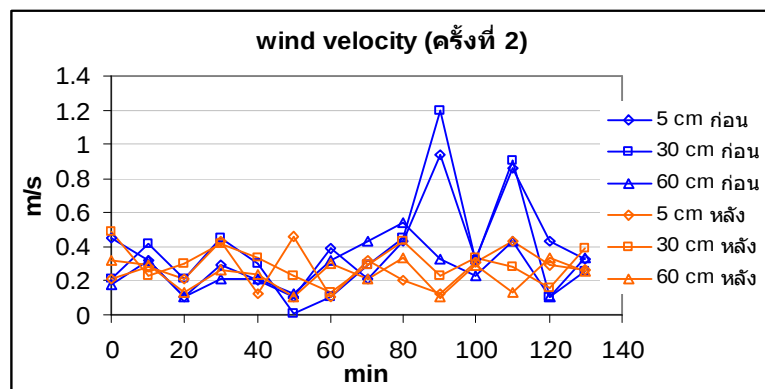


รูปที่ 64 ความเร็วลมที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแพลงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน (ครั้งที่ 1)

การศึกษาซ้ำในครั้งที่สอง ได้เพิ่มช่วงของการตรวจวัดความเข้มข้นของเบนซินระหว่างที่ปิดไฟให้นานขึ้นกว่าเดิม โดยการศึกษาเริ่มจากการตรวจวัดขณะที่ยังไม่มีไฟเปิดในนาที่ที่ 0-30 จากนั้นจึงเปิดไฟและตรวจวัดต่อในนาที่ที่ 40-90 แล้วจึงปิดหลอดไฟอีกครั้งหนึ่งในนาที่ที่ 100-130 เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง ผลของการตรวจวัดไอระเหยที่ระยะห่างต่าง ๆ กันและค่าเฉลี่ย แสดงได้ดังรูปที่ 65 โดยเริ่มศึกษาที่เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิบรรยากาศอยู่ที่ 31 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 46% ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.01-0.94 เมตร/วินาที (รูปที่ 66)

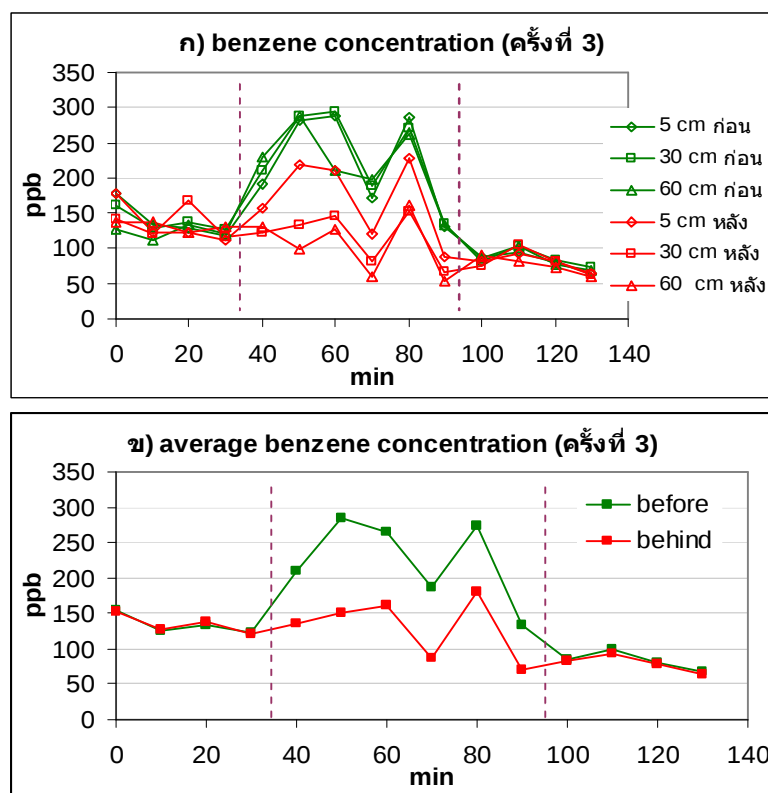


รูปที่ 65 ความเข้มข้นของเบนซินที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแฉงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 2) ก) ความเข้มข้นที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ข) ความเข้มข้นเฉลี่ย

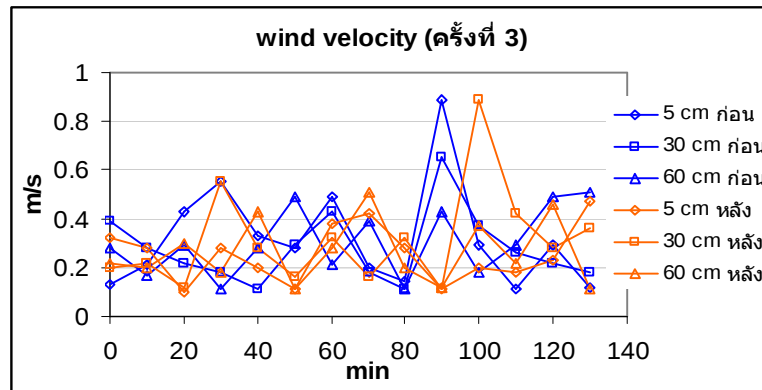


รูปที่ 66 ความเร็วลมที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแฉงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน (ครั้งที่ 2)

การศึกษาในครั้งที่สองนั้นชัดเจนยิ่งขึ้นว่า ในช่วงเวลาที่ไม่มีเปิดไฟหรือไม่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ไอระเหยของเบนซีนที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของแผงหลอดไฟแทบไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อเปิดไฟ ความเข้มข้นนั้นลดลงอย่างชัดเจน โดยการลดลงจากค่าเฉลี่ยพบได้ตั้งแต่ 25 ppb ไปจนถึง 75 ppb หรือคิดเป็นสัดส่วนได้ตั้งแต่ 56% ไปจนถึง 82% ในแง่ของความเร็วลม ในนาทิตี่ 90 และ 110 ความเร็วลมที่ทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟนั้นสูงกว่าด้านหลังของแผงหลอดไฟมาก แต่เมื่อดูที่ความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีน พบว่าในนาทิตี่ 90 ซึ่งยังคงเป็นช่วงที่เปิดไฟอยู่ ความเข้มข้นของเบนซีนทางด้านหน้ามีสูงกว่าทางด้านหลัง แต่ในนาทิตี่ 110 มีการปิดไฟไปแล้ว พบว่าไอระเหยทั้งสองด้านใกล้เคียงกันมากแม้ว่าความเร็วลมจะต่างกันก็ตาม แสดงว่า ความเร็วลมเกี่ยวข้องกับการสลายไอระเหยของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกค่อนข้างน้อย ส่วนการทดลองในเช้าที่ 3 แสดงผลได้ดังรูปที่ 67 โดยนาทิตี่ 0-30 เป็นช่วงที่ยังไม่ได้เปิดไฟ นาทิตี่ 40-90 มีการเปิดไฟแล้ว และนาทิตี่ 100-130 ปิดไฟอีกครั้งหนึ่ง ศึกษาที่เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิ 36.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 41% ความเร็วลม 0.10-0.89 เมตร/วินาที (รูปที่ 68)



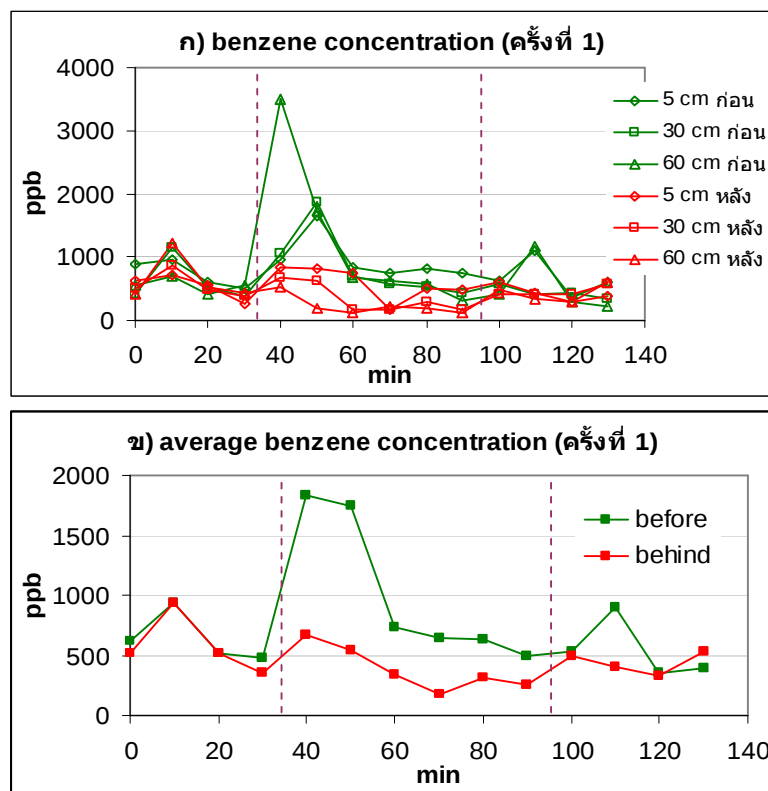
รูปที่ 67 ความเข้มข้นของเบนซีนที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแผงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 3) ก) ความเข้มข้นที่ระยะห่างต่างๆกัน ข) ความเข้มข้นเฉลี่ย



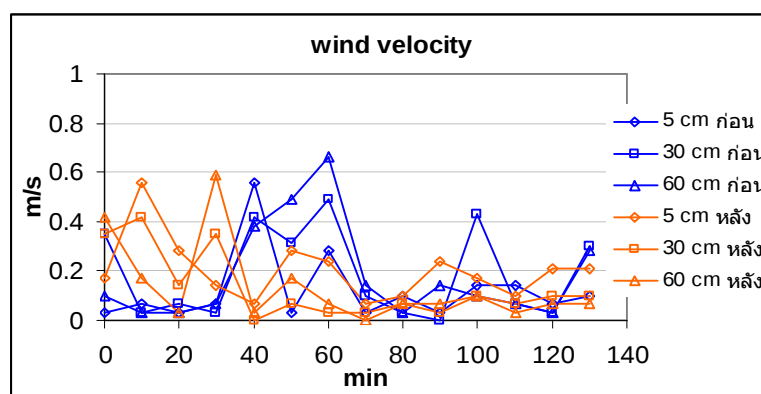
รูปที่ 68 ความเร็วลมที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ก่อนและหลังแผงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างๆกัน (ครั้งที่ 3)

การศึกษาในครั้งที่ 3 ยังคงสอดคล้องกับครั้งที่ 1 และ 2 ที่การลดลงของเบนซีนปรากฏเฉพาะกรณีที่เปิดไฟเท่านั้น แต่ความเข้มข้นที่ตำแหน่งด้านหลังของแผงหลอดไฟที่ระยะ 5 เซนติเมตรค่อนข้างใกล้เคียงกับความเข้มข้นทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟมากกว่าการศึกษาในครั้งอื่นๆ โดยเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของเบนซีนในครั้งนี้อาจสูงกว่าครั้งอื่นๆ (300 ppb เปรียบเทียบกับประมาณ 120 ppb) ทำให้ไอระเหยอาจถูกกำจัดได้ช้าลง หรืออาจเป็นไปได้ว่าอัตราการแพร่ไอระเหยความเข้มข้นสูงมีมากกว่าอัตราการแพร่ไอระเหยความเข้มข้นต่ำ ซึ่งที่ระยะ 30 เซนติเมตรและ 60 เซนติเมตรให้ผลที่สอดคล้องกันมากกว่า โดยความเร็วลมที่ใกล้เคียงกันระหว่างด้านหน้าแผงหลอดไฟและด้านหลังในช่วงเวลาที่ 0-80 แต่ในเวลาที่ 90 พบว่าความเร็วลมด้านหน้าสูงกว่าด้านหลังแผงหลอดไฟอย่างชัดเจน แต่ไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนกับการสลายไอระเหยของเบนซีน อย่างไรก็ตาม การศึกษาพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเบนซีนลดลงไปได้ตั้งแต่ 64 ppb ไปจนถึง 134 ppb หรือคิดเป็นสัดส่วนได้ตั้งแต่ 34% จนถึง 53%

ลำดับต่อไปเป็นการเปลี่ยนสถานที่ศึกษาเป็นศาลเจ้าพ่อมอดินแดงซึ่งตั้งอยู่ในเขตของมหาวิทยาลัยขอนแก่นที่มีนักศึกษาและประชาชนทั่วไปมากราบไหว้และจุดธูปสักการะเป็นประจำ การศึกษาใช้การตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟ เปรียบเทียบกับทางด้านหลังในลักษณะเดิม ผลการศึกษาในครั้งที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 69 โดยเก็บตัวอย่างในช่วงบ่าย เริ่มเวลา 15.30 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิบรรยากาศอยู่ที่ 30.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 45% ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0-0.66 เมตร/วินาที (รูปที่ 70) ในเวลาที่ 0-30 เป็นการตรวจวัดในช่วงที่ยังไม่ได้เปิดไฟ ส่วนเวลาที่ 40-90 มีการเปิดไฟแล้ว และในเวลาที่ 100-130 ปิดไฟอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 69 ความเข้มข้นของเบนซีนที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแฉ่งหลอดไฟฟั่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 1) ก) ความเข้มข้นที่ระยะห่างต่างๆกัน ข) ความเข้มข้นเฉลี่ย

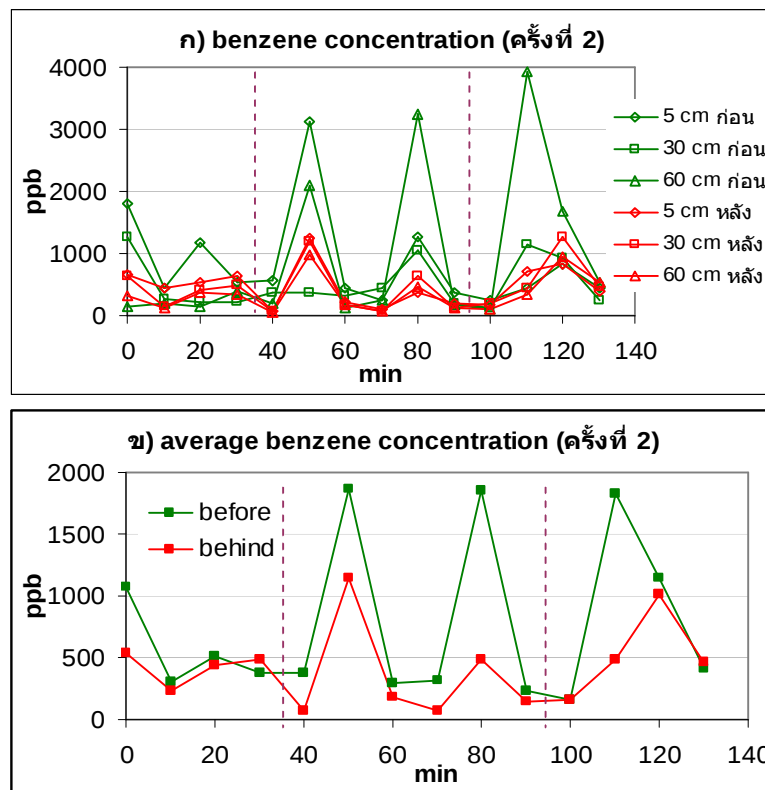


รูปที่ 70 ความเร็วลมที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแฉ่งหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างๆกัน (ครั้งที่ 1)

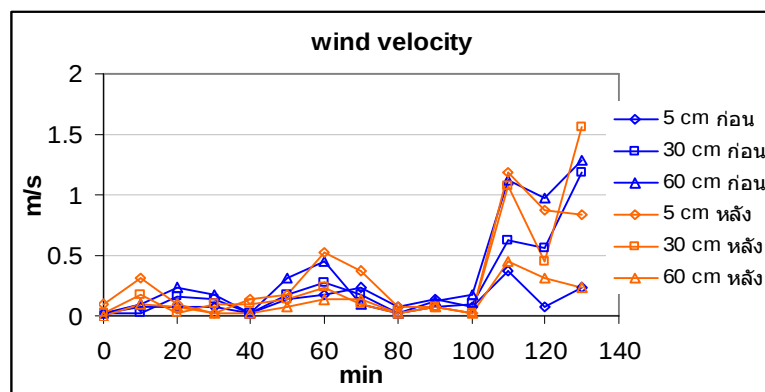
จากรูปที่ 69 พบว่าความเข้มข้นของเบนซีนจากควันรูปที่ศาลเจ้านั้นพบได้สูงถึง 3500 ppb หรือ 3.5 ppm ที่ระยะ 60 cm หน้าแฉ่งหลอดไฟ ซึ่งสูงกว่าค่าที่ยอมให้มีได้สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงของ NIOSH ที่กำหนดไว้ 0.1 ppm และเกินค่าเพดานสูงสุดที่ยอมให้มีได้ที่ OSHA กำหนดไว้ 1 ppm อีกด้วย โดยตำแหน่งยังอยู่ห่างจากแฉ่งหลอดไฟออกไปยิ่งมาก (60 เซนติเมตร) ยิ่งเข้าใกล้กระถางปึกฐูปมากขึ้น ความเข้มข้นยิ่งเพิ่มขึ้นตามลำดับ (ดูภาพประกอบในรูปที่ 17 หัวข้อ 3.6) โดยความเข้มข้นที่พบทางด้านหน้าของแฉ่งหลอดไฟที่ระยะ 5 เซนติเมตรกับ 30 เซนติเมตรนั้นใกล้เคียงกันมากกว่า แต่เมื่อเฉลี่ยกัน

แล้ว พบว่าแผงหลอดไฟเคลือบฯ สามารถกำจัดเบนซีนได้ตั้งแต่ 234-1207 ppb หรือคิดเป็นสัดส่วนได้ 48%-73% โดยความเร็วลมค่อนข้างปั่นป่วนในช่วงเวลาดังแต่นั้นที่ 0 ไปจนถึงนาทีที่ 60 และค่อยๆสงบลงหลังจากนั้น แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเข้มข้นของเบนซีนที่พบนั้นไม่ชัดเจน

การศึกษาในครั้งที่ 2 เปลี่ยนช่วงเวลาศึกษาเป็นตอนกลางคืน เวลา 20.00 น. เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่มีคนมาสัมผัสการเป็นจำนวนมาก แสดงผลได้ดังรูปที่ 71 โดยอุณหภูมิบรรยากาศอยู่ที่ 32.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 48% ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0-1.56 เมตร/วินาที (รูปที่ 72) นาทีที่ 0 ถึง 30 เป็นช่วงที่ยังไม่ได้เปิดไฟ ส่วนนาทีที่ 40-90 เปิดไฟแล้ว และปิดไฟอีกครั้งหนึ่งในนาทีที่ 100-130

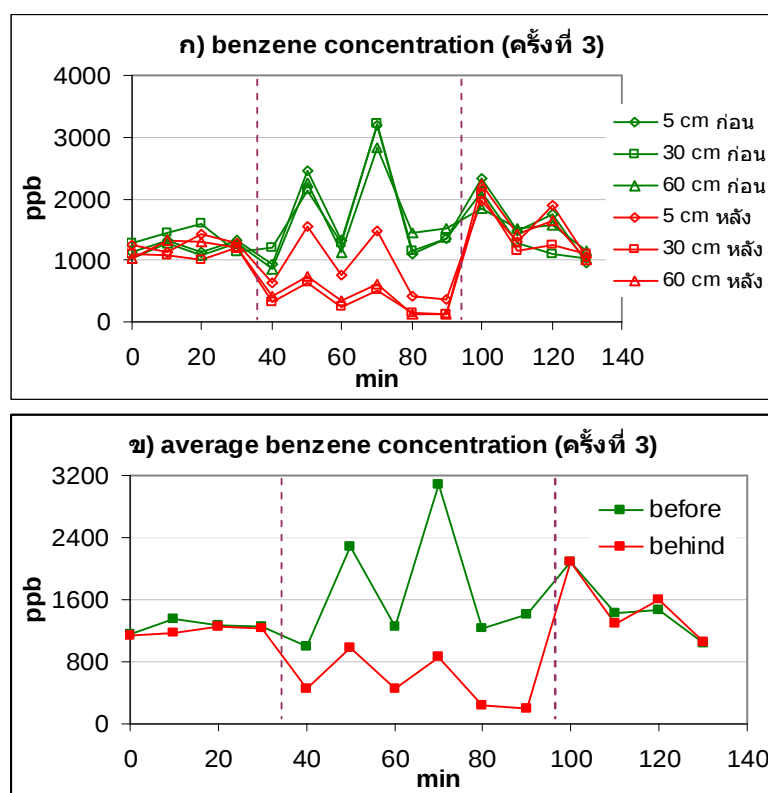


รูปที่ 71 ความเข้มข้นของเบนซีนที่ศาลเจ้า ก่อนและหลังแผงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 2) ก) ความเข้มข้นที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ข) ความเข้มข้นเฉลี่ย

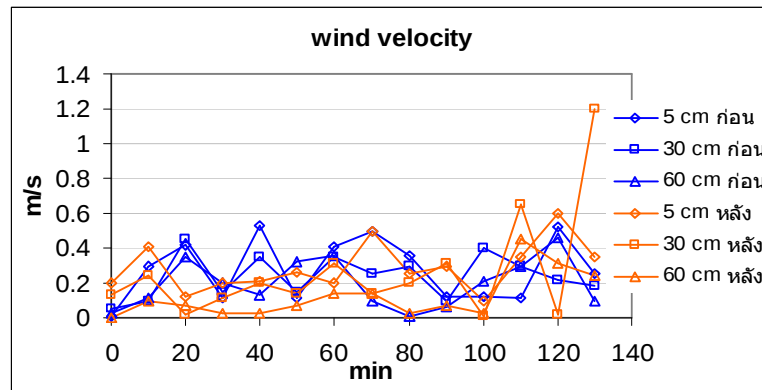


รูปที่ 72 ความเร็วลมที่ศาลเจ้าฟอมอดินแดงก่อนและหลังแผงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน (ครั้งที่ 2)

ผลของการศึกษาในครั้งที่ 2 พบว่าความเข้มข้นของเบนซีนจากควันธูปมีความแปรปรวนที่ระยะห่างต่าง ๆ กันทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟมากโดยเฉพาะที่ระยะ 60 เซนติเมตรที่เข้าใกล้กระถางธูป ขณะที่ความเข้มข้นทางด้านหลังของแผงหลอดไฟสอดคล้องกันมากกว่า โดยในช่วงก่อนเปิดไฟ ความเข้มข้นของเบนซีนระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังจัดว่าต่างกันไม่มาก ขณะที่เปิดไฟ ความแตกต่างนั้นชัดเจนขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปิดไฟไปแล้วในนาทิตี่ 110 ความเข้มข้นของเบนซีนด้านหน้านั้นสูงกว่าด้านหลังมากในลักษณะเดียวกับที่ปรากฏระหว่างที่มีการเปิดไฟ ซึ่งในช่วงหลังที่ปิดไฟนี้ ความเร็วลมในนาทิตี่ 110 มีสูงถึง 1.2 เมตร/วินาที จึงยากที่จะบอกว่าการลดลงของเบนซีนระหว่างที่มีการเปิดไฟเป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจริงหรือไม่ แต่ในช่วงนาทิตี่ 50 ระหว่างที่มีการเปิดไฟ ความเร็วลมนั้นมีเพียง 0.3 เมตร/วินาที จึงเป็นไปได้ค่อนข้างสูงที่การลดลงที่ปรากฏจะมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการลดลงระหว่างที่เปิดไฟนั้นพบได้ตั้งแต่ 94 ppb ไปจนถึง 2374 ppb หรือคิดเป็นสัดส่วนได้ตั้งแต่ 36% ไปจนถึง 82% การศึกษาซ้ำในครั้งที่ 3 จึงได้กระทำขึ้นในช่วงเช้าเวลา 9.00 น. เป็นต้นไป ซึ่งลมค่อนข้างอ่อนกว่า ดังแสดงในรูปที่ 73 อุณหภูมิบรรยากาศอยู่ที่ 33.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 49% ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.01-1.2 เมตร/วินาที (รูปที่ 74)



รูปที่ 73 ความเข้มข้นของเบนซีนที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแผงหลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบฯ (ครั้งที่ 3) ก) ความเข้มข้นที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ข) ความเข้มข้นเฉลี่ย



รูปที่ 74 ความเร็วลมที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงก่อนและหลังแผงหลอดไฟฯ ที่ระยะห่างต่างๆกัน (ครั้งที่ 3)

ในการศึกษาครั้งที่ 3 นี้มีความแปรปรวนน้อยกว่าในครั้งที่ 2 มาก โดยเห็นได้ชัดเจนว่า ในช่วงก่อนที่จะเปิดไฟและหลังจากปิดไฟไปแล้ว เบนซินในควันทูบนั้นแทบจะไม่แตกต่างกันเลยระหว่าง ด้านหน้าของแผงหลอดไฟกับด้านหลังของแผงหลอดไฟ ซึ่งในช่วงเวลาที่มีการเปิดไฟ เบนซินที่ตรวจพบ ทางด้านหลังของแผงหลอดไฟนั้นน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด โดยการลดลงนั้นพบได้ตั้งแต่ 541 ppb ไปจนถึง 2216 ppb หรือคิดเป็นสัดส่วนได้ตั้งแต่ 54% ถึง 86% ซึ่งความเร็วลมนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอด ระยะเวลาที่ศึกษา จึงน่าจะสรุปได้ว่า การลดลงที่ปรากฏเป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบน หลอดไฟ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเรื่องการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยนาโนเทคโนโลยีในที่นี้ มีความประสงค์ที่จะพัฒนาคุณภาพอากาศภายในอาคารด้านการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในอากาศ ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูก ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนหรือง่ายต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน โดยไม่ต้องมีการติดตั้งหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอาคารใดๆทั้งสิ้น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวที่ คณะผู้วิจัยให้ความสนใจคือหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ทุกอาคารสำนักงานมีการใช้งานกันอยู่แล้ว การศึกษานี้จึงได้กระทำการเคลือบหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีทั้งหมดที่ให้แสงขาว (visible white light) (ในที่นี้เรียกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์) และหลอดที่ให้แสงในคลื่นสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ชนิดเอ (UVA black light) (ในที่นี้เรียกว่าหลอด UVA แบล็คไลท์) ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ในความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ด้วยวิธีการพ่นสเปรย์ ซึ่งในขั้นตอนของการเคลือบ มีการผสมสารยึดติดหรือ binder สำหรับเป็นตัวช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะติดบนหลอดไฟได้ดียิ่งขึ้น โดยศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศและการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งหลังจากที่ได้ชนิดของ สารยึดติดที่เหมาะสมแล้ว จึงดำเนินการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่มีต่อ ประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไฟเคลือบๆ มีการศึกษาการเกิดและการแพร่กระจายของอนุภาคลิสร จากหลอดไฟเคลือบๆทั้งสองชนิด และมีการใช้แบบจำลอง Computational Fluid Dynamics (CFD) มาอธิบายรูปแบบการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องลักษณะต่างๆ รวมถึงมีการนำหลอดไฟเคลือบๆ ไป ทดสอบการใช้งานนอกสถานที่ซึ่งได้แก่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ และศาลเจ้า ซึ่งผลของการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การศึกษาสารยึดติดที่เหมาะสม

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 โดยเมื่อ ระยะเวลาการศึกษา 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 ซึ่งผล การศึกษานั้นสอดคล้องกับการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ กล่าวคือ 3% B1000 สามารถกำจัดจุลินทรีย์ใน ลำดับดังกล่าวได้ 90%, 72%, 46% และ 64% เมื่อระยะเวลา 180 นาที และ 3% Silane-69 กำจัดได้ 93%, 63%, 40 และ 59% ตามลำดับ การศึกษาในส่วนที่เหลือ จึงเลือกใช้ 3% B1000 เป็นสารยึดติด ทั้งนี้ เพื่อให้ มั่นใจว่าประสิทธิภาพการกำจัดดังกล่าวมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ไม่ใช่จาก photolysis ที่ใช้แสง ในการกำจัดจุลินทรีย์ หรือจากการเกาะติดหรือดูดซับ (adsorption) ของจุลินทรีย์บนสารยึดติดดังกล่าว

การศึกษานี้จึงทดสอบการกำจัดจุลินทรีย์โดยใช้หลอดไฟที่ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น พบว่า UVA แบล็คไลท์ และฟลูออเรสเซนต์ ไม่สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้เลย และการเคลือบเฉพาะสารยืติดบนหลอดไฟโดยไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปด้วยก็ไม่สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ลงได้เช่นกัน

ในส่วนของการทดสอบความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศชนิด โทลูอิน ไชลีน และเบนซีน โดยยังคงใช้สารยืติด 3% B1000 หรือ 3% Silane-69 ร่วมกับ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์เช่นเดิม ผลปรากฏว่า เฉพาะโทลูอินเท่านั้น ที่ถูกกำจัดได้ 30%-50% เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ ขณะที่ไชลีนและเบนซีนไม่มีการลดจำนวนลงเลย รวมถึงการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เคลือบๆ ก็ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสามชนิดเช่นกัน คณะผู้วิจัยจึงเปลี่ยนชนิดของสารยืติดเป็น 3% PEG 1000 และ 3% PEG 4000 ผลปรากฏว่า 3% PEG 1000 สามารถกำจัดโทลูอิน ไชลีนและเบนซีนได้ 51%-58% เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ แต่เมื่อเปลี่ยนไปใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ การกำจัดนั้นมีไม่เกิน 20% ขณะที่การใช้ 3% PEG 4000 สารอินทรีย์ระเหยง่ายแทบไม่มีการลดจำนวนลงเลย ไม่ว่าจะเป็นเคลือบบนหลอด UVA แบล็คไลท์หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ คณะผู้วิจัยจึงลองเปลี่ยนชนิดของสารยืติดเป็น 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe เนื่องจากเหล็กช่วยลดการกลับมารวมตัวกันใหม่ระหว่างอิเล็กตรอนกับรูว่าง ($hole^+$) ในอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยการเคลือบแบ่งเป็นการพ่นสเปรย์ลงบนหลอดไฟโดยตรง กับการนำแผ่นใยแก้วมาจุ่มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 3% D3005 และ 0.1% Fe และอบให้แห้งก่อนจึงค่อยนำมาพันบนหลอดไฟ ผลการศึกษาพบว่า หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ สามารถกำจัดโทลูอินและเบนซีนได้ 91-94% เมื่อครบเวลา 180 นาทีที่ทำการศึกษา และกำจัดไชลีนได้ 76% ส่วนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์ที่พ่นสเปรย์โดยตรง กำจัดโทลูอินและเบนซีนได้ 72% กำจัดไชลีนได้ 54% และเมื่อนำมาทดสอบกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ พบว่าหลอดไฟที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ กำจัดโทลูอินและเบนซีนได้ 74% กำจัดไชลีนได้ 56% ขณะที่หลอดไฟที่พ่นสเปรย์โดยตรง กำจัดโทลูอิน เบนซีน และไชลีนได้ 51%, 63% และ 36% ตามลำดับ และเพื่อทดสอบว่าการลดลงที่ปรากฏมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ไม่ใช่จากการเกาะติดหรือดูดซับบนสารยืติดหรือบนแผ่นใยแก้วที่นำมาหุ้ม การศึกษาจึงมีการพ่นสเปรย์เฉพาะสารยืติด 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe ลงบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์โดยตรงโดยไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปด้วย รวมถึงมีการจุ่มเคลือบแผ่นใยแก้วในสารยืติดดังกล่าวที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย ผลปรากฏว่า การลดลงของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสามชนิดกรณีที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วมีสูงสุด 22-23% ส่วนที่พ่นสเปรย์บนหลอดไฟโดยตรง มีการลดลงสูงสุด 8-17%

ทั้งนี้ คณะผู้วิจัย ได้ลองนำวิธีการเคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% D3005 และ 0.1% Fe ทั้งที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ และการพ่นสเปรย์บนหลอดไฟโดยตรง ไปทดสอบกับการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศอีกครั้งหนึ่ง เปรียบเทียบกับการใช้สารยืติดชนิด 3% B1000 โดยทดสอบพร้อมๆ กัน โดยที่แบ่งหลอดไฟออกเป็นสองฝั่ง ผลปรากฏว่า การใช้สารยืติดชนิด 3% B1000 ยังคงให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า 3% D3005 ผสม 0.1% Fe รวมถึงการพ่นหลอดไฟด้วยแผ่นใยแก้วหรือไม่ได้พ่น ก็ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอีกด้วย การศึกษานี้จึงสรุปว่าสารยืติดชนิด 3% B1000 นั้นเหมาะสมที่สุดกับการ

กำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ขณะที่การใช้แผ่นใยแก้วเคลือบด้วย 3% D3005 ร่วมกับ 0.1% Fe เหมาะสมที่สุดกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ

2) การศึกษาการเกิดและการแพร่กระจายของอนุมูลอิสระ

การศึกษาใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกลดไฟ และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์จำนวนชนิดละ 3 หลอด ฟันสเปกตรัมหนึ่งของหลอดด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% B1000 และอีกครึ่งหนึ่งของหลอด ฟันด้วยแผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสม 3% D3005 และ 0.1% Fe ติดบนเพดาน กล่องทดลอง และใช้สารละลาย DMPD ซึ่งมีสีชมพูอ่อน หรือสารละลาย ABTS ซึ่งมีสีเขียวอ่อนบรรจุในขวด impinger นำไปจ่อที่ผิวของหลอดไฟทั้งสองฝั่ง พร้อมดูดอากาศที่คาดว่าจะมีอนุมูลอิสระให้ตกลงมาในสารละลาย อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับ DMPD ให้กลายเป็น $\text{DMPD}^{\circ+}$ ซึ่งมีสีชมพูม่วง หรือทำปฏิกิริยากับ ABTS ให้กลายเป็น $\text{ABTS}^{\circ+}$ ซึ่งมีสีน้ำเงิน โดยการศึกษากระทำเปรียบเทียบกับกรณีเติมสาร oxidant ซึ่งได้แก่ FeCl_3 ในกรณีของ DMPD และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ในกรณีของ ABTS โดยสาร oxidant ที่เติมลงไปจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ $\text{DMPD}^{\circ+}$ หรือ $\text{ABTS}^{\circ+}$ ขึ้น และเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน โดยสารละลายที่มีสีเหล่านี้ ได้นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงตั้งต้นเอาไว้ จากนั้นมีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน Trolox ลงไป เพื่อทำลายอนุมูลอิสระ สีของสารละลายจึงค่อยๆ จางลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของ Trolox เพิ่มขึ้น ซึ่งสีที่จางลงนี้ได้นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้งหนึ่งเพื่อคำนวณเป็น %inhibition หรือร้อยละของการกำจัดอนุมูลอิสระ โดย %inhibition คำนวณมาจาก $1 - [\text{Absorbance}_{\text{เริ่มต้น}} / \text{Absorbance}_{\text{Trolox}}] \times 100$ 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 แบบลึกลดไฟพบว่า ด้านที่พันด้วยแผ่นใยแก้ว มี %inhibition มากกว่า %inhibition ของค่า background ตามธรรมชาติ 0.5-13.7% เมื่อใช้สารละลาย DMPD และ 0.5-12.2% เมื่อใช้สารละลาย ABTS ส่วนข้างที่พันสเปกตรัมโดยตรง มี %inhibition มากกว่าค่า background 1.3-10.5% เมื่อใช้ DMPD และ 0.3-14% เมื่อใช้ ABTS และเมื่อดูดอากาศจากหลอดไฟลอยห่างออกไปเรื่อยๆ เป็นระยะ 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่า %inhibition ค่อยๆ ลดลงจนไม่ต่างจากค่า background อีกต่อไป ส่วนการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ พบว่าการดูดอากาศที่ผิวของหลอดไฟเคลือบๆ หรือห่างออกมา 0.5 เซนติเมตร พบว่า %inhibition ไม่แตกต่างจากค่า background จึงสรุปได้ว่าอนุมูลอิสระในที่นี้มีการแพร่กระจายออกมาในจำนวนที่น้อยมากและไปได้ไม่ไกล (ในกรณีที่ใช้หลอดไฟ UVA แบบลึกลดไฟ) และแทบไม่พบการแพร่กระจายออกมาเลยเมื่อเทียบกับค่า background ตามธรรมชาติ (ในกรณีหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์)

3) ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 25 ± 1 °C ไปเป็น 31 ± 1 °C ไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟเคลือบๆ แต่อย่างใด โดยเป็นไปได้ความแตกต่างของอุณหภูมิมิมีมากพอ เนื่องจากช่วงที่ศึกษามีอุณหภูมิบรรยากาศสูงสุดเพียง 32 °C แต่ความชื้นมีผลกระทบเป็นอย่างมากทั้งจากหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มจาก $50 \pm 5\%$ ไปเป็น $80 \pm 5\%$ ลดประสิทธิภาพการกำจัด *E. coli*, *S. epidermidis*, *B. subtilis* และ *A. niger* ของหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบๆ จาก 81%, 78%, 55%, 63% ให้เหลือเพียง 54%, 52%, 46% และ 47% ตามลำดับ (ลดลงไป 9-56%) ส่วนการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในลำดับดังกล่าว ลดลงจาก 88%, 76%, 42%, 58% เหลือเพียง 63%, 64%, 33% และ 40% ตามลำดับ (ลดลงไป 9-25%) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ซึ่งความชื้นที่เพิ่มขึ้นน่าจะมีผลให้ละอองน้ำไปแย่งจับกับ active site ของไทเทเนียมไดออกไซด์ จนเหลือพื้นที่ว่างสำหรับการทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ลดลง ตลอดจนความชื้นน่าจะมีผลทำให้เซลล์เกิดการอัมต้ว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลล์รวมทั้งผนังเซลล์ของจุลินทรีย์จนอนุโมลิสระเบนทำลายได้ยากขึ้น อัตราการมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์จึงเพิ่มขึ้น หรือประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของหลอดไฟเคลือบๆ ลดลงนั่นเอง

ในเรื่องของความเร็วลม พบว่า กรณีที่ใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบๆ 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 น่าจะทำให้จุลินทรีย์ไหลมาปะทะกับอนุโมลิสระเบนหลอดไฟอย่างรวดเร็วและไหลผ่านออกไปพร้อมกับกระแสของอากาศ ทำให้ระยะเวลาการสัมผัสกับอนุโมลิสระเบนสั้นลงจนการทำลายเซลล์จุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลง

ในกรณีของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ การเพิ่มความเร็วลมจาก 0.05 เมตร/วินาที ไปเป็น 0.1 เมตร/วินาที และ 0.5 เมตร/วินาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ทุกชนิดลดลง ซึ่งแตกต่างจากการใช้หลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบๆ ที่ระหว่าง 0.05 เมตร/วินาที กับ 0.1 เมตร/วินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเป็นไปได้ว่าอนุโมลิสระเบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ มีจำนวนที่น้อยกว่าที่พบบนหลอดไฟ UVA แบล็คไลท์เคลือบๆ 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* สูงสุดเมื่อใช้ความเร็วลม

สามระดับ 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 ให้ผลแทบไม่แตกต่างกันในการกำจัดโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจาก $50 \pm 5\%$ ไปเป็น $80 \pm 5\%$ ลดประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน จาก 74%, 84%, 81% เหลือเพียง 25%, 31%, และ 39% ตามลำดับ (ลดลงไป 42-53%) เมื่อใช้หลอดไฟ UVA แบตเตอรี่ลิเธียมด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ส่วนการใช้หลอดไฟ UVA แบตเตอรี่ลิเธียมที่พ่นสเปรย์โดยตรง พบประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน ลดลงจาก 43%, 49% และ 52% เหลือเพียง 18%, 18% และ 7% ตามลำดับ (ลดลงไป 25-45%) เมื่อสิ้นสุดการทดลองในเวลา 180 นาที เช่นเดียวกับการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พ่นด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ที่พบว่าการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก $50 \pm 5\%$ ไปเป็น $80 \pm 5\%$ ลดประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอิน ไซลีน และเบนซีน จาก 74%, 82%, 79% เหลือเพียง 56%, 45%, 36% ตามลำดับ (ลดลงไป 18-43%) ขณะที่การใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่พ่นสเปรย์โดยตรง มีการลดลงของโทลูอิน 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 พบว่าการกำจัดโทลูอิน ไซลีน และเบนซีนลดลงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นทั้งจากหลอด UVA แบตเตอรี่ลิเธียม และหลอดฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ โดยในกรณีของหลอดไฟ UVA แบตเตอรี่ลิเธียมเคลือบๆ การลดลงเห็นได้ชัดเจนหลังจากนาฬิกาที่ 140 เป็นต้นไป (จากการศึกษาทั้งหมด 180 นาที) ซึ่งในแง่ของสถิติแล้ว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดเมื่อใช้ความเร็วลมต่างกัน ให้ความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ขณะที่การใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบๆ แม้ว่าจะสังเกตเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้ความเร็วลมต่างกัน ได้ชัดเจนกว่า แต่ในเชิงสถิติแล้ว เฉพาะการทดสอบกับไซลีนเท่านั้น ที่ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5) อายุการใช้งานของหลอดไฟ

การศึกษานี้มีการนำหลอดไฟที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆ กันมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์และการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายซ้ำใหม่ในสภาวะเดียวกัน (ที่ความเร็วลม 0.05 เมตร/วินาทีในกรณีของจุลินทรีย์ และ 0.01 เมตร/วินาทีในกรณีของสารอินทรีย์ระเหยง่าย อุณหภูมิ 25 ± 3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$) โดยพบว่าหลอดไฟเคลือบๆ (ทั้งหลอด UVA แบตเตอรี่ลิเธียมและหลอดฟลูออเรสเซนต์) ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 36-54 ชั่วโมง กับจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิและความเร็วลมหลากหลายกันไป ยังคงสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้แทบไม่แตกต่างไปจากเดิม เช่นเดียวกับการกำจัดโทลูอิน ไซลีน และเบน

ซิน ที่หลอดไฟพันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ ผ่านการใช้งานมาแล้ว 27-39 ชั่วโมง ในสถานะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมต่างๆกันไป ยังสามารถกำจัดไอระเหยในแต่ละชนิดได้ใกล้เคียงเช่นเดิมเมื่อ กลับมาใช้สถานะเดิมดังระบุ

6) การนำหลอดไฟไปกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสถานะจริง

ในการศึกษามีการนำหลอดไฟ UVA แบบลึกลูไลท์ จำนวน 10 หลอด พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบ 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมสารยึติดูด 3% B1000 และ 0.1% Fe จัดทำเป็นแผงหลอดไฟ นำไป ทดสอบการกำจัดไอระเหยของเบนซินที่ร้านซ่อมรถจักรยานยนต์ โดยใช้การวัดไอระเหยของเบนซินทาง ด้านหน้าของแผงหลอดไฟที่ระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับทางด้านหลังที่ระยะห่าง 5, 30 และ 60 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน โดยแบ่งเป็นการตรวจวัดในช่วงที่ยังไม่มีการเปิดไฟ เปรียบเทียบกับ ช่วงที่เปิดไฟแล้ว และระหว่างการปิดไฟอีกครั้ง ผลปรากฏว่าในช่วงที่ไม่ได้เปิดไฟ ไอระเหยของเบน ซินทางด้านหน้าของแผงหลอดไฟกับทางด้านหลังของแผงหลอดไฟมีความใกล้เคียงกันมาก แต่ทันทีที่ เปิดไฟ พบความแตกต่างระหว่างสองด้านอย่างชัดเจน โดยไอระเหยที่ผ่านแผงหลอดไฟออกมาทางด้าน หลังมีความเข้มข้นที่น้อยกว่า คิดเป็นสัดส่วนการลดลงได้ตั้งแต่ 34% ไปจนถึง 100% นอกจากนี้ ยังมีการ ทดสอบการกำจัดเบนซินจากควันรูปที่ศาลเจ้าพ่อมอดินแดงในลักษณะเดียวกันอีกด้วย ผลการศึกษายังคง พบว่า การเปิดไฟ UVA ที่พันด้วยแผ่นใยแก้วเคลือบๆ มีผลให้ความเข้มข้นของเบนซินในควันรูปลดลงได้ ในสัดส่วนตั้งแต่ 36% ไปจนถึง 86% ขณะที่การปิดไฟ ไม่พบการลดลงของเบนซินที่ชัดเจน

จากการศึกษาทั้งหมดนี้ เห็นได้อย่างชัดเจนว่า การนำหลอดไฟซึ่งปกติแล้วไม่สามารถกำจัด จุลินทรีย์หรือไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายใดๆได้มาเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ หลอดไฟ ดังกล่าวเกิดความสามารถในการกำจัดจุลินทรีย์และสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ในทันที แต่อย่างไรก็ ตาม การศึกษานี้พบข้อจำกัดของวิธีการศึกษาที่ใช้หลายประการที่สมควรต้องมีการพัฒนาปรับปรุงต่อไป อีก อาทิเช่น เทคนิคในการเคลือบหลอดไฟให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ติดแน่นคงทนที่ดีกว่าการพ่นสเปรย์ การแสวงหาสารยึติดูดชนิดอื่นๆที่อาจเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้มากกว่านี้ และ/หรือใช้เวลาที่สั้นกว่า นี้ การทดลองเติมโลหะ (metal-doping) ชนิดต่างๆในความเข้มข้นต่างๆกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการ ทำงาน รวมถึงควรมีการศึกษาถึงผลผลิตอันไม่พึงประสงค์ หรือ by-products หรือ intermediate products ที่อาจเกิดจากการสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่สมบูรณ์ กลายเป็นสารตัวอื่นที่อาจมีความเป็นพิษมากกว่า สารตั้งต้น นอกจากนี้ ยังอาจเพิ่มชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายให้มากขึ้น หรือใช้ระดับความเข้มข้นของ ไอระเหยที่สูงขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมต่อไปได้ ตลอดจนควรศึกษาอายุการใ้ งานของหลอดไฟเคลือบๆ ในจำนวนชั่วโมงที่สูงกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณิยา สังขจันทรานนท์, เนสินี ไชยเอีย, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. 2549. ชนิดและปริมาณของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อโรคในโรงพยาบาลและการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 29: 113-124.
- ชลีวัลย์ ชาญศิรินันท์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ภารดี ช่วยบำรุง. 2554. การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยหลอดไฟเคลื่อนบนนาโนไทเทเนียม. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 34(3): 110-119.
- ภาณุวิทย์ พุ่มหิรัญ, อรุณ นนทวานิช, สุรพล หลิมประเสริฐศิริ, จักรภาพ พุ่มมาก. 2536. การศึกษาเชื้อราในบรรยากาศที่กรุงเทพฯ. วารสารเวชสารแพทย์ทหารบก 46(4): 147-151.
- Ao C.H. and Lee S.C. 2004. Combination effect of activated carbon with TiO_2 for the photodegradation of binary pollutants at typical indoor air level. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 161: 131-140.
- Ao C.H., Lee S.C., Yu J.Z, Xu J.H. 2004. Photodegradation of formaldehyde by photocatalyst TiO_2 : effects on the presences of NO , SO_2 and VOCs. *Applied Catalysis B: Environmental* 54: 41-50.
- Block S.S., Seng V.P., Goswami D.W. 1997. Chemically enhanced sunlight for killing bacteria. *Journal of Solar Energy Engineering* 119: 85-91.
- Ching W.H., Leung M., Leung D. 2004. Solar photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde by sol-gel TiO_2 thin film for enhancement of indoor air quality. *Solar energy* 77: 129-135.
- Dotterud L.K., Vorland L.H., Falk E.S. 1995. Viable fungi in indoor air in homes and schools in the Sør-Varanger community during winter. *Pediatr. Allergy Immunol.* 6(4):181-6.
- Duchaine C., Meriaux A., Thorne PS., Cormier Y. 2000. Assessment of particulates and bioaerosol in earterm Canadian sawmills. *American Industrial Hygiene Association Journal* 61: 727-732.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1997. An office building occupant's guide to indoor air quality. Office of air and radiation, indoor environment division. Washington, D.C.
- Erel O. 2004. A novel automated method to measure total antioxidant response against potent free radical reactions. *Clinical Biochemistry* 37: 112-119.
- Fogliano V., Verde V., Randazzo G., Ritieni A. 1999. Method for measuring antioxidant activity and its application to monitoring the antioxidant capacity of wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47(3): 1035-1040.
- Forester C.D. and Wells J.R. 2011. Hydroxyl radical yields from reactions of terpene mixtures with ozone. *Indoor Air: Accepted article*. Doi:10.1111/j.1600-0668.2011.00718x.

- Fujimaki W., Nito K., Ueshiba H., Kanai T., Uchiyama T. 2004. The effects of fluorescent lamp coated with a photocatalyst film on the number of floating microorganisms or smell molecules in a room installed with the lamp. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?CMD=search&DB=pubmed> (Accessed on May 25, 2006)
- Fujishima A., Roa T., Tryk D.A. 2000. Titanium dioxide photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 1: 1-21.
- Goswami D.Y. 2003. Decontamination of ventilation system using photocatalytic air cleaning technology. Journal of Solar Energy Engineering 125: 359-365.
- Goswami D.Y., Trivedi D.M., Block S.S. 1997. Photocatalytic disinfection of indoor air. Transactions of the ASME 119: 92-96.
- Harris J.L. 1986. Modified method for fungal slide culture. J Clin Microbiol 24(3): 460-1.
- Hodgson A.T., Destailats H., Sullivan D.P., Fisk W.J. 2007. Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air cleaning applications. Indoor Air 17: 305-316.
- Hoos W.E and Bannerman T.L. 1999. Staphylococcus and micrococcus. In: Murray P.R., Barron E.J., Tenover F.C., Tenover F.C., Tenover F.C., Yolken R.H. ed. Manual of Clinical Microbiology 7th. ed. Washington, DC: ASM: 264-82.
- Huang Z., Maness P-C., Blake D.M., Wolfrum E.J., Smolinski S.I., Jacoby W.A. 2000. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 130: 163-170.
- Ibañez J.A., Litter M.I., Pizarro R.A. 2003. Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ on *Enterobactor 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., 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.
- Koracevic D. Koecevic G. Djordjevic V., Andrejevic S., Cosic V. 2001. Method for the measurement of antioxidant activity in human fluids. J. Clin Pathol 54: 356-361.
- Kudo T., Kudo Y., Ruike A., Hasegawa A., Kitano M., Anpo M. 2007. The design of highly active rectangular column-structured titanium oxide photocatalysts and their application in purification systems. Catalyst Today 122: 14-19.
- Lee J.H., Kang M., Choung S.J., Ogino K., Miyata S., Kim M.S., Park J.Y., Kim J.B. 2004. The preparation of TiO₂ nanometer photocatalyst film by a hydrothermal method and its sterilization performance for *Giardia lamblia*. Water Research 38: 713-719.

- Shiraishi F., Yamaguchi S., Ohbuch Y. 2003. A rapid treatment of formaldehyde in a highly tight room using a photocatalytic reactor combined with a continuous adsorption and desorption apparatus. Chemical Engineering Science 58: 929-934.
- Sigler L. and Kennedy M.J. 1999. Aspergillus, Fusarium and Other Opportunistic Moniliaceous Fungi. In: Murray P.R., Barron E.J., Pfaller M.A., Tenover F.C., Tenover R.H. ed. Manual of Clinical Microbiology 7th. ed. Washington, DC: ASM: 357-69.
- Sleiman M., Conchon P., Ferronato C., Chovelon J-M. 2008. Photocatalytic oxidation of toluene at indoor air levels (ppbv): Towards a better assessment of conversion, reaction intermediates and mineralization. Applied Catalytic B: Environment. Doi:10.1016/j.apcatb.2008.08.003
- van Grieken R., Marugán J., Sordo C., Martinez P., Pablos C. 2009. Photocatalytic inactivation of bacteria in water using suspended and immobilized silver-TiO₂. Applied Catalysis B: Environmental 93: 112-118.
- 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.
- Weschler C.J. and Shields H.C. 1997. Measurements of hydroxyl radical in manipulated but realistic indoor environment. Environmental Science and Technology 31: 3719-3722.
- Zhao J., and Yang X. 2003. Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. Building and Environment 38: 645-654.
- Zhao K., Ping W., Li Q., Hao S., Gao T., and Zhou D. 2009. *Aspergillus niger* var. *taipei*, a new species variant of taxol-producing fungus isolated from *Taxus cuspidata* in China. Journal of Applied Microbiology 107: 1202-1207.

ประวัติและผลงานวิจัยของนักวิจัยและคณะ

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางภารดี ช่วยบำรุง
(ภาษาอังกฤษ) Mrs.Paradee Chuaybamroong
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.ธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง
ปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 02-564-4440-4 ต่อ 2212 โทรสาร 02-564-4480 e-mail:
paradee@tu.ac.th
4. ประวัติการศึกษา

2540-2545	Ph.D สาขา Environmental Engineering Sciences (Air Pollution Program), University of Florida, USA.
2538-2540	Master of Science สาขา Environmental Science and Engineering, Colorado School of Mines, USA.
2534-2537	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ม. เกษตรศาสตร์
2527-2531	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสาธารณสุขศาสตร์ (วิทยาศาสตร์สุขภาพ) ม. มหิดล
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Aerosol Technology, Bioaerosol, Ventilation, Indoor air pollution
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย
 1. การพัฒนาประสิทธิภาพเครื่องฟอกอากาศชนิดไฟฟ้าสถิตในการกำจัดเชื้อวัณโรคและ
ก๊าซมลพิษภายในอาคาร (ทุน สกอ.)
 2. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของนาโนไทเทเนียมที่เคลือบบนแผ่น
กรองอากาศ (ทุน สวทช.)
 3. การพัฒนาแผ่นกรองอนุภาคชนิดประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของ
โรงพยาบาลด้วยนาโนเทคโนโลยี (ทุน สกว.)
 4. ชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในอากาศของโรงพยาบาลจากวิธีการเก็บตัวอย่างที่
ต่างกัน (ทุน สสส.)
 5. การออกแบบ ประสิทธิภาพ และทดสอบความเที่ยงตรงในการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren
Impactor ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองเพื่อการวิเคราะห์ในประเทศไทย (ทุน สกว.)

6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

1. Chuaybamroong P., Thunyasirinon C., Supothina S., Sribenjalux P., and Wu C.Y. 2011. Performance of photocatalytic lamps on reduction of culturable airborne microorganism concentration. *Chemosphere* 83(5): 730-735.
2. Chuaybamroong P., Chotigawin R., Supothina S., Sribenjalux P., Larpiattaworn S., Wu C.Y. 2010. Efficacy of photocatalytic HEPA filter on microorganism removal. *Indoor Air* 20: 246-254.
3. Chotigawin R., Sribenjalux P., Supothina S., Johns J., Charerntanyarak L., Chuaybamroong P.* 2010. Airborne microorganism disinfection by photocatalytic HEPA filter. *Environment Asia* 3(2): 1-7.
4. Chuaybamroong, P., Choomseer, P., Sribenjalux, P. 2008. Comparison between hospital single air unit and central air unit for ventilation performances and airborne microbes. *Aerosol and Air Quality Research* 8 (1): 28-36.
5. Chuaybamroong, P., Cayse, K., Wu, C.Y., Lundgren, D.A. 2007. Ambient aerosol and its carbon content in Gainesville, a mid-scale city in Florida. *Environmental Monitoring Assessment* 128: 421-430. (DOI.10.1007/s10661-006-9336-0).
6. Chuaybamroong, P., Wu, C.Y., Lundgren, D.A. 2006. Aerosol source sampling in a mid-scale city, Gainesville, Florida. *Aerosol and Air Quality Research* 6 (2): 213-230.
7. ยุพรัตน์ หลิมมงคล, ชุติวัลย์ ชาญญศิรินนท์, รชฤดี โชติกาวิรินทร์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง.* 2555. การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการทำงานต่างกัน. *วารสารวิจัย มข.* 17(2): 236-244.
8. ภาณุมาศ นาคเจือทอง, สุมิตรา ใจเชื้อ, ชนิตสรา งามศักดิ์ประเสริฐ, ภารดี ช่วยบำรุง.* 2554. ปริมาณคาร์บอนดาซิมในผลผลิตการเกษตรและการกำจัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส. *วารสารวิจัย มข.* 16(5): 454-467.
9. ชุติวัลย์ ชาญญศิรินนท์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ภารดี ช่วยบำรุง.* 2554. การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยหลอดไฟเคลือบนาโนไทเทเนียม. *วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม* 34(3): 110-119.
10. สุภาพร นาควงษ์, ประเสริฐ เหล่าบุศน์อนันต์, ภารดี ช่วยบำรุง.* 2553. การกำจัด *E. coli* ในน้ำดื่มด้วยซีโอไลต์ผสมเงิน. *วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม* 34(2): 101-107.

11. ชุตติมา สุขอนันต์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2554. การกำจัดสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ในน้ำด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวกลางและความเร็วในการกวนต่างกัน. วารสารวิจัย มข. 16(2): 73-81.
12. รัตน์ยาภรณ์ ฉายศรี และ ภารดี ช่วยบำรุง. * 2554. การกำจัดสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ในน้ำด้วยวิธีเฟนตัน. วารสารวิจัย มข. 16(1): 63-71.
13. สุจิตรา นาวารัตน์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2553. การกำจัด *Bacillus subtilis* ในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสและรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 24(3): 33-42.
14. ยุพรัตน์ หลิมมงคล, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2552. ความสามารถของเครื่องฟอกอากาศชนิดอิเล็กทรอนิกส์ฟิลเตอร์ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ. วารสารเทคนิคการแพทย์และกายภาพบำบัด 21(3): 246-256.
15. ภารดี ช่วยบำรุง*, ชุลีวัลย์ ชาญญศิรินนท์, รชฤดี โชติกาวิรินทร์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์. 2550. ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศด้วย Andersen Impactor แบบต่างๆ วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 22(1): 139-151.
16. ชุลีวัลย์ ชาญญศิรินนท์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2550. การเปรียบเทียบเครื่องมือเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศระหว่าง Andersen Impactor ชนิด 6 ชั้นและชนิดชั้นเดียว (N₆). วารสารมข.วิจัย (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 7(3): 107-117.
17. ปิยะพงษ์ ชุมศรี, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2550. ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการใช้งานของแผ่นน้ำกากกรองอากาศกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในบรรยากาศของโรงพยาบาล. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 21(2): 79-91.
18. จิราภรณ์ ประธรรมโย, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2550. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อราในอากาศที่เก็บโดยวิธี Open plate และ Andersen Impactor ในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง. วารสารสาธารณสุขศาสตร์ 37(2): 100-111.
19. ไชยรัตน์ อิ่มอมกมล, เลิศชัย เจริญชัยรักษ์, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2550. ความเข้มข้น การกระจายของขนาดอนุภาคตามน้ำหนักในบรรยากาศ และโอกาสในการสะสมตัวของอนุภาค PM₁₀ ในระบบทางเดินหายใจ. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 30(1): 87-98.
20. กฤษณิยา สังขจันทรานนท์, เนติณี ไชยเอีย, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. * 2549. ชนิดและปริมาณของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อโรคในโรงพยาบาลและการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 29(4): 113-124.

*corresponding author

ผู้ร่วมโครงการวิจัยคนที่ 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายพิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Pipat Sribenjalux
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: รองศาสตราจารย์
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ภาควิชาจุลชีววิทยาคลินิก คณะเทคนิคการแพทย์ ม.ขอนแก่น อ.เมือง ขอนแก่น 40002
โทรศัพท์ 043-202-086 โทรสาร 043-202-086 e-mail: pipsri@kku.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
1978 B.Sc. (Medical Technology) Chulalongkorn University, Thailand
1984 M.Sc. (Science) Chulalongkorn University, Thailand
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Mycobacterium tuberculosis culture and diagnosis, Epidemiology of *Plesiomonas shigelloides*.
Application of new techniques for diagnosis, identification and classification of bacteria.
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย (ยังไม่ได้รวบรวมข้อมูลปัจจุบัน)
 - 6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :
 1. Sribenjalux P., Chomvarin C., Tattawasart U., Tiengpitayakorn K., Wilailuckana C. 1991. Isolation of *Campylobacter jejuni/coli* from diarrheal patients in Srinakarind and Khon Kaen hospitals. J Med Tech Assoc Thailand 19 (2): 93-96.
 2. Wilailuckana C., Ranpong P., Srisaikam P., Chanawong A., Sribenjalux P. 1997. Species of *Mycobacteria* other than tuberculosis isolated from patients in Srinagarind hospital. J Med Tech Phy Ther. 9 (1): 26-30.
 3. Sribenjalux P., Juntavong P., Somin M. 1998. Microbiological examination of pasteurized milk in Khon Kaen Municipality. J Med Tech Phy. 10 (3): 124-129.
 4. Srilunchang M., Sirikoch P., Singpru P., Sribenjalux P., Pakarasang M., Pinlaor P. 2000. Microbiological quality of water from swimming pools in Khon Kaen University. J Med Tech Phy Ther. 12 (1): 35-43.
 5. Sribenjalux P., Lutitanond A., Chaimanee P., Aucharoen A. 2000. Comparison of Mac Genta and MacConkey agar for isolation of *Burkholderia pseudomallei* from sputum. J Med Tech Phy Ther. 12 (3): 116-120.

6. Lulitanond A., Srigulbutr S., Pienthaweechai K., Prariyachatigul C., Srilunchang M., Pinlaor P., Sangka A., Sribenjalux P. 2001. Serum Insitut enteric medium Isolation of enteropathogenic bacteria by Statens Serum Institut enteric medium. J Med Tech Phy Ther. 13 (2): 114-119.
7. Paupermpoonsiri S., Sribenjalux P., Wonglacorn L., Bourpoun J., Vilachai C. 2001. Detection of MRSA carriers by using Lipovitellin mannitol salt agar. J Med Tech Phy Ther. 13 (2): 128-132.
8. Sribenjalux P., Pinlaor P., Srilunchang M., Sangka A. 2001. The bactericidal efficacy of Perasafe. J Med Tech Phy Ther. 14 (1): 57-62.
9. Srilunchang M., Pilakong S., Chaluaysri K., Sribenjalux P., Pinlaor P., Sangka A. 2002. Identification of *Mycobacterium bovis* from *Mycobacterium* species isolated from patients in Srinagarind Hospital. J Med Tech Phy Ther. 14(1): 71-78.

ผู้ร่วมโครงการวิจัยคนที่ 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสิทธิสุนทร สุโพธิณะ
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Sitthisuntorn Supothina
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: นักวิจัยอาวุโส
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ อ.คลองหลวง ปทุมธานี 12120
โทรศัพท์ 02-564-6500 ต่อ 4234 โทรสาร 02-564-6447 e-mail: sitthis@mtec.or.th
4. ประวัติการศึกษา:
2536 วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2541 Ph.D. (Materials Science and Engineering) Case Western Reserve University, USA.
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
การสังเคราะห์ วิเคราะห์ ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ในรูปแบบผงและฟิล์ม
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: วัสดุนาโน-โฟโตคะตะลิสต์กับการประยุกต์ใช้เพื่อดูดซับกลิ่นในห้อง
โดยสารรถยนต์
 - 6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :
 1. Nimitrakoolchai O. and Supothina S. Fabrication of silica-based multilayer films with self-cleaning and antireflective properties. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. in press.
 2. Rattanakam R. and Supothina S. Selected-control hydrothermal synthesis of hexagonal tungsten oxide nanowires. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. in press.
 3. Atthi N., Nimitrakoolchai O., Supothina S., Kittikul S., Prawetpai N., Supadech J., Jeamsaksiri W., Pankiew A., Hruanun C. and Poyai A. An effect of viscosity of coating materials on silicon micro-patterning arrays for superhydrophobic surface. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. in press.
 4. Chuaybamroong P., Chotigawin R., Supothina S., Sribenjalux P., Larpiattaworn S. and Wu C-Y. 2010. Efficacy of photocatalytic HEPA filter on microorganism removal. Indoor Air. 20: 246-254.
 5. Nimitrakoolchai O. and Supothina S. 2010. Effect of different oxide fillers on superhydrophobicity of water-repellent organic-inorganic hybrid films. International Journal of Nanomanufacturing. 5(1/2): 53-61.

6. Atthi N., Nimittrakoolchai O., Supothina S., Supadech J., Jeamsaksiri W., Pankiew A., Hruanun C. and Poyai A.. 2010. An effect of viscosity of coating materials on silicon micro-patterning arrays for superhydrophobic surface. *Advanced Materials Research*. 93-94: 447 - 450.
7. Jindasuwan S., Nimittrakoolchai O., Sudjaritworakun P., Jinawath S. and Supothina S. 2009. Surface characteristics of water-repellent polyelectrolyte multilayer films containing various silica contents. *Thin Solid Films*. 517(17): 5001 – 5005.
8. Nimittrakoolchai O. and Supothina S. 2009. Bactericidal activity and UV-filtering property of TiO₂-based photocatalysts coated on curtain fabric. *Research on Chemical Intermediates*. 35(3): 271 - 280.
9. Rattanakarm R. and Supothina S. 2009. Visible light sensitive N-doped TiO₂ photocatalysts prepared by mechanochemical method: Effect of nitrogen source. *Research on Chemical Intermediates*. 35(3): 263 - 269.
10. Nimittrakoolchai O. and Supothina S. 2008. High-yield precipitation synthesis of hydrous tungsten oxide nanoplate and its ethylene gas sensing characteristic. *Materials Chemistry and Physics*. 112(1): 270 – 274.
11. Tawkaew S., Chareonpanich M. and Supothina S. 2008. Preparation and photocatalytic study of fibrous K_{0.3}Ti₄O_{7.3}(OH)_{1.7}- anatase TiO₂ nanocomposite photocatalyst. *Materials Chemistry and Physics*. 111(2-3): 232 – 237.
12. Nimittrakoolchai O. and Supothina S. 2008. Polymer-based superhydrophobic coating fabricated from polyelectrolyte multilayers of poly(allylamine hydrochloride) and poly(acrylic acid). *Macromolecular Symposia*. 264: 73 – 79.
13. Jindasuwan S., Sujaridworakun P., Jinawath S. and Supothina S. 2008. Effect of heat treatment temperature on surface topography and hydrophobicity of polydimethylsiloxane – titanium oxide hybrid films. *Macromolecular Symposia*. 264: 90 – 94.
14. Tawkaew S. and Supothina S. 2008. Preparation of agglomerated particles of TiO₂ and silica-coated magnetic particle. *Materials Chemistry and Physics*. 108(1): 147 – 153.
15. Nimittrakoolchai O. and Supothina S. 2008. Deposition of organic-based superhydrophobic films for anti-adhesion and self-cleaning applications. *Journal of the European Ceramic Society*. 28: 947 – 952.
16. Nimittrakoolchai O. and Supothina S. 2008. Nanocrystalline TiO₂ coated-fabric for UV shielding and anti-bacterial functions. *Materials Science Forum*. 569: 21 – 24.
17. Supothina S., Juengsuwattananon K., Panyathanmaporn T., Jaroenworarluck A.,

- Jinawath S., Sooknoi T. and Tawkaew S. 2007. Effect of aging time on crystalline structure evolution of TiO_2 nanoparticles. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 1(9): 1105 – 1111.
18. Supothina S., Pimtong-Ngam Y., Jiemsirilers S. 2007. Preparation of tungsten oxide–tin oxide composites and their ethylene sensing characteristics. *Sensors and Actuators A: Physical*. 139: 7 – 11.
 19. Thackthay J., Supothina S. and Tawkaew S. 2007. Preparation and characterization of immobilized titanium dioxide on glass powder. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*. 1(6): 806-814.
 20. Supothina S., Seeharaj P., Yoriya S. and Sriyudthsak M. 2007. Synthesis of tungsten oxide nanoparticles by acid precipitation method. *Ceramics International*. 33(6): 931–936.
 21. Juengsuwattananon K., Jaroenworuluck A., Panyathanmaporn T., Jinawath S. and Supothina S. 2007. Effect of water and hydrolysis catalyst on the morphology and crystal structure of TiO_2 photocatalyst prepared by sol-gel method. *Physica Status Solidi (A)*. 204(6): 1751 - 1756.
 22. Jaroenworuluck A., Panyathanmaporn T., Soontornworajit B. and Supothina S. 2006. Fabrication of TiO_2 film by a microwave drying technique and its photocatalytic activity. *Surface and Interface Analysis*. 38(4): 765 – 768.

ผู้ร่วมโครงการวิจัยคนที่ 3

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายเสถียรธรรม สุจริตภักดีสกุล
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Sedthawatt Sucharitpwatskul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: วิศวกร
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ อ.คลองหลวง ปทุมธานี 12120
โทรศัพท์ 02-935-5848 โทรสาร 02-935-5849 e-mail: sedthaws@mtec.or.th
4. ประวัติการศึกษา:
2540 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2542 วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานทางวิศวกรรม, การออกแบบและแก้ปัญหาทางวิศวกรรม
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: การวิเคราะห์การไหลผ่านกันแมลงหน้ารถโดยสารส่วนบุคคล
การวิเคราะห์การไหลในท่อเตาเผา
การวิเคราะห์ระบบระบายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของอาคาร
สภธรรมกายสากล
การวิเคราะห์การไหลในเตาอบแม่พิมพ์แบบที่ 1 และแบบที่ 2
 - 6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว
 1. Rooppakhun S., Piyasin S., Sitthiseriprathip K. and Sucharitpwatskul S. 2009.
Biomechanical study of the rigid external distractor (REDII) device: the effect of pin placement on the stability of device. The 4th International Symposium on Biomedical Engineering, Thailand. December 14-18, 2009.
 2. Wangkiet R., Sucharitpwatskul S., Sirisinha C., Deepreasertkul C. and Sae-Oui P. 2008.
Characterization of Material Constants Based on Synthetic Biaxial Data. Science Asia. 34 (4): 395-399.
 3. Sucharitpwatskul S., Sae-Oui P. and Wangkiet R. 2007. Stress Analysis of Rubber Products by Finite Element Method. Rubber in Engineering Seminar. Chiang Mai, Thailand. January 22-24, 2007.

4. Premvaranon P., Sucharitpwatskul S. and Pratumwal Y. 2005. CAE Application in Automotive Lighting. The 19 th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. Phuket, Thailand. October 19-21, 2005.
5. Maneeratana K., Putivisutisak S., Sucharitpwatskul S., Intarakumthornchai T. and Chaipayinunt S. 2005. A Three-Dimensional Simulation of Flow Mixing in a Mixing Head of an Injection Moulding Machine. The Eighth Asian Symposium on Visualization. Chiangmai, Thailand. May 23-27, 2005.
6. Premvaranon P., Soepram V., Intarakumthornchai T., Sucharitpwatskul S., Limtrakarn W. and Dechaumphai P. 2004. Case Study on Silo Structural Analysis. The Third Thailand Materials Science and Technology Conference. Bangkok. August 10-11, 2004.
7. Sucharitpwatskul S., Limtrakarn W. and Dechaumphai P. 2004. Stress Analysis for Turbomachine Blades by CAE. The Third Thailand Materials Science and Technology Conference. Bangkok. August 10-11, 2004.
8. Premvaranon P., Soepram V., Intarakumthornchai T., Sucharitpwatskul S., Limtrakarn W. and Dechaumphai P. 2004. Case Study on Hopper Silo's Structural Analysis. The 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering. Nakorn Ratchasima. July 21-23, 2004.
9. Sucharitpwatskul S., Kathong M. and Dechaumphai P. 2004. The 3D-Potential Flow Analysis for Ship's Pressure Signatures by Finite Element Method. The 40th Anniversary Engineering Department Khon Kaen University Conference. Khon Kaen. January 23-25, 2004.
10. Aukkaravittayapun S., Sucharitpwatskul S. and Limtrakarn W. 2004. A Simple Small Wet Scrubber for Laboratory. The 40th Anniversary Engineering Department Khon Kaen University Conference. Khon Kaen. January 23-25, 2004.
11. Intarakumthornchai T., Sucharitpwatskul S., Pratumwal Y., Limtrakarn W. and Dechaumphai P. 2004. The Behavior Predicted of Deep Drawing Process for a Cup by Comparing Axisymmetric to Plate Element. The 1st Metal Forming Technology Conference. Bangkok. January 8, 2004.

ผู้ร่วมโครงการวิจัยคนที่ 4

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาววรรณ เลาวกุล
(ภาษาอังกฤษ) Ms. Wanna Laowagul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: นักวิชาการสิ่งแวดล้อมชำนาญการ
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เทคโนธานี ต.คลอง 5 อ.คลองหลวง ปทุมธานี 12120
โทรศัพท์ 02-577-4182 ต่อ 1305, 1303 โทรสาร 02-577-1138 e-mail: w_laowagul2000@yahoo.com
4. ประวัติการศึกษา
2529 วท.บ. (เคมี) ม.เชียงใหม่
2545 วท.ม. (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม) ม.มหิดล
2552 Ph.D. (Environmental Engineering) Kyoritsu Women's University
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Air pollution, Volatile organic compounds, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย
 1. Emission Factor of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Heavy Oil Burning Industry in Thailand
 2. Investigation of PAHs in Ambient Air in Industrial and Urban Area
 3. การศึกษาสารมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล: กรณีศึกษาการใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิง
 4. การศึกษาสถานการณ์สารอินทรีย์ระเหยในบรรยากาศเขตกรุงเทพมหานคร
 5. การศึกษาความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชนอันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ระเหยจากการจราจร
 6. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินระดับความปลอดภัยของประชาชนต่อการได้รับสารอินทรีย์ระเหย
 7. การประยุกต์ใช้รีเซพเตอร์โมเดลเพื่อวิเคราะห์แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยในบรรยากาศในเขตเมือง
 8. Capacity Building for Environmental Research in Thailand โดยเน้นการศึกษาวิจัยสารอินทรีย์ระเหยในบรรยากาศ
 9. โครงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการแพร่กระจายของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในเขตร้อน

6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. Boonyathumanondh R., Watanabe S., Laowagul W., Tabucanon M.S. 1995. Development of a Quantification Methodology for Polychlorinated Biphenyls by using Kanechlor Products as the Secondary Reference Standard, Fresenius J. Anal Chem. 352: 261-267.
2. Watanabe S., Laowagul W., Boonyathumanondh R., Tabucanon M.S. and Ohgaki S. 1996. Concentrations and Composition of PCB Congeners in the Air around Stored Used Capacitors Containing PCB Insulator Oil in a Suburb of Bangkok, Thailand. Environmental Pollution. 92(3): 289-297.
3. Garivait H., Laowagul W., Ngodngam S., Sakata M. and Kume K. 1995. Determination of Hydrocarbon Composition in Exhaust Gas from 4-Stroke Gasoline Engine. Proceedings of the Seminar on the Role of ERTC in the Environmental Quality Development. pp.116-157.
4. Kawaraya T., Garivait H., Laowagul W., Sukasem P., Tabucanon M.S., Sakata M. and Okuno T. 1997. Exhaust Gases from New Gasoline Vehicles in Thailand. SEIKATSU EISEI Journal of Urban Living and Health Association. 41(3): 93-96.
5. วรรณเลาวัล, ผกา สุขเกษม สุนทร, จดงาม มณฑิพย์, ศรีรัตน ทาบุญกานอน. 2543. การศึกษาปริมาณสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศในเขตอุตสาหกรรมและเขตเมือง. รายงานผลงานวิจัย พ.ศ.2537-2543.
6. วรรณเลาวัล, นิตยา นักระนาด มิลน์, สุนทร จดงาม, ผกา สุขเกษม. 2543. โครงการศึกษามลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล กรณีศึกษาการใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิง. รายงานผลงานวิจัย พ.ศ. 2537-2543.
7. Garivait H., Laowagul W., Sukasem P., Ngodngam S., Polprasert C. and Reutergardh L.B. 2002. Airborne Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) in Bangkok Urban Air: I. Characterization and Quantification. Technical Report 1994-2000. Environmental Research and Training Center. pp. K45-K56.
8. Garivait H., Laowagul W., Sukasem P., Ngodngam S., Polprasert C. and Reutergardh L.B. 2002. Airborne Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) in Bangkok Urban Air: II. Level and Distribution. Technical Report 1994-2000. Environmental Research and Training Center. pp. K57-K73.

9. Laowagul W., Sukasem P., Morknoy D., Pongprayoon P. and Sukornmuang J. 2003. Study on VOCs Status in Ambient Air in Bangkok. 2nd National Environmental Conference. pp. 207-214.
10. Hooper M., Panther B., Laowagul W., Tippayasak K., Limpaseni W. and Hooper B. 2003. Passive Air Sampler Monitoring Technology: Value and Applications based on Case Studies Covering Outdoor, Indoor and Personal Sampling. Proceedings of the 2nd Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment.
11. Laowagul W., Mutchimwong A., Thavipoke P. and Hooper M.A. 2003. Development of Diffusive Sampler for Volatile Organic Compounds in Ambient Air. The Ninth International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere. pp.15-25.
12. วรรณา เลาวกุล, ศิริพงษ์ สุขทวี, หทัยรัตน์ การ์ิเวทย์, สุภนุช รสจันทร์, สุธีระ บุญญาพิทักษ์ และนิรัน เปี่ยมไย. 2550. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งกำเนิดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย. รายงานผลงานวิจัย ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม ปี 2549-2550. หน้า 7-13
13. Laowagul W., Garivait H., Limpaseni W. and Yoshizumi K. 2008. Ambient air concentrations of benzene, toluene, ethylbenzene, xylene in Bangkok, Thailand during April-August in 2007. Asian Journal of Atmospheric Environment. 2(1): 14-25.
14. Laowagul W. and Yoshizumi K. 2008. Characterization of benzene, toluene, ethylbenzene, xylene concentrations in the ambient atmosphere of Tokyo, Japan. Journal of Urban Living and Health Association. 52(5): 290-299.
15. Laowagul W., Yoshizumi K., Mutchimwong A., Thavipoke P., Hooper M., Garivait H., and Limpaseni W. 2009. Characterisation of ambient benzene, toluene, ethylbenzene and *m*-, *p*- and *o*-xylene in an urban traffic area in Bangkok, Thailand. International Journal of Environment and Pollution. 36: 241-254.
16. Laowagul W. and Yoshizumi K. 2009. Behavior of benzene and 1,3-butadiene concentrations in the urban atmosphere of Tokyo, Japan. Atmospheric Environment 43(12): 2052-2059.

ผู้ร่วมโครงการวิจัยคนที่ 5

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวชุลีวัลย์ ชาญศิริรินทร์
(ภาษาอังกฤษ) Ms. Chuleewan Thunyasirinon
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: นักศึกษาปริญญาเอก
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (นานาชาติ) สาขาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง
ขอนแก่น 40002 โทรศัพท์ 089-573-6136 e-mail: airairr@hotmail.com
4. ประวัติการศึกษา:
2548 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2550 สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต (อนามัยสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
มลพิษในอากาศ, จุลินทรีย์ในอากาศ, อนามัยสิ่งแวดล้อม
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: -
 - 6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่เสร็จแล้ว:
 1. ยุพรัตน์ หลิมมงคล, ชุลีวัลย์ ชาญศิริรินทร์, รจฤดี โชติกาวิรินทร์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. 2555. การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศของเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการทำงานต่างกัน. วารสารวิจัย มข. 17(2): 236-244.
 2. ชุลีวัลย์ ชาญศิริรินทร์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ภารดี ช่วยบำรุง. 2554. การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศด้วยหลอดไฟเคลือบนาโนไทเทเนียม. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 34(3): 110-119.
 3. ชุลีวัลย์ ชาญศิริรินทร์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภารดี ช่วยบำรุง. 2550. การเปรียบเทียบเครื่องมือเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศระหว่าง Andersen Impactor ชนิด 6 ชั้นและชนิดชั้นเดียว (N_6). วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 7(3): 107-117.
 4. ภารดี ช่วยบำรุง, ชุลีวัลย์ ชาญศิริรินทร์, รจฤดี โชติกาวิรินทร์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์. 2551. ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศด้วย Andersen Impactor แบบต่างๆ. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 22(1): 139-151.

ผู้ร่วมโครงการวิจัยคนที่ 6

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวกฤษณียา สังขจันทรานนท์
(ภาษาอังกฤษ) Ms. Krisaneeeya Sungkajuntranon
2. ตำแหน่งปัจจุบัน: ครู คศ.1
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
วิทยาลัยชุมชนบุรีรัมย์ ตำบลบัวทอง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000
โทรศัพท์ : 044- 615128 โทรสาร: 044-615129 e-mail: aeaey04@hotmail.com
4. ประวัติการศึกษา:
2541 – 2545 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (อนามัยสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
2545 – 2548 สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต (อนามัยสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2553 – ปัจจุบัน นักศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ชีวเวชศาสตร์) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
จุลินทรีย์ในอากาศ, อนามัยสิ่งแวดล้อม
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย
โครงการแหล่งท่องเที่ยวธรรมชาติแบบผจญภัยในอีสานใต้ (ทุน สกว.)
 - 6.2 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว
กฤษณียา สังขจันทรานนท์, เนติณี ไชยเอีย, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, ภาณี ช่วยบำรุง. 2549. ชนิดและปริมาณของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ก่อโรคในโรงพยาบาลและการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือการเก็บตัวอย่างจุลินทรีย์ในอากาศ. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 29(4): 113-124.