



# สารยึดติดที่เหมาะสมกับการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สำหรับกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

## Appropriate binder for titanium dioxide coating onto fluorescent lamps for microorganism removal from the air

สีหราช ลากเกิน<sup>1</sup>, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ<sup>2</sup>, ภารดี ช่วยบำรุง<sup>3\*</sup>

Seehararch Larpkern<sup>1</sup>, Sitthisuntorn Supothina<sup>2</sup>, Paradee Chuaybamroong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>2</sup> นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

\*Correspondent author: paradee@tu.ac.th

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติดชนิดต่างๆ 3 ชนิด ได้แก่ polyethylene glycol น้ำหนักโมเลกุล 1,000 (PEG-1000) หรือ polyvinyl alcohol (PVA) หรือ Silane-69 ในอัตราส่วน 1% เปรียบเทียบกับ 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ (5% Degussa P25) พ่นสเปรย์ลงบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ชุดละ 3 หลอด นำไปติดในห้องจำลอง ขนาด 2 x 2 x 2 เมตร<sup>3</sup> เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ที่พ่นเข้าไปในห้องจำลองอย่างต่อเนื่องนาน 2 ชั่วโมง ในชั่วโมงแรกเป็นการศึกษาจำนวน *E. coli* ขณะที่ยังไม่มี การเปิดหลอดไฟ เปรียบเทียบกับจำนวน *E. coli* ในชั่วโมงที่สองซึ่งเปิดหลอดไฟ โดยเก็บตัวอย่าง *E. coli* ในอากาศ ด้วย impactor ที่ระดับความสูง 1.5 เมตร ทุกๆ 10 นาที นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับหลอดไฟที่ไม่เคลือบ และหลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยึดติดที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งหมดศึกษาอย่างละ 3 ชั่วโมง

ผลการศึกษาเมื่อใช้หลอดไฟที่ไม่เคลือบ พบว่า *E. coli* ในห้องลดลงเฉลี่ย 29% ส่วนหลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยึดติด พบว่า *E. coli* ลดลง 23-33% (ขึ้นกับชนิดของสารยึดติดที่ใช้) แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3% PEG-1000 พบ *E. coli* ลดลงสูงสุด 84% รองลงมาได้แก่การใช้ 3% PVA และ 1% PVA ที่ลด *E. coli* ได้ 71% และ 69% ตามลำดับ ขณะที่การเคลือบหลอดไฟด้วย 1% PEG-1000 สามารถลด *E. coli* ได้ 63% ส่วน 1% Silane-69 และ 3% Silane-69 มีประสิทธิภาพในการลด *E. coli* ได้ต่ำที่สุด คือ 57% และ 53% ตามลำดับ

### Abstract

In this study, titanium dioxide was mixed with binder which was polyethylene glycol molecular weight of 1,000 (PEG-1000) or polyvinyl alcohol (PVA) or Silane-69 in a concentration of 1% compared to 3% by weight of titanium dioxide (5% Degussa P25) and spray-coated onto fluorescent lamps. Each set of coated lamps (set of

3) was mounted in a 2 x 2 x 2 m<sup>3</sup> chamber to study *Escherichia coli* removal capability. Bacteria were injected continuously into the chamber for 2 hours. In the first hour, *E. coli* concentration was sampled every ten minutes by using an impactor at the height of 1.5 m when the coated lamps were not turned on yet. In the second hour, the coated lamps were turned on and the sampling was continued in the same manner for a comparison. Also a comparison was made with the uncoated lamps and the binder coated (without titanium dioxide) lamps. All sets were repeated three times.

Results revealed that when using the uncoated lamps, *E. coli* was removed 29%. When using only-binder-coating lamps, *E. coli* were removed 23-33% (depending on the type of binder). However, when the titanium dioxide plus 3%PEG coated lamps were replaced, the *E. coli* removal was the highest as 84%. With the binders of 3% PVA and 1%PVA, the *E. coli* removals were 71% and 69%, respectively, while 1%PEG showed the efficacy of 63%. However, the least efficacy was found from Silane-69, which 1% Silane-69 could remove 57% and 3% Silane-69 could remove 53%.

**คำสำคัญ :** โฟโตคะตะไลซิส, หลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์, อี โคไล, การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

**Keywords :** Photocatalysis, TiO<sub>2</sub> coated lamp, *E. coli*, microorganism removal from the air

## 1. บทนำ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นที่นิยมใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ปนเปื้อนทั้งในอากาศและในน้ำอย่างแพร่หลาย เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานจากแสงอย่างพอเพียง พลังงานนั้นสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ปกติจะอยู่แต่เฉพาะในชั้นพลังงานวาเลนซ์ ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานคอนดักชันได้และทำให้เกิดเป็นรูว่างอยู่ในชั้นพลังงานเดิม โดยรูว่างนี้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ (หรือไอน้ำ) เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานที่สูงกว่าก็สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ได้เช่นกัน โดยอนุมูลอิสระทั้งคู่มีความสามารถในการทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์และสลายสารอินทรีย์ได้ (1) ในปัจจุบันจึงมีผู้นิยมเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนตัวกลางต่างๆ สำหรับกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น เคลือบลงบนแก้วไฟร์กซ์ (2) บนแผ่นเมมเบรน (3) บนเส้นใยแก้วผสมซิลิกา (4) หรือบนกระจกสไลด์ (5) ฯลฯ ซึ่งวิธีการของการเคลือบที่ต่างกันก็แตกต่างกันไปทั้งในรูปของการจุ่มเคลือบในสารแขวนลอยของผงสำเร็จรูป หรือวิธี sol-gel

หรือวิธี chemical vapor deposition หรือใช้ ultrasonic nebulization เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม หัวใจสำคัญของ การเคลือบไม่ว่าจะใช้วิธีใดล้วนอยู่ที่การติดแน่นไม่หลุด ล่อนของไทเทเนียมไดออกไซด์และไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพจากกระบวนการเคลือบนั้นๆ (6)

วิธีการหนึ่งซึ่งช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ติดแน่นอยู่กับตัวกลางคือการเติมสารยึดติด (binder) ซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิดด้วยกัน เช่น polyethylene glycol (PEG), ethylene glycol (EG), polyvinyl alcohol (PVA), silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>), acetylacetone, bis(3-triethoxy silyl) propyl tetrasulfide (ชื่อการค้า Silane-69) ฯลฯ โดยแม้ว่าจะ เป็นสารยึดติดชนิดเดียวกัน แต่สัดส่วนที่เข้าร่วมถึงน้ำ หนักโมเลกุลที่ใช้ต่างกัน ย่อมให้ผลที่แตกต่างกันจนไม่สามารถสรุปถึงวิธีที่เหมาะสม หรือนำวิธีการที่เหมาะสม กับตัวกลางชนิดใดชนิดหนึ่งแล้วนำมาใช้กับตัวกลางอีก ชนิดหนึ่งได้ โดยในการศึกษานี้ต้องการเคลือบไทเทเนียม ไดออกไซด์ลงบนหลอดไฟลูออเรสเซนต์เพื่อให้เกิด ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ใน อากาศแต่เนื่องจากยังไม่เคยมีการศึกษากับตัวกลางชนิด นี้มาก่อน จึงไม่สามารถสืบค้นได้ว่าสารยึดติดชนิดใดที่ เหมาะต่อการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนหลอดไฟ

ซึ่งการศึกษาที่ใกล้เคียงกันมาจาก Nimittrakoolchai and Supothina (7) ที่ใช้ Silane-69 ผสมลงไปไนโทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนฝ้าม่านเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับกำจัดแบคทีเรีย โดย Silane-69 ทำหน้าที่ช่วยให้โทเทเนียมไดออกไซด์เกาะติดอยู่กับฝ้าม่านได้ดียิ่งขึ้น และการศึกษาของ Bu และคณะ (8) ที่ใช้ PEG น้ำหนักโมเลกุล 1000 (PEG-1000) ช่วยในการสร้างรูพรุนที่มีขนาดเท่าๆกันและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นฟิล์มโทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี sol-gel สำหรับเคลือบบนแผ่นกระจกใส โดยหากไม่มีการเติม PEG-1000 แผ่นฟิล์มที่ได้จะไม่รูพรุนเกิดขึ้นเลย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Guin และคณะ (9) ที่ศึกษาการเติมเงินลงไปไนโทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด *Escherichia coli* และ *Bacillus subtilis* ในน้ำ โดยผู้วิจัยใช้ PVA ช่วยในการสร้างความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของเงินบนอนุภาคโทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งกรณีที่ไม่มี PVA เงินนั้นจะเกาะตัวกันเป็นกระจุก หรือเป็นกลุ่มก้อนมากกว่า ในที่นี้ คณะผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาสารยึดติดที่เป็นที่นิยมกันโดยทั่วไป 3 ชนิด คือ PEG น้ำหนักโมเลกุล 1000 (PEG-1000), PVA และ Silane-69 ในความเข้มข้น 1% เปรียบเทียบกับ 3% โดยน้ำหนักของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ (การศึกษานี้กำหนดปริมาณโทเทเนียมไดออกไซด์คงที่ 5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) สำหรับเคลือบบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เพื่อใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ ผลการศึกษาที่ได้น่าจะเป็นประโยชน์กับการศึกษาวิจัยในลักษณะเดียวกันต่อไป

## 2. วิธีการวิจัย

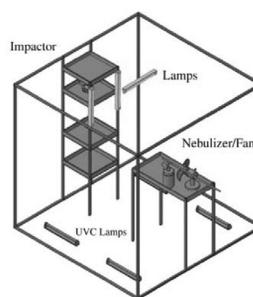
### 2.1 การเคลือบหลอดไฟ

การเคลือบหลอดไฟเริ่มต้นจากการละลายสารยึดติดแต่ละชนิดปริมาณ 0.2 กรัม (สำหรับอัตราส่วน 1% โดยน้ำหนักของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้) หรือ 0.6 กรัม (สำหรับ 3% โดยน้ำหนักของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้) โดยใช้เมทานอล 10 มิลลิลิตรผสมกับน้ำกลั่นปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร เมื่อละลายดีแล้วจึงปรับปริมาตรเป็น 400 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน และกวนด้วย

เครื่องกวนแม่เหล็กต่ออีก 10 นาที ก่อนเติมโทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 20 กรัม และกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบรรจุในเครื่องพ่นสีสเปรย์ระบบ HVLP (Fuji spray, Q3) โดยใช้หัวพ่น (Aircap ชนิด 3H) พ่นลงบนผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (Sylvania, F18WT8/154 18 วัตต์) จำนวน 3 หลอด/ชนิดสารยึดติด ผึ่งให้แห้ง และพ่นซ้ำใหม่-ผึ่งให้แห้ง รวมทั้งหมด 4 รอบ แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °ซ นาน 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบการกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศต่อไป

### 2.2 การกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ

การศึกษากำจัดจุลินทรีย์ในอากาศกระทำในห้องจำลองขนาด 2x2x2 เมตร<sup>3</sup> (รูปที่ 1) จุลินทรีย์ที่ใช้คือ *E. coli* (ATCC 25422) ซึ่งเตรียมโดยนำ stock มาบ่มในอาหารเหลวปริมาตร 10 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 37 °ซ นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเชื้อมาเกลี่ยเพาะกระจายบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ Trytic soy agar และบ่มต่อที่อุณหภูมิ 37 °ซ อีก 24 ชั่วโมง จึงเชื้อโคโลนีของ *E. coli* มาผสมกับ 0.85% NaCl ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ให้เชื้อมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง  $10^9$ - $10^{10}$  โคโลนี/มิลลิลิตร (วัดจากความขุ่นของสารละลาย McFarland) จากนั้นนำเชื้อจุลินทรีย์ 4 มิลลิลิตร มาผสมกับน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 100 มิลลิลิตร บรรจุในขวด nebulizer (BGI, model MRE-CN25) เพื่อใช้พ่นเข้าไปในห้องจำลอง

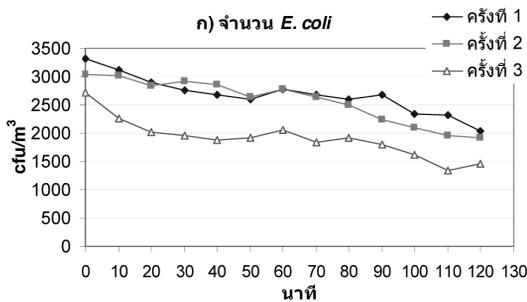


รูปที่ 1. Chamber ทดลอง

ภายในห้องจำลอง มีการติดหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เพดานห้อง 1 หลอด และข้างๆ ชั้นเก็บตัวอย่างข้างละ 1 หลอด รวม 3 หลอด ก่อนการทดลองมีการฆ่าเชื้อภายในห้องด้วยการพ่น glutaraldehyde พร้อมเปิดหลอดไฟ UV-C ที่วางไว้ทั่วบริเวณห้อง 2-3 ชั่วโมง ก่อน

(และหลัง) การทดลองทุกครั้ง จากนั้นจึงเริ่มพ่น *E. coli* เข้าไปในห้องจำลองโดยใช้ nebulizer เป็นเวลา 20 นาที ระหว่างนี้มีการเปิดพัดลมขนาดเล็กลงในห้อง เพื่อให้จุลินทรีย์กระจายตัวไปทั่วไม่กระจุกตัวอยู่ที่บริเวณใด บริเวณหนึ่ง เมื่อครบ 20 นาทีแล้วจึงเริ่มเก็บตัวอย่าง *E. coli* ในอากาศที่ระดับความสูง 1.5 เมตร โดยใช้ impactor (SKC, model standard Biostage) ซึ่งภายในบรรจุอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic soy agar เอาไว้ จุลินทรีย์ภายในห้องถูกดูดให้เข้าสู่ impactor ด้วยการใช้ปั๊มดูดอากาศในอัตรา 28.3 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 30 วินาที โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที ในช่วงแรกทำการเก็บตัวอย่างขณะที่ยังไม่มีการเปิดไฟ เพื่อบันทึกเป็นจำนวน *E. coli* ตั้งต้น จากนั้นจึงเริ่มเปิดไฟในช่วงที่สอง และทำการเก็บตัวอย่าง *E. coli* ทุกๆ 10 นาทีในลักษณะเดิมไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ในระหว่างนี้มีการพ่นเชื้อ *E. coli* อย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา รวม 2 ชั่วโมง

ชุดหลอดไฟที่ใช้ประกอบด้วยหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ไม่มีการเคลือบสารใดๆ หลอดไฟที่เคลือบด้วยสารยึดคิดแต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดคิดชนิด PEG-1000, PVA และ Silane-69



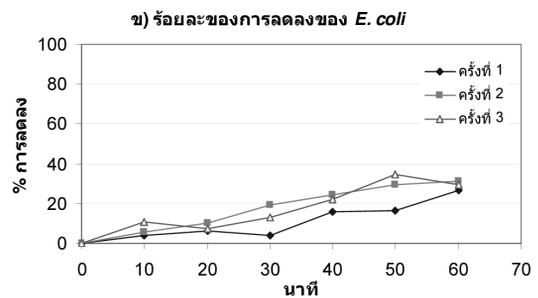
รูปที่ 2. การลดลงของ *E. coli* เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ไม่ได้เคลือบ

จากรูปที่ 2 พบว่า *E. coli* ภายในห้องจำลองลดจำนวนลงไปเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไปไม่ว่าจะปิดไฟ (นาทีที่ 0-60) หรือเปิดไฟ (นาทีที่ 61-120) แม้ว่าจะมีการพ่นจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาก็ตาม แสดงว่าจุลินทรีย์ในอากาศมีการตกตัวตามธรรมชาติหรือมีอัตรา

ในความเข้มข้น 1% และ 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ละชุดทำการศึกษา 3 ชั่วโมงอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการเก็บตัวอย่างแล้วนำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 24 ชั่วโมง และนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏจำนวนที่รายงานเป็นจำนวนที่ปรับแก้ด้วยค่า correction factor ตามวิธีของ Macher and Burge (10) แล้ว เนื่องจากอาจมีจุลินทรีย์ตกข้างลงในรูของ impactor รูเดิม แต่ไม่ได้ถูกนับจำนวน ก่อนจะหารด้วยปริมาตรอากาศที่ดูดเข้าเครื่องมือ impactor กลายเป็น cfu (colony forming unit)/m<sup>3</sup> ซึ่งการลดลงของ *E. coli* ในการศึกษานี้ ใช้การเปรียบเทียบจำนวนที่พบในนาทีที่ 60 ก่อนเปิดไฟ (ยังไม่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้น) กับจำนวนที่พบในนาทีต่างๆหลังเปิดไฟแล้ว (มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส) โดยการศึกษากระทำในช่วงเดือนเมษายน 2555 อุณหภูมิภายในห้องจำลองอยู่ในช่วง 30.9-35.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50-65%

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

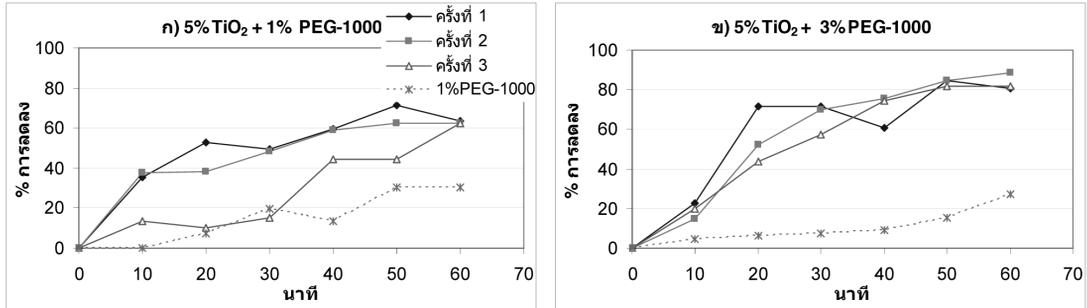
การกำจัด *E. coli* ในอากาศจากการใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ธรรมดาที่ไม่ได้เคลือบสารใดๆจำนวน 3 หลอด จากการศึกษานี้ 3 ชั่วโมงสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 2



การตาย (decay rate) ที่คงที่ ซึ่งการศึกษาทั้ง 3 ชั่วโมงให้ผลที่สอดคล้องกันทั้งหมด โดยเมื่อครบ 120 นาที การลดลงสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 29% และเมื่อเปลี่ยนหลอดไฟเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม PEG-1000 ในอัตราส่วน 1% และ 3% ผลการศึกษาแสดง

ได้ดังรูปที่ 3 โดยในรูปเสนอเป็นร้อยละของการกำจัด (เกิดการลดลงของ *E. coli* จากจำนวนที่พบในนาที่ที่ 60) เนื่องจากจำนวนจุลินทรีย์ที่พบนในแต่ละครั้งนั้นค่อนข้างแตกต่างกันมาก จึงยากที่จะนำเสนอได้อย่างชัดเจนภายในสเกลเดียวกันได้ โดยในรูปมีการเปรียบเทียบกับ การลดลง

ของ *E. coli* จากหลอดไฟที่เคลือบด้วยสารยึดติด PEG-1000 แต่เพียงอย่างเดียว (ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์) ในอัตราส่วน 1% (รูปที่ 3ก เส้นประ) และ 3% (รูปที่ 3ข เส้นประ) ด้วย

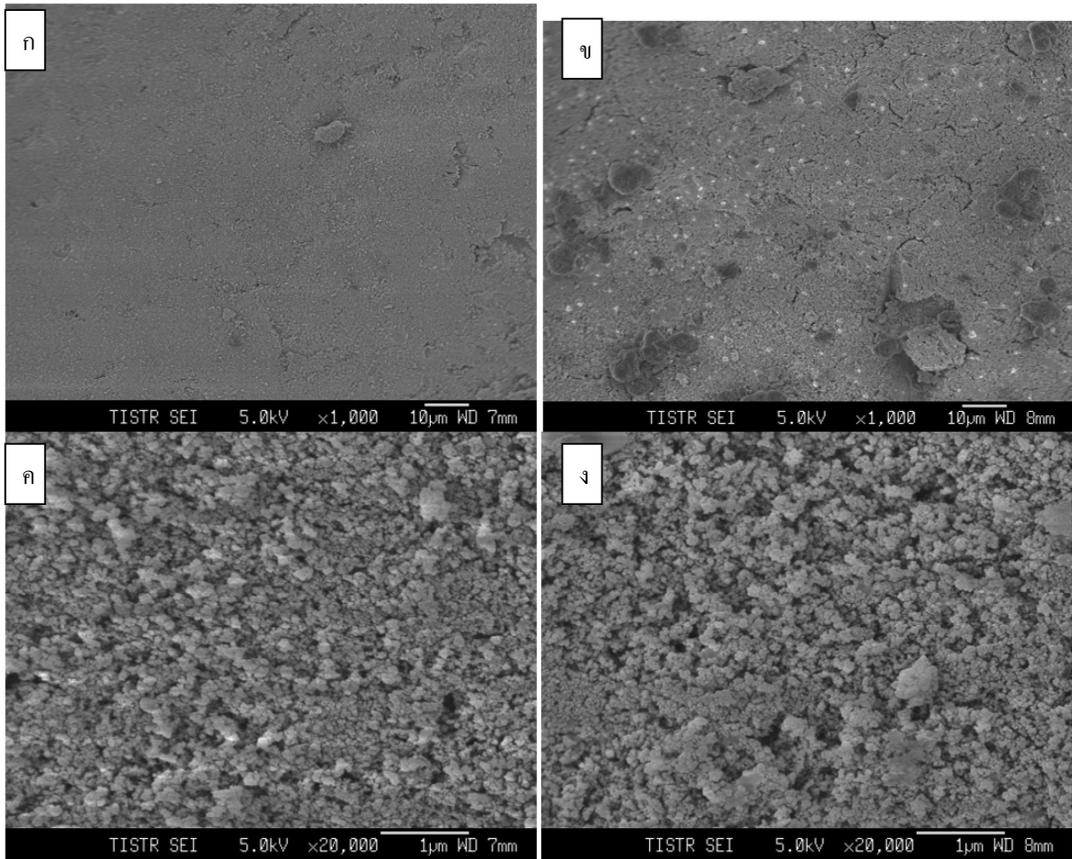


รูปที่ 3. การลดลงของ *E. coli* เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5%TiO<sub>2</sub> ผสม ก) 1% PEG-1000 ข) 3% PEG-1000

หมายเหตุ เส้นประคือการใช้หลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยึดติด (ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์)

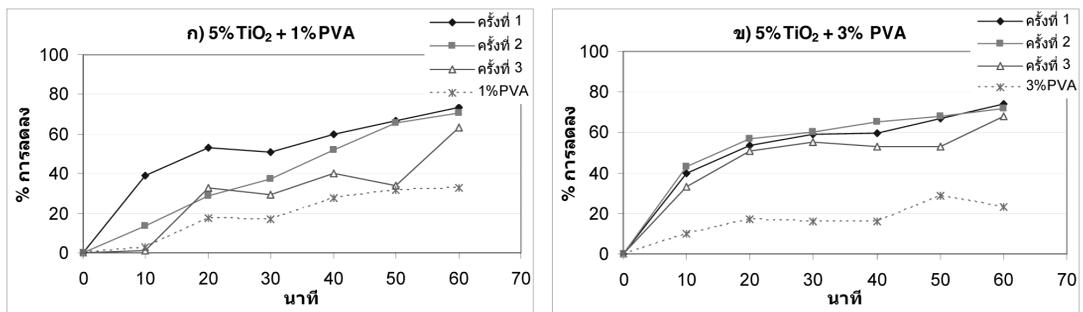
จากรูปที่ 3 เห็นได้ว่าการเคลือบหลอดไฟด้วย 5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 1% หรือ 3% PEG-1000 สามารถลด *E. coli* ใน chamber ได้เหนือกว่าการใช้หลอดไฟที่มีเฉพาะสารยึดติดแต่เพียงอย่างเดียว (1% PEG-1000) อย่างชัดเจน แสดงว่าการลดลงที่ปรากฏเป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ไม่ใช่มาจากการเกาะติด (adsorption) ของจุลินทรีย์กับสารยึดติดที่เคลือบอยู่บนหลอดไฟแต่อย่างใด โดยการลดลงของ *E. coli* ที่พบอยู่บ้างเมื่อใช้หลอดไฟเคลือบสารยึดติดเพียงอย่างเดียว น่าจะมาจากอัตราการตายตามธรรมชาติซึ่งคล้ายกับที่ปรากฏในรูปที่ 2 มากกว่า โดย 5% TiO<sub>2</sub> + 1% PEG-1000 ลด *E. coli* ได้เฉลี่ย 63% เมื่อครบ 1 ชั่วโมงที่เปิดไฟ ขณะที่ 5% TiO<sub>2</sub> + 3% PEG-1000 ลดได้มากกว่า คือ เฉลี่ย 84% ทั้งนี้สารยึดติด PEG เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ของเอทิลีนไดออกไซด์ มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงที่มีสาขา (HO-CH<sub>2</sub>-[CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>]<sub>n</sub>-CH<sub>2</sub>-OH) ขอบน้ำสูง ละลายน้ำได้มีความ

เป็นพิษต่ำ ซึ่งที่น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 600 สารละลายมีลักษณะใส แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น สารละลายจะเริ่มขุ่นขึ้นคล้ายเวกซ์ซีฟิ่ง (11) จากการศึกษาลักษณะการเคลือบ PEG-1000 ในอัตราส่วน 3% น่าจะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ติดแน่นอยู่บนหลอดไฟมากกว่าในอัตราส่วน 1% เนื่องจากการศึกษา 3 ชั่วโมงที่นำมาจากการใช้หลอดไฟเคลือบชุดเดิม แต่ทำการศึกษาในห้องจำลองซ้ำใหม่ ต่างวันและเวลากันไป จึงเป็นไปได้ว่า การศึกษาในครั้งที่ 3 (รูปที่ 3 ก) อาจมีการหลุดลอกของไทเทเนียมไดออกไซด์ในระหว่างการหยิบจับเพื่อประกอบเข้าร่างของหลอดไฟ แต่กรณีของ 3% PEG-1000 (รูปที่ 3 ข) ผลการศึกษาสอดคล้องกันทั้ง 3 ครั้งมากกว่า ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง scanning electron microscope (SEM) พบว่าการเคลือบด้วย 1% PEG-1000 มีการเกาะติดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บางกว่า 3% PEG-1000 ด้วยเช่นกัน (รูปที่ 4)



รูปที่ 4. พื้นผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5%TiO<sub>2</sub> ผสม ก) 1% PEG-1000 (กำลังขยาย 1000 เท่า) ข) 3%PEG-1000 (กำลังขยาย 1000 เท่า) ค) 1% PEG-1000 (กำลังขยาย 20000 เท่า) ง) 3%PEG-1000 (กำลังขยาย 20000 เท่า)

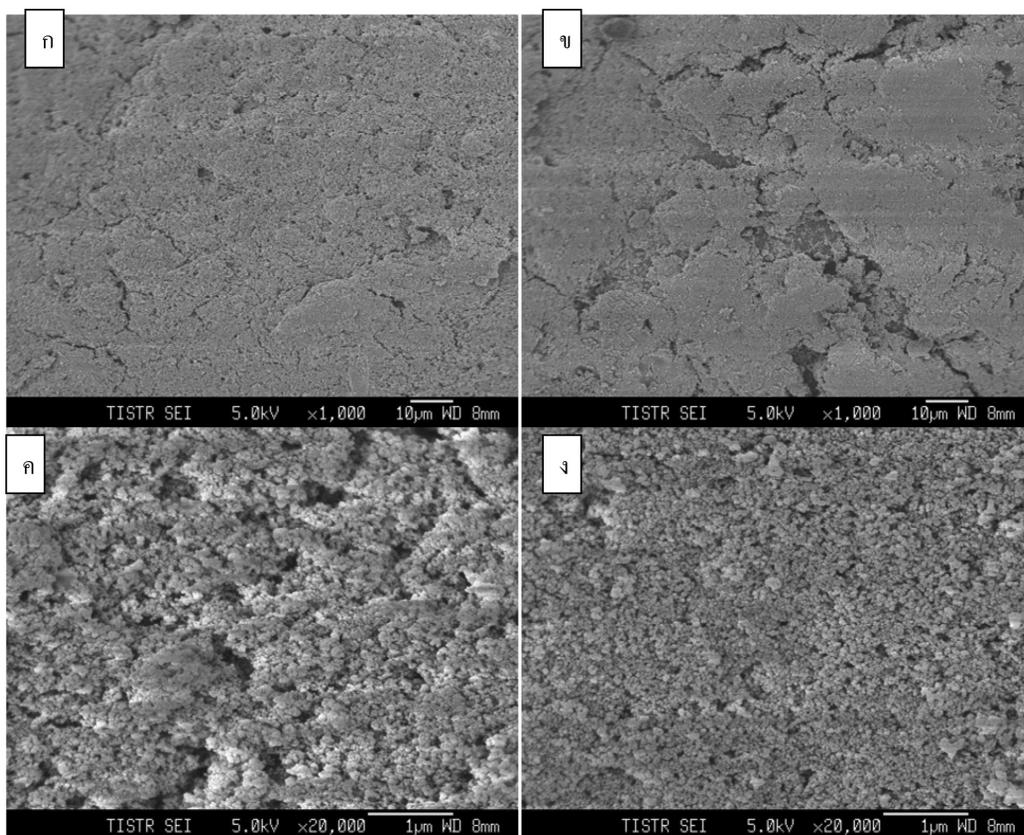
ลำดับต่อไปเป็นการทดสอบการใช้สารยัดคิชนิด PVA ในอัตราส่วน 1% เปรียบเทียบกับ 3% ผลของการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5. การลดลงของ *E. coli* เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5%TiO<sub>2</sub> ผสม ก) 1% PVA, ข) 3%PVA หมายถึง เส้นประคือการใช้หลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยัดคิ (ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์)

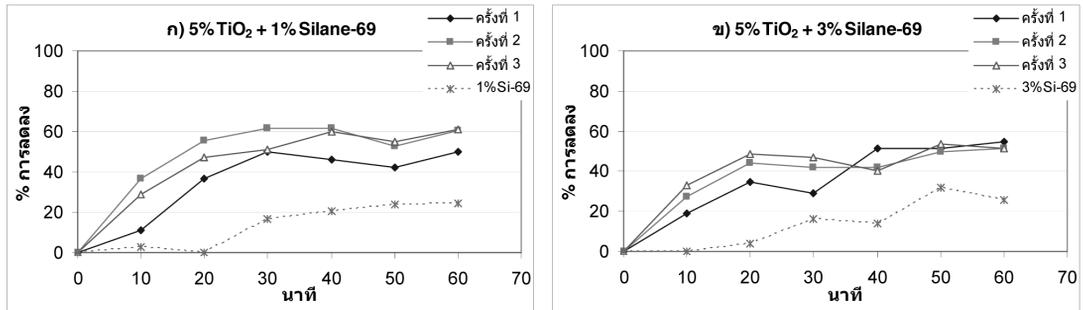
เมื่อใช้สารยึดติด 1% PVA พบว่าการลดลงของ *E. coli* เฉลี่ย 69% เมื่อครบ 60 นาที ส่วนการใช้ 3% PVA ยังคงพบการลดลงที่มากกว่าเล็กน้อย คือ เฉลี่ย 71% โดย PVA เป็นโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการไฮโดรไลติสของ polyvinyl acetate มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงที่มีสาขา  $(C_2H_4O)_x$  ไม่มีความเป็นพิษ ไม่มีกลิ่น การมีพันธะเดี่ยวของคาร์บอนภายในโครงสร้างทำให้ PVA เป็นสารยึดติดที่มีความยืดหยุ่นสูง และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH)

ทำให้ PVA สามารถละลายน้ำและดึงดูดอนุภาคออกไซด์ให้มายึดเกาะได้อีกด้วย (11) อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังคงพบความแปรปรวนในการศึกษา 3 ซ้ำ จากการใช้ 1% PVA (รูปที่ 5ก) มากกว่าการใช้ 3% PVA (รูปที่ 5ข) ซึ่งจากภาพถ่าย SEM พบว่า การใช้สารยึดติด 1% PVA มีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์สม่ำเสมอ น้อยกว่าการเคลือบด้วย 3% PVA เช่นกัน (รูปที่ 6)



รูปที่ 6. พื้นผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5%TiO<sub>2</sub> ผสม ก) 1% PVA (กำลังขยาย 1000 เท่า) ข) 3%PVA (กำลังขยาย 1000 เท่า) ค) 1% PVA (กำลังขยาย 20000 เท่า) ง) 3%PVA (กำลังขยาย 20000 เท่า)

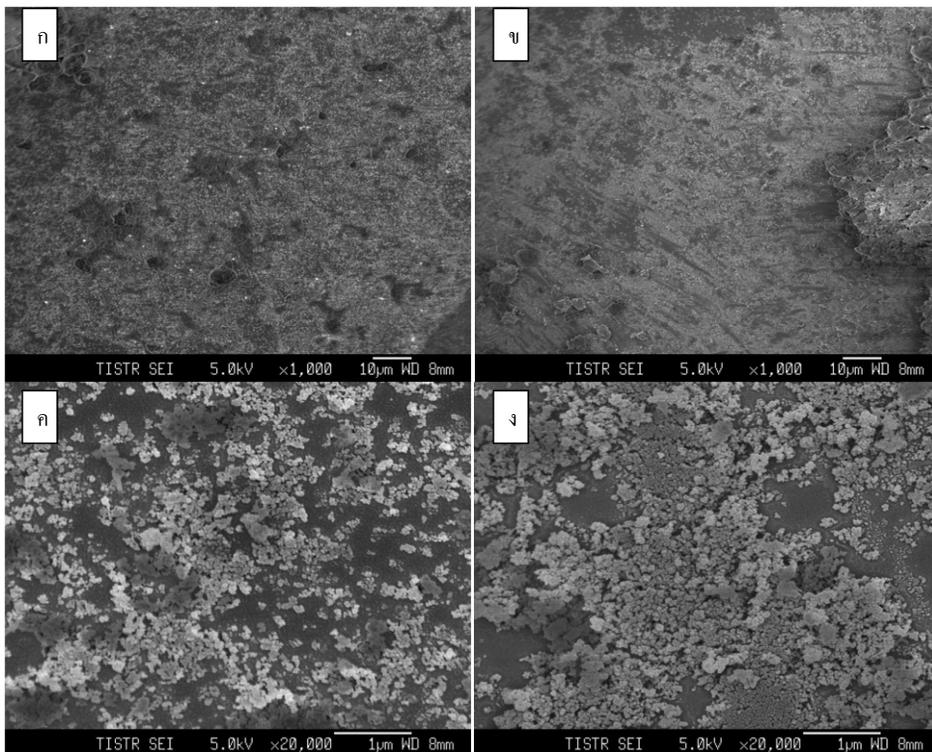
ลำดับสุดท้าย เป็นการศึกษาการใช้สารยึดติดชนิด silane-69 เปรียบเทียบระหว่าง 1% กับ 3% ผลการศึกษาได้แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7. การลดลงของ *E. coli* เมื่อใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5%TiO<sub>2</sub> ผสม ก) 1% Silane-69 ข) 3% Silane-69  
หมายเหตุ เส้นประคือการใส่หลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยัดติด (ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์)

กรณีของการใช้ silane-69 พบว่า การลดลงของ *E. coli* นั้นใกล้เคียงกันระหว่าง 1% กับ 3% โดย 1% silane-69 ลดจุลินทรีย์ได้เฉลี่ย 57% เมื่อครบ 60 นาทีที่เปิดหลอดไฟ ส่วน 3% silane-69 ลดจุลินทรีย์ได้เฉลี่ย 53% โดยความแปรปรวนระหว่างการศึกษา 3 ซ้ำ ของการเคลือบด้วย 1% silane-69 มีน้อยลง หากเทียบกับ 1% PEG-1000 และ 1% PVA โดยเมื่อดูจากภาพถ่าย SEM (รูปที่ 8) พบว่า ไม่ว่าจะ 1% หรือ 3% silane-69 ไทเทเนียม

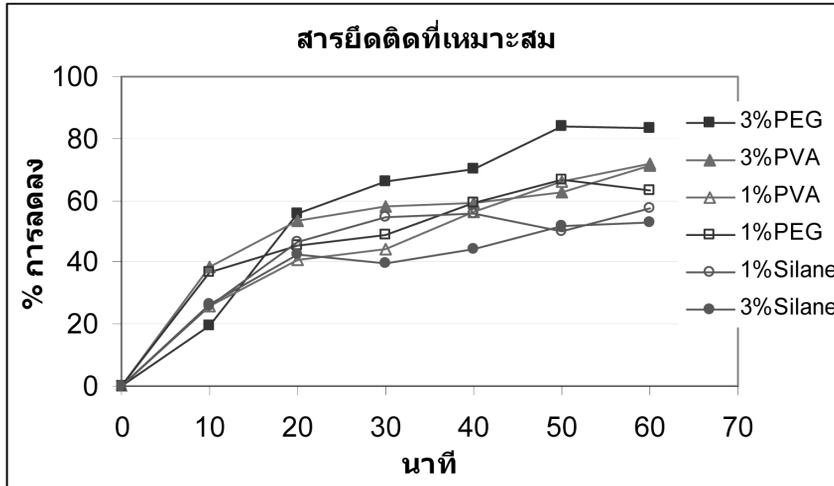
ไดออกไซด์มีลักษณะเป็นสะเก็ดแผ่นๆ มากกว่าการใช้สารยัดติดชนิดอื่นเมื่อใช้กำลังขยาย 20000 เท่า ซึ่งอาจทำให้เกิดการหลุดล่อนได้ง่ายเมื่อเทียบกับการใช้สารยัดติดชนิดอื่น ทั้งนี้ silane-69 [C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O)<sub>3</sub>Si(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>S(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>] เป็นของเหลวสีเหลืองใส มีกลิ่น ใช้ในการปรับปรุงระบบ vulcanization โดยซิลิกาภายในโมเลกุลของ silane จะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรง (tensile strength) สูงขึ้น (12)



รูปที่ 8. พื้นผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เคลือบ 5%TiO<sub>2</sub> ผสม ก) 1% Silane-69 (กำลังขยาย 1000 เท่า) ข) 3% Silane-69 (กำลังขยาย 1000 เท่า) ค) 1% Silane-69 (กำลังขยาย 20000 เท่า) ง) 3% Silane-69 (กำลังขยาย 20000 เท่า)

การเปรียบเทียบว่าสารยึดติดชนิดใดให้ประสิทธิภาพผลดีที่สุดในการเคลือบบนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สำหรับใช้กำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยในรูปเป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษาทั้ง 3 ซ้ำ ยกเว้น 1%

PEG-1000 และ 1% PVA ที่ใช้ค่าเฉลี่ยจากครั้งที่ 1 และ 2 เท่านั้น เนื่องจากครั้งที่ 3 มีความแปรปรวนของข้อมูลสูงเกินไป ดังที่ได้อภิปรายไว้ในข้างต้น



รูปที่ 9. ประสิทธิภาพการกำจัด *E. coli* ในอากาศเมื่อใช้ชนิดและสัดส่วนของสารยึดติดที่แตกต่างกัน

จากรูปพบว่า การใช้ 3% PEG-1000 ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (84%) รองลงมาได้แก่ 3% PVA (71%) และ 1% PVA (69%) โดยเป็นไปได้ว่า PEG นั้นสร้างความพรุนบนพื้นผิวได้ดีกว่าสารยึดติดชนิดอื่น เนื่องจาก Bu และคยะ (8) รายงานไว้ว่า โมเลกุลของ PEG นั้นเกาะติดกับ oligomer ของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นมา ซึ่งการให้ความร้อนหลังการเคลือบ ทำให้ PEG ถูกกำจัดออกไปและเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ซึ่งขนาดและความหนาแน่นของรูพรุนยังเพิ่ม เมื่อจำนวนของ PEG เพิ่มขึ้น ดังนั้น 3% PEG จึงให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า 1% PEG เนื่องจากมีรูพรุนจำนวนมาก ทำให้พื้นที่สัมผัสของไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวกลางยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย โอกาสที่จะสัมผัสกับจุลินทรีย์และเกิดการทำลายจึงสูงกว่า ขณะที่ PVA นั้นอาจดีกว่าในเรื่องของการสร้างความพรุนบนพื้นผิว แต่อย่างไรก็ตาม PVA มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นในอากาศได้ดี (13) จึงเป็นไปได้ว่า อนุภาคของน้ำที่เกาะจะช่วยให้เกิดอนุมูลอิสระจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ ออกซิเดชันได้มากขึ้น ซึ่งในการศึกษานี้มีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50-65% ซึ่งเหมาะต่อการ

เกิดปฏิกิริยา (14) โดยถ้าความชื้นสูงกว่านี้มากๆ เป็นไปได้ว่าผลการศึกษาอาจเปลี่ยนแปลงไปจากนี้ เนื่องจากน้ำที่มากเกินไปจะไปแย่งพื้นที่ active site ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (14) ทำให้ไม่เหลือพื้นที่ว่างที่จะทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ได้ สำหรับ silane นั้น คุณสมบัติเด่นคือเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ (tensile strength) ทนต่อการเสียดสีและกัดกร่อน (12) ซึ่งในแง่ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์แล้ว อาจด้อยกว่า PEG และ PVA ในเรื่องของรูพรุนและคุณสมบัติการดูดความชื้นดังกล่าว นอกจากนี้ อัตราส่วนที่ใช้ระหว่าง 1% กับ 3% พบว่าแทบไม่ต่างกัน ซึ่งในกรณีของ 1% Silane พบว่ามีประสิทธิภาพเหนือกว่า 3% Silane โดยเป็นไปได้ว่า 3% Silane มีความแน่นทึบของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า การสัมผัสกับจุลินทรีย์และการทำลายจึงเกิดได้น้อยกว่า

#### 4. สรุป

การศึกษานี้พบว่า PEG-1000 เป็นสารยึดติดที่เหมาะสมต่อการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ สำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ใน

อากาศ รองลงมาได้แก่ PVA ส่วน Silane ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุด โดยการใช้ PEG และ PVA ในอัตราส่วน 3% ให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าอัตราส่วน 1% ยกเว้น Silane ที่ทั้งสองอัตราส่วนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน (7)

## 5. กิตติกรรมประกาศ

สีหราช ลากเกิน ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย ปรียญฐานิพนธ์จากโครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี (YSTP) ประจำปี 2554 จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

## 6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Fujishima A, Roa T, Tryk DA. Titanium dioxide photocatalysis. J Photochem Photobiol C: Photochem Reviews; 2000 (1): 1-21.
- (2) Rincón A-G, Pulgarin C. Bactericidal action of illuminated TiO<sub>2</sub> on pure *Escherichia coli* and natural bacterial consortia: post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time. Appl Catalysis 2004; 49: 99-112.
- (3) Choi H, Stathatos E, Dionysiou DD. Photocatalytic TiO<sub>2</sub> films and membranes for the development of efficient wastewater treatment and reuse systems. Desalination 2007; 202: 199-206.
- (4) Hofstadler K, Bauer R, Novalic S, Heisler. New reactor design for photocatalytic wastewater treatment with TiO<sub>2</sub> immobilized on fused-silica glass fibers: photomineralization of 4-chlorophenol. Environ Sci & Technol 1994; 28: 670-674.
- (5) Salih FM. Enhancement of solar inactivation of *Escherichia coli* by titanium dioxide photocatalytic oxidation. J Appl Microbiol 2002; 92: 920-6.
- (6) Pozzo RL, Baltanás MA, Cassano AE. Supported titanium oxide as photocatalyst in water decontamination: state of the art. Catalysis Today 1997; 39: 219-31.
- (7) Nimitrakoolchai O and Supothina S. Bactericidal activity and UV-filtering property of TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts coated on curtain fabrics. Res Chem Intermed 2009; 35: 271-80.
- (8) Bu S, Jin Z, Liu X, Du H, Cheng Z. Preparation and formation mechanism of porous TiO<sub>2</sub> films using PEG and alcohol solvent as double-templates. J Sol-Gel Sci and Technol 2004; 30: 239-48.
- (9) Guin D, Manorama SV, Latha JNL, Singh S. Photoreduction of silver on bare and colloidal TiO<sub>2</sub> nanoparticles/nanotubes: synthesis, characterization, and tested for antibacterial outcome. J Phys Chem C 2007; 111: 13393-7.
- (10) Macher JM, Burge HA. Sampling biological aerosols. In: Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants. 9<sup>th</sup> edition. Ohio: ACGIH; 2001. p.661-701.
- (11) Reed JS. Principle of ceramic processing. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons; 1995.
- (12) EVONIK Industries. Product information Si 69 [Internet]. 2012. [updated 2012 Mar; cited 2012 Jun 11]. Available from: [http://www.rubber-silanes.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/Rubber-Silanes/Produktinformationen/PI%20320%20Si%2069\\_en%200909.pdf](http://www.rubber-silanes.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/Rubber-Silanes/Produktinformationen/PI%20320%20Si%2069_en%200909.pdf)
- (13) Wikipedia. Polyvinyl alcohol [Internet]. 2012. [updated 2012 Jun 6; cited 2012 Jun 11]. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl\\_alcohol](http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_alcohol)
- (14) Goswami DY, Trivedi DM, Block SS. Photocatalytic disinfection of indoor air. Transactions of the ASME 1997; 119: 92-6.