



รายงานการวิจัย

ปฏิกิริยาการออกซิเดชันจากการกระตุ้นด้วยแสงของฟิล์มผลึกนาโนซิงค์-
ออกไซด์ที่เติมสารเจือสำหรับการบำบัดน้ำเสีย
[Photocatalytic Oxidation of Nanostructured doped-ZnO
Films for Wastewater Treatment]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ปฏิกิริยาการออกซิเดชันจากการกระตุ้นด้วยแสงของฟิล์มผลึกนาโนซิงค์-
ออกไซด์ที่เติมสารเจือสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

[Photocatalytic Oxidation of Nanostructured doped-ZnO
Films for Wastewater Treatment]

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์

อาจารย์ ดร. อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558-2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2562

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง ปฏิบัติการออกซิเดชันจากการกระตุ้นด้วยแสงของฟิล์มผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือสำหรับการบำบัดน้ำเสีย (Photocatalytic Oxidation of Nanostructured doped-ZnO Films for Wastewater Treatment) ดำเนินการสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์จากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ประกอบด้วย นายนิวัติ สารปรัง, นายอรรถพล โพธิ์สม, นาย พิสิทธิ์ แวงยางนอก, นางสาวคณินิจ กล้าสำโรง, นางสาว สิทธิภรณ์ สุนทวงษ์, นาย พงศกร ปานเนียม, นาย สิทธิพงษ์ คงแก้ว, และนาย ปกรณ์ ใจกุศล กลุ่มนักศึกษารายวิชาโครงการ สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการดำเนินการทดลองและค้นคว้าในหัวข้อเรื่อง ปรากฏการณ์โฟโตแคตาไลติกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท (Study of Photocatalytic Behavior of Bi doped ZnO Thin Film), ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือสำหรับบำบัดความเป็นพิษในน้ำ (Antibacterial activity of doped ZnO thin films), และ การใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุต้านแบคทีเรียบนกระเบื้องเซรามิก (Zinc Oxide as Antibacterial Material on Ceramic Tiles) ตามลำดับ

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ ของศูนย์เครื่องมือฯ ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558 - 2559

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพย์วรรณ พึ่งสุวรรณรักษ์

อาจารย์ ดร. อภิชน วัชรินทร์วงศ์

กรกฎาคม 2562

บทคัดย่อ

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวแคตตาลิส (Catalyst) ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสออกซิเดชัน (Photocatalysis Oxidation) โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอน (photon energy) จากแสง ทำให้เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงและลดความเป็นพิษลง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือปนเจอร์เมเนียม (Bi) ซึ่งเตรียมได้จากวิธีโซล-เจล (sol-gel) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากและใช้พลังงานต่ำเหมาะสมในการเป็นทางเลือกหนึ่งในอุตสาหกรรมเนื่องจากใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ จากนั้นปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium Bromide, CTAB) ในสารละลายโซล-เจลเพื่อช่วยในการยึดเกาะโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของพื้นผิวและสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง จากนั้นศึกษาสถานะและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีโฟโตแคตตาไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ และศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในการเคลือบผิวกระเบื้องให้กระเบื้องมีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย และศึกษาผลของซิงค์ออกไซด์ต่อสีของกระเบื้องเคลือบ

การศึกษามูลของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือปนเจอร์เมเนียมโดยอาศัยหลักการ Photocatalysis เพื่อลดจำนวนของแบคทีเรียซึ่งทดลองใช้หลอดยูวีส่องผ่านลงมายังแผ่นฟิล์มบางในสถานะต่างๆได้แก่ จำนวนแผ่น ระยะเวลา จากนั้นทำการนำน้ำที่ทดสอบปริมาตร 0.1 ml มาทำการเขี่ยเขี่ยบนจานเพาะเชื้อเพื่อตรวจนับจำนวนเชื้อ ที่สูตรต่างๆคือ ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เติมสารเจือปน และ เจือปนเจอร์เมเนียม 0.2 และ 0.6 atomic percent (at%) ตามลำดับ พบว่า จำนวนเชื้อที่ใช้ฟิล์มบาง ZnO ที่เจือปนเจอร์เมเนียมที่ความเข้มข้น 0.6 at% สามารถลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าทุกสูตรที่จำนวนแผ่นเพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เติมสารเจือปนเจอร์เมเนียมด้วยเทคนิคแกลนซิงอินซิดีนท์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (Glancing incident X-ray diffraction) พบว่าขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์บนฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งชนิดที่ไม่เติมสารเจือปนและเติมสารเจือปนเจอร์เมเนียมยังคงมีอนุภาคขนาดนาโนเมตร จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่าพื้นผิวฟิล์มที่เจือปนเจอร์เมเนียม 0.6 at% มีลักษณะเรียบมากกว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ชนิดไม่เติมสารเจือปน และ ชนิดเติมสารเจือปนเจอร์เมเนียม 0, 2 at% ตามลำดับ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการทำเคลือบกระเบื้องที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้โดยการเติมเคลือบผิวกระเบื้องด้วยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกระตุ้นของแสงหรือกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic) ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Series A) และวิธีการซิลิกาโซลเจลที่มีการกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์นาโน (Silica Sol-Gel : Series B) โดยศึกษาปริมาณของซิงค์ออกไซด์ในผิวฟิล์มบาง จากนั้นนำไปเผาแบบครั้งเดียว (One Firing) วิเคราะห์ผลของการเพิ่มปริมาณการเติม

ซิงค์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเคลือบด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง (Laser Particle size Distribution) วิเคราะห์สีที่เปลี่ยนแปลงของกระเบื้อง (Color Measurement) พบว่าเคลือบมีความสว่างมากขึ้นตามปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เพื่อดูการยึดเกาะและกระจายของอนุภาคซิงค์ออกไซด์บนผิวเคลือบและวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) ของซิงค์-ออกไซด์ และในงานวิจัยนี้มีการทดสอบสมบัติทางโฟโตแคตาไลติกด้วยการทดสอบด้านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria) อีโคไล (Escherichia coli : E.coli) ในอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อศึกษาปริมาณการลดลงของแบคทีเรียในเวลาที่เปลี่ยนไป พบว่าปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่มากขึ้นทำให้มีการอยู่รอดของแบคทีเรียต่ำลง



Abstract

Zinc oxide (ZnO) is a semiconductor material which acts as a catalyst for photocatalysis oxidation reaction. ZnO was stimulated by photon energy from visible light, which caused organic decomposition reaction to decompose organic matter to smaller molecules and reduce toxicity. This research was to study the factors affecting and improving the properties of Bismuth doped ZnO thin films that were prepared using the sol-gel method. The sol-gel preparation technique was not complicated and used low energy consumption which was suitable as an alternative to the industry due to low production costs. The surface quality and of ZnO:Bi thin films were obtained by the addition of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), a surfactant in sol-gel solution. The addition of CTAB can improve the quality of morphology and optical properties of the thin films by an increase of molecules adhesion of zinc oxide. After that, the conditions and factors affecting the efficiency of the anti-bacterial of Zn:Bi thin film through the photocatalysis process in water were studied. finally, the feasibility study in antibacterial property and color of ceramic tiles after coating Zn:Bi thin film on ceramic tile were investigated.

The effect of Bismuth doped ZnO thin films on bacterial activities was studied by using visible light photocatalytic process. The effects of thin film numbers and exposed time under UV light were investigated. 0.1 ml of the contaminated water was spread on the agar plate in order to count the bacterial colony. For an increase of number of ZnO thin films and time, 0.6 at% Bi doped ZnO thin films presented the number of bacterial colony less than that of the 0.2 at% and undoped ZnO thin films. In addition, the chemical structure of ZnO thin films was characterized by Glancing incident X-ray diffraction. It revealed that the size of ZnO particles on the thin films remained in the nanometer range. From the morphology observed by scanning electron microscope (SEM), the surface of 0.6 at% Bi doped ZnO thin films exhibited smoother surface than that of the undoped ZnO thin films and 0.2 at% Bi doped ZnO thin films.

For the feasibility study of ceramic tile coating with ZnO thin films on the antibacterial property, the films were prepared by dip coating (Series A) and Silica Sol-Gel method (Series B). After one firing, the effect of ZnO content on the properties of thin films was evaluated such as Laser Particle size Distribution and Color change of ceramic

tiles. The result showed that, the brightness of coating agent increased with the addition of ZnO content. Additionally, the surface morphology of ZnO thin film was observed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) for the determination of ZnO particles adhesion and dispersion on the thin film. Finally, the photocatalytic property of the thin film was determined by anti-bacterial testing against gram negative bacteria (*Escherichia coli*; *E.coli*) in culture medium. The result revealed that an increase of ZnO particle effectively inhibited the bacteria activity.



สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ ภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ต
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	20
บทที่ 1 บทนำ	21
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	21
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	23
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	23
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	24
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis)	26
2.2 ชนิดของโฟโตแคตตาไลซิส.....	29
2.2.1 โฟโตแคตตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis)	29
2.2.2 โฟโตแคตตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis).....	29
2.3 ชนิดของตัวแคตตาลิสต์.....	29
2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส.....	31
2.5 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 การศึกษาปรากฏการณ์ Photocatalytic फिल्मบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท.....	36
3.1 การสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท	36
3.1.1 วิธีดอูปกรณ์.....	36

สารบัญ (ต่อ)

3.1.2	ขั้นตอนการทดลอง.....	37
3.2	การผลิตฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท (ZnO : Bi) ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยง.....	39
3.2.1	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานฟิวส์ควอตซ์ (Fused quartz) สำหรับเคลือบฟิล์มบางซิงค์- ออกไซด์.....	39
3.2.2	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จำนวน 1 ชั้น.....	41
3.2.3	ขั้นตอนการอบด้วยความร้อน (Annealing).....	41
3.3	ศึกษาปัจจัยในการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทโดย เทคนิคโซล-เจลสำหรับประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำ.....	43
3.3.1	ขอบเขตของการทดลอง.....	43
3.3.2	เงื่อนไขสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง.....	43
3.3.3	วัสดุอุปกรณ์.....	45
3.3.4	ขั้นตอนการทดลอง.....	45
3.3.4	ผลการทดลอง.....	48
3.3.4.1	ผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 1.....	48
3.3.4.2	ผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 2.....	60
3.3.4.3	ผลการทดสอบของเงื่อนไขที่ 3.....	72
3.3.4.4	ผลการทดสอบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 20 μ M ของฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางต่างๆ.....	78
3.3.4.5	ผลการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมของฟิล์มบาง ZnO เตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจลที่เติมสารลดแรงตึงผิว ในสถานะที่มี และไม่มีออกซิเจน ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ.....	82
3.3.5	วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	83
3.3.6	สรุปผลการทดลอง.....	84
บทที่ 4	ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือสำหรับบำบัดความเป็นพิษในน้ำ.....	86

สารบัญ (ต่อ)

4.1	วัตถุประสงค์.....	86
4.2	การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทในช่วงความเข้มข้น 0-0.6 at% ด้วยกระบวนการโซล-เจล.....	86
4.2.1	ขั้นตอนการเตรียมเจล ZnO ที่ไม่เจือบิสมัท.....	87
4.2.2	ขั้นตอนการเตรียมเจล ZnO สารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือ Bismuth 0.2 at%.....	88
4.2.3	สารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์ ที่เจือ Bismuth 0.6 %at.....	88
4.3	การเตรียมฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์.....	89
4.3.1	การทำความสะอาดแผ่นฟิวส์ควอตซ์.....	89
4.3.2	การผลิตฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยง (Spin coating)...	90
4.4	การเตรียมอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย.....	91
4.4.1	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	91
4.4.2	วิธีการเตรียมไนเตรทบรอก (nitrate broth).....	92
4.4.3	การเตรียมอีโอซินเมทิลีนบลูอะการ (Eosin methylene blue agar; EMB agar).....	93
4.4.4	การวัดความเข้มข้นของเชื้อ Ecoli จากหลอดเลี้ยงเชื้อ.....	93
4.4.5	ขั้นตอนวิธีการทดสอบการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในน้ำ.....	93
4.5	ผลการทดลอง.....	96
4.6	วิเคราะห์จุลโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยเทคนิค SEM.....	97
4.7	ผลจากทดสอบการวัดค่าความขุ่น (optical density ; OD) ที่ความยาวคลื่น 625 nm ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer.....	98
4.8	ผลการนับจำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ.....	100
4.9	สรุปผลการทดลอง.....	105
บทที่ 5 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย สำหรับเคลือบบนผิวกระเบื้องเซรามิก.....		106

สารบัญ (ต่อ)

5.1	วัตถุประสงค์.....	106
5.1.2	เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ต่อสีของกระเบื้องเคลือบ และสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรีย.....	106
5.2	ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า.....	106
5.3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	106
5.3.1	อุปกรณ์และสารเคมี.....	106
5.3.2	การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	107
5.3.2.1	SERIE A (เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ลงไปใต้น้ำเคลือบ).....	107
5.3.2	SERIES B (เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ลงในซิลิกาโซลเจล).....	107
5.3.3	การตรวจสอบสมบัติของเคลือบเซรามิก และการทดสอบประสิทธิภาพ การกำจัดเชื้อแบคทีเรีย.....	108
5.3.3.1	วิธีทดสอบ Laser Particle Size Analysis ด้วยเครื่อง Horiba/LA950V2.....	108
5.3.3.2	วิธีการทดสอบ SEM-EDS รุ่น Auriga.....	109
5.3.4	การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย.....	109
5.4	ผลการทดลอง.....	110
5.5	วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	121
5.6	สรุปผลการทดลอง.....	122
	บรรณานุกรม.....	124
	ภาคผนวก.....	126
	ประวัติผู้วิจัย.....	132

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลของ ZnO : Bi	36
ตารางที่ 3.2	การเตรียมสารละลายเจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทกับเติมสารลดแรงตึงผิวที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	38
ตารางที่ 3.3	ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ใช้เป็นอะตอมสารเจือ	38
ตารางที่ 3.4	ปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว CTAB สำหรับการเตรียมสารละลายโซล-เจล ZnO ที่เจือด้วยอะตอมบิสมัท	39
ตารางที่ 3.5	ชนิดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจล	44
ตารางที่ 3.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยในการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทโดยเทคนิคโซล-เจล	45
ตารางที่ 3.7	ตัวอย่างตารางบันทึกผลข้อมูล	47
ตารางที่ 3.8	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ ไม่เติม CTAB	48
ตารางที่ 3.9	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และไม่ได้เติมสารลดแรงตึงผิว ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	50
ตารางที่ 3.10	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.05 wt%	51
ตารางที่ 3.11	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.05 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	52
ตารางที่ 3.12	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.1 wt%	53
ตารางที่ 3.13	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และสารลดแรงตึงผิว 0.1 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	54
ตารางที่ 3.14	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.2 wt%	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 3.15	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วย Bi0.2 at% และสารลดแรงตึงผิว 0.2 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	56
ตารางที่ 3.16	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.5 wt%	57
ตารางที่ 3.17	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วย Bi0.2 at% และสารลดแรงตึงผิว 0.5 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	58
ตารางที่ 3.18	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.7 wt%	59
ตารางที่ 3.19	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วย Bi0.2 at% และสารลดแรงตึงผิว 0.7 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	60
ตารางที่ 3.20	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ปราศจากสารเจือ และ CTAB 0.3 wt%	61
ตารางที่ 3.21	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และปราศจากสารเจือ ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ	62
ตารางที่ 3.22	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.1 at%	63
ตารางที่ 3.23	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.1 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	64
ตารางที่ 3.24	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at%.....	65
ตารางที่ 3.25	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.2 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่ เวลาต่างๆ	66
ตารางที่ 3.26	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.3 at%	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 3.27	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.3 at% ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ.....	68
ตารางที่ 3.28	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเงื่อนไข CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.4 at%.....	69
ตารางที่ 3.29	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.4 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	70
ตารางที่ 3.30	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.6 at% ภายใต้สภาวะ ที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	71
ตารางที่ 3.31	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเงื่อนไข CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 400°C	72
ตารางที่ 3.32	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนนิลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	74
ตารางที่ 3.33	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 500°C	75
ตารางที่ 3.34	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนนิลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ	76
ตารางที่ 3.35	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 600°C	77
ตารางที่ 3.36	ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนนิลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 600°C ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ.....	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.1	สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจล ZnO : Bi.....	86
ตารางที่ 4.2	การเตรียมสารละลายเจลาซิงค์ออกไซด์ที่เจือปนกับสารลดแรงตึงผิว ที่ประมาณความเข้มข้นต่างๆ.....	87
ตารางที่ 4.3	ปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว CTAB สำหรับ การเตรียมสารละลายโซล-เจล ZnO ที่เจือด้วยอะตอมบิสมัท.....	87
ตารางที่ 4.4	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่ ปราศจากสารเจือ ที่จำนวนแผ่นต่างๆ ที่ในช่วงเวลา 15 - 60 นาที.....	98
ตารางที่ 4.5	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่ เจือบิสมัท 0.2 at% เมื่อใช้จำนวนแผ่นต่างๆ ในช่วงเวลา 15 - 60 นาที	99
ตารางที่ 4.6	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิสมัท 0.6 at% เมื่อใช้จำนวนแผ่นต่างๆ ในช่วงเวลา 15 - 60 นาที.....	99
ตารางที่ 4.7	จำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่ปราศจากสารเจือ ที่เวลาต่างๆ.....	100
ตารางที่ 4.8	จำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ที่เวลาต่างๆ	101
ตารางที่ 4.9	จำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่เติมสารเจือ Bi 0.6 at% ที่เวลาต่างๆ	101
ตารางที่ 4.10	แสดงจำนวนเชื้อที่เวลาต่างๆที่ระดับความเจือจาง 10^{-5} เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO.....	102
ตารางที่ 5.1	ค่าวิเคราะห์สีของชั้นทดสอบ Series A	112
ตารางที่ 5.2	ค่าวิเคราะห์สีของเคลือบบนชั้นทดสอบ Series B	113
ตารางที่ 5.3	แสดงจำนวนโคโลนีที่นับได้ในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบที่มีซิงค์ออกไซด์ Series A.....	116
ตารางที่ 5.4	แสดงจำนวนโคโลนีที่นับได้ในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบที่มีซิงค์ออกไซด์ Series B.....	117
ตารางที่ 5.5	แสดงเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบ Series A.....	118
ตารางที่ 5.6	แสดงเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบ Series B.....	119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 5.7	แสดงการเปรียบเทียบของผลการทดลองทำกระเบื้องก้ำจัดแบบคี่เรีย ทั้ง Series A และ Series B	122
--------------	--	-----



สารบัญรูปรภาพ

รูปที่ 1. 1	การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกโดยใช้ฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วยบิสมัทเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง TiO ₂	23
รูปที่ 2.1	พลังงานก่อกัมมันต์ต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่ง และมีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
รูปที่ 2. 2	สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	27
รูปที่ 2.3	องค์ประกอบของรังสียูวี	28
รูปที่ 2.4	กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ.....	30
รูปที่ 2.5	กระบวนการไฮดรอกซิล เรดิคอลลอกซิเดชัน	32
รูปที่ 3. 1	การสังเคราะห์สารละลายโซลเจลซึ่งค็อกซ์ไต์ที่เจือด้วยอะตอมบิสมัทกับการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB	37
รูปที่ 3.2	การทำความสะอาดโดยวิธี RCA1	40
รูปที่ 3.3	การทำความสะอาดโดยวิธี RCA2	40
รูปที่ 3.4	เครื่องมือสำหรับเคลือบผิวฟิล์มบาง ZnO : Bi ด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	41
รูปที่ 3.5	กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ZnO : Bi จำนวน 1 ชั้นบนแผ่นฐานซิลิกอนและพีวซ์ควอทซ์	42
รูปที่ 3.6	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง	46
รูปที่ 3.7	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นสำหรับการทดสอบตัวอย่าง Bi 0.2 C 0.0.....	49
รูปที่ 3.8	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบตัวอย่าง Bi 0.2 C 0.05	51
รูปที่ 3.9	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซึ่งค็อกซ์ไต์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.1 wt%	53
รูปที่ 3.10	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซึ่งค็อกซ์ไต์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.2 wt%	55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.11	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.5 wt%	57
รูปที่ 3.12	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึง ผิว 0.7 wt%.....	59
รูปที่ 3.13	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและ ความเข้มข้น สำหรับการทดสอบตัวอย่างฟิล์มบาง ZnO เติม CTAB 0.3 wt% ที่ปราศจากสารเจือ.....	61
รูปที่ 3.14	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.1 at%	63
รูปที่ 3.15	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at%	65
รูปที่ 3.16	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบตัวอย่างฟิล์มบาง ZnO เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.3 at%	67
รูปที่ 3.17	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบตัวอย่างฟิล์มบาง ZnO เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.4 at%	69
รูปที่ 3.18	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 400°C.....	73
รูปที่ 3.19	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 500°C.....	75

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.20	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิ 600 °C.....	77
รูปที่ 3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณต่างๆ	79
รูปที่ 3. 22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท ที่ความเข้มข้นต่างๆ และเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณ 0.3 wt%	80
รูปที่ 3. 23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทที่ความเข้มข้น 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณ 0.3 wt% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H ₂ 95 % กับ N ₂ 5% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	81
รูปที่ 3.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทที่ความเข้มข้นต่างๆ และสภาวะในการเตรียมฟิล์มบางต่างๆ	82
รูปที่ 3. 25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.3 wt% ในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน	82
รูปที่ 3. 26	การสลายของสีเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์ม Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 400 °C ภายใต้สภาวะที่มีแสงและออกซิเจน เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง 20 นาที.....	84
รูปที่ 4. 2	การทำความสะอาดผิวของ Fused quartz ด้วยกระบวนการ RCA.....	90
รูปที่ 4.1	การเตรียมเจลซิงค์ออกไซด์ และการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง ด้วยกระบวนการแรงเหวี่ยง.....	91
รูปที่ 4. 3	ไนเตรทบรอต(nitrate broth).....	92
รูปที่ 4. 4	การวัดความเข้มข้นของเชื้อ	93
รูปที่ 4.5	แผ่นฟิล์มบางที่นำมาใส่ในน้ำที่มีเชื้อ แล้วจึงเปิดไฟจากหลอด UV	94
รูปที่ 4.6	กรเชื้อเชื้อและอบเชื้อ	95
รูปที่ 4. 7	ลักษณะโคโลนี	95

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.8	XRD pattern ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ไม่เจือ	96
รูปที่ 4.9	XRD pattern ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือบิทมัท 0.25 at%	96
รูปที่ 4.10	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ไม่เจือบิทมัท กำลังขยาย 2000 เท่า	97
รูปที่ 4.11	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือบิทมัท 0.2 at% กำลังขยาย 1000 เท่า	97
รูปที่ 4.12	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือบิทมัท 0.6 at% กำลังขยาย 1500 เท่า	98
รูปที่ 4.13	แสดงจำนวนโคโลนี ของแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่มากกว่า 300 โคโลนี	99
รูปที่ 4.14	แสดงจำนวนโคโลนี ของแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนี	100
รูปที่ 4.15	แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนเชื้อ $\times 10^{-4}$ (CFU/ml) กับ เวลาที่ฉายแสงทดสอบ (นาที่) ของฟิล์มบาง ZnO ที่ไม่ผ่านการเจือ	103
รูปที่ 4.16	แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนเชื้อ $\times 10^{-4}$ (CFU/ml) กับ เวลา (นาที่) ของฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิทมัท 0.2 at%	104
รูปที่ 4.17	แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนเชื้อ $\times 10^{-4}$ (CFU/ml) กับ เวลา (นาที่) ของฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิทมัท 0.6 at%	105
รูปที่ 5.1	การเตรียมเคลือบกระเบื้องตาม Series A และ B	108
รูปที่ 5.2	แสดงขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบน ของคลื่นแสงจากเครื่อง Horiba Laser Particle Size Distribution Analyzer	111
รูปที่ 5.3	แสดงภาพถ่ายลักษณะการเกาะรวมกันของซิงค์ออกไซด์โดยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า	112
รูปที่ 5.4	เปรียบเทียบค่าความแตกต่างด้านความสว่าง (dL^*) ของเคลือบบนชิ้นทดสอบ Series A และ B กับเคลือบมาตรฐาน เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ	113
รูปที่ 5.5	เปรียบเทียบค่าผลรวมความแตกต่างสี (dE^*) ของเคลือบบนชิ้นทดสอบ Series A และ B เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ	114
รูปที่ 5.6	แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (A0)	114
รูปที่ 5.7	แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (A10)	115
รูปที่ 5.8	แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (B0.5)	115
รูปที่ 5.9	แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (B1)	115
รูปที่ 5.13	แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (B3)	115

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของ แบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ	120
รูปที่ 5.19	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของ แบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ ของ Series A,B	120

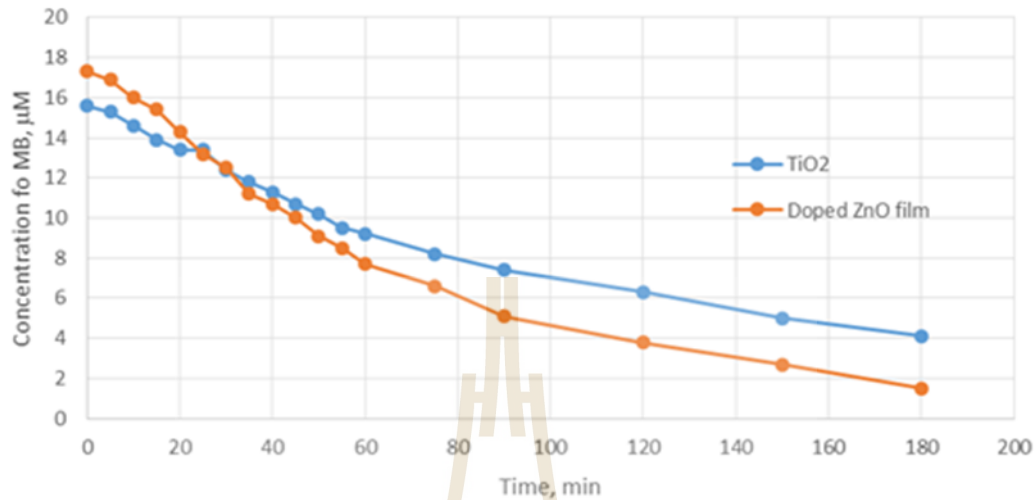


คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

คำย่อ	คำอธิบายสัญลักษณ์
Bi 0.0 C 0.3	ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจืออะตอมบิสมัทและใส่สาร CTAB ซึ่งตัวเลขที่ตามหลัง Bi และ CTAB คือปริมาณสารที่เติมในปริมาณของ at%
AnFg	การอบความร้อนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน 5% และไนโตรเจน 95%
,ZnAc	Zinc Acetate Dihydrate
EG	Ethylene Glycol
MEA	Monoethanolamine,
Bi	Bismuth Nitrate Pentahydrate
CTAB	Hexadecyltrimethylammonium Bromide
RCA1	สารละลายผสม H_2O_2 : NH_3OH : น้ำ DI ในอัตราส่วน 1 : 1 : 5
RCA2	สารละลายผสม H_2O_2 : HCL : น้ำ DI ในอัตราส่วน 1 : 1 : 5
nitrate broth	สารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์หรือเซลล์
EMB agar	Eosin methylene blue agar อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์หรือเซลล์ในรูปของวุ้น
E. coli	Escherichia coli แบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์ม (coliform) พบในอุจจาระของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้สุขภาพของอาหารและน้ำ
CFU	colony forming unit ย่อว่า cfu หรือ CFU เป็นหน่วยของการตรวจนับปริมาณจุลินทรีย์ (microbial population count)

selenide, CdSe), ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3), แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide, GaAs), ทินออกไซด์ (Tin(IV) oxide, SnO_2), ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และ สฟาเลอไรต์ (Sphalerite, ZnS) เป็นต้น สารที่ได้รับความสนใจคือ TiO_2 และ ZnO เนื่องจากมีค่าแถบช่องว่างระหว่างระดับพลังงาน (Energy band gap) ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ใกล้เคียงกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเตรียม ZnO ในรูปของอนุภาคเล็กขนาดนาโนเมตร (Nanoparticles) ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal), โซล-เจล (Sol-gel) และปฏิกิริยาอิมัลชัน (Emulsion reaction) เป็นต้น เพื่อใช้ในการบำบัดด้วยการกระตุ้นด้วยแสง แต่พบปัญหาในกระบวนการที่ยุ่งยากในการนำอนุภาคกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการออกแบบให้อนุภาคที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ยึดเกาะอยู่บนผิววัสดุอื่นจึงเป็นวิธีที่ลดขั้นตอนที่ยุ่งยากนั้น นอกจากนี้ในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือโดยกระบวนการโซล-เจล และเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงยังเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) และไม่พึ่งพาเทคโนโลยีสุญญากาศ ทำให้สามารถผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์ได้ ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียโรงพยาบาลกระบวนการที่สำคัญที่ขาดไม่ได้หลังจากบำบัดน้ำเสียแล้วคือ กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำซึ่งในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือวิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน และต้องมีการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ซึ่งควรอยู่ระหว่าง 0.5-1.0 mg/L การใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็มีโอกาสเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ซึ่งเป็นสารกลุ่มที่มีความเสี่ยงก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ ทั้งยังมีผลต่อความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอดบุตร การไหลเวียนของโลหิต และส่งผลกระทบต่ออวัยวะภายในร่างกาย (WHO, 2000) อีกทั้งปัญหาการสังเคราะห์สารเคมีมาเก็บไว้ การดูแลรักษาโรงเรือนเก็บสารเคมี การเตรียมสารเคมีก่อนจ่ายคลอรีนเข้าสู่ระบบซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ทักษะของผู้มีความรู้และความชำนาญในการเตรียมสารเคมี ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการใช้กระบวนการโฟโตแคทาไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มาทดแทน กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำแทนการใช้คลอรีนแบบดั้งเดิมซึ่งจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ ยังมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinblende) สามารถทำให้เสถียรได้โดยทำให้ซิงค์ออกไซด์โตบนแผ่นฐานที่เป็นคิวบิกแลตทิซ (Cubic lattice) ส่วนโครงสร้างแบบเกลือหิน (Rocksalt) จะสามารถเห็นได้ที่ระดับความดันสูงๆ เท่านั้น นอกจากนี้จากการทดสอบเบื้องต้นจากงานวิจัยของคณะผู้วิจัยโดยศึกษาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู (Methylene blue) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ไมโครโมลาร์ (μM) ภายใต้สภาวะที่มีแสง โดยใช้หลอด OSRAM-LED PARATHOM PRO MR16 35 ADVANCED 10 วัตต์ (W) 12 โวลต์ (V) ความเข้มของการส่องสว่าง 950 แคนเดลา (cd) โดยใช้ฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วยบิสมัท (Bismuth, Bi) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง TiO_2 พบว่าฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วย Bi มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ดีกว่า TiO_2 ดังแสดงในรูปที่ 1.1 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกโดยใช้ฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วยบิสมัทเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง TiO_2 ซึ่งที่เวลาเริ่มต้น 0 นาทีเป็นเวลาหลังจากที่มีการดูดซับสีเมทิลีนบลูโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นเวลา 10 นาทีและเริ่มทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก จากกราฟจะพบว่าความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูจางลงอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 180 นาที ความเข้มของสีเมทิลีนบลูจางหายไปเกือบ

หมด โดยผลการทดสอบเห็นได้ชัดว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีกว่า TiO_2 อีกทั้ง ZnO มีราคาถูกและสามารถดักคลื่นแสงได้ช่วงความยาวคลื่นกว้างกว่า TiO_2



รูปที่ 1. 1 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกโดยใช้ฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วยบิสมัทเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง TiO_2

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาคุณภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือด้วยกระบวนการต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ให้มีสมบัติด้านโฟโตแคตตาไลซิส และทางแสงที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงในการบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม
- 1.2.2 ศึกษาสถานะและปัจจัยต่างๆของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษชนิดต่างๆ ทางสิ่งแวดล้อม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือด้วยกระบวนการเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับใช้ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงในการบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อศึกษาสถานะและปัจจัยต่างๆในการเตรียมฟิล์มนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือด้วยวิธีโซล-เจลและกระบวนการเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงที่มีต้นทุนต่ำ เพื่อใช้ในการบำบัดมลพิษหรือฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้ง

- 1.3.2 เพื่อศึกษาสถานะและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีโฟโตแคทาไลติกของฟิล์มนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือในระดับห้องปฏิบัติการ
- 1.3.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือด้วยกระบวนการเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงในการใช้บำบัดมลพิษหรือฆ่าเชื้อโรค

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิชาการ

- ได้รับองค์ความรู้ในการพัฒนาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางโฟโตแคทาไลติกและทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อนำไปเผยแพร่ความรู้และต่อยอดความรู้ในการบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมให้กับภาครัฐและภาคเอกชน
- สามารถเผยแพร่ความรู้ในงานประชุมสัมมนาทางวิชาการทั้งในและนอกประเทศ ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารทางวิชาการและจดสิทธิบัตรได้
- สามารถผลิตบัณฑิตนักวิจัยผู้ที่มีความรู้และความชำนาญในการผลิตเทคโนโลยีฟิล์มบาง

1.4.2 ด้านนโยบาย

- เป็นการศึกษาหาแนวทางการบำบัดมลพิษสิ่งแวดล้อมด้วยเทคโนโลยีที่สะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนต่ำ

1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

- ใต้อองค์ความรู้ในการพัฒนาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีคุณภาพในการใช้บำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่มีต้นทุนต่ำลง และสามารถต่อยอดเป็นการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

1.4.4 ด้านสังคมและชุมชน

- ทำให้ประชาชน สังคมและชุมชนได้ใช้ระบบบำบัดมลพิษจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีต้นทุนพลังงาน ที่มีราคาถูกลงและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างแพร่หลาย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

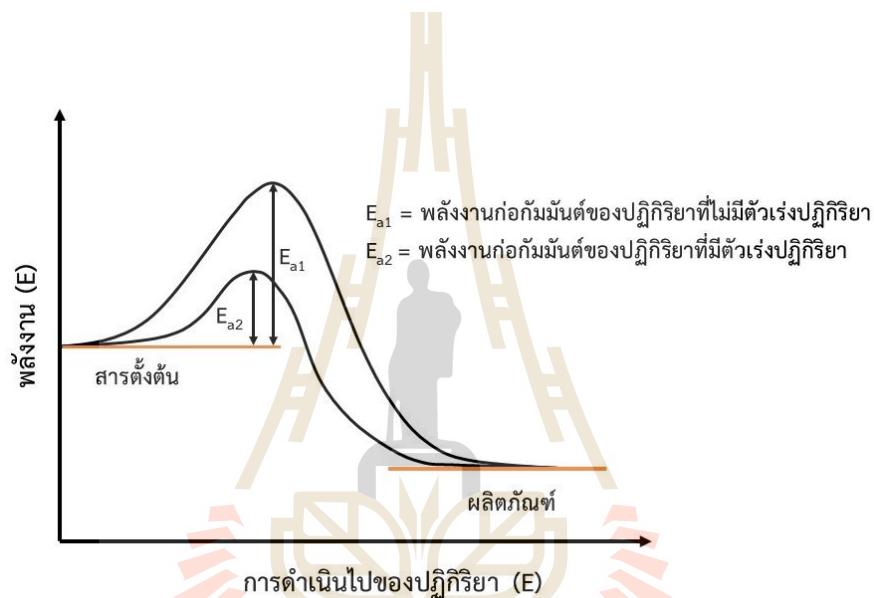
โฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) ได้มีการค้นพบในปี 1967 โดยชาว ญี่ปุ่น ชื่อ Dr. Fujishima พบว่า โลหะไทเทเนียมหลังจากฉายรังสีจากแสงสามารถทำลายโมเลกุลน้ำเป็นก๊าซออกซิเจน (O_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) โดยการปรับโครงสร้างอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนได้ค้นพบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี หนึ่งใน การค้นพบเหล่านี้คือการเกิดออกซิเดชันของออกไซด์ซึ่งเร่งการก่อตัวของไฮดรอกซิลอนุมูลอิสระซึ่งเป็นหนึ่งในตัวออกซิไดซ์ที่ดีซึ่งสร้างขึ้นโดยธรรมชาติ การใช้พลังงานจากแสงยูวีในการกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นโฟโตแคตะลิสต์ สามารถสลายสารอินทรีย์ได้หลายชนิด เช่น สิ่งสกปรกในน้ำมัน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากไอเสียรถยนต์, หมอกควันที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม, สารอินทรีย์ระเหยที่พบในวัสดุก่อสร้าง และเฟอร์นิเจอร์, และการเจริญเติบโตของเชื้อราซึ่งเป็นสาเหตุของโรคราน้ำค้าง เป็นต้น นอกจากนี้ผลจากการเกิดออกซิเดชันของเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้แสดงคุณสมบัติที่ชอบน้ำ โดยการดึงดูดความชื้นในอากาศในรูปแบบของฟิล์มบาง ฟิล์มบางถูกป้องกันด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อให้พื้นผิวเคลือบสามารถทำความสะอาดได้ง่ายโดยการชะล้างของน้ำฝน ต่อมาได้มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำที่มีปฏิกิริยา โฟโตแคตตาไลซิส เช่น TiO_2 , ZnO , CdS , ทังสเตนไดรอกไซด์ (Tungsten trioxide, WO_3) เป็นต้น ส่วนใหญ่แล้วสารกึ่งตัวนำที่มี ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสเหล่านี้มีพื้นที่ช่องว่างแถบรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เทียบเท่าหรือใหญ่กว่า 3.2 eV ($\lambda = 387$ นาโนเมตร, nm) ดังนั้น สารกึ่งตัวนำเหล่านี้จะส่งเสริมกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส เมื่อได้รับแสงสว่างที่มีดัชนีรังสียูวี (UV Index) นอกจากนี้กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุที่เป็นมลพิษทั้งในน้ำและอากาศได้ โดยปฏิกิริยาเคมีต้องการเพียงแคแสงสว่างก็สามารถทำได้ ซึ่งเป็นวิธีที่สะอาดและปลอดภัย

ปัจจุบันมีการนำสารสังเคราะห์จาก TiO_2 มาประยุกต์ใช้ในการยับยั้งและฆ่าเชื้อโรคในน้ำและอากาศ เนื่องจากผลจากสมบัติโฟโตแคตตาไลติกของ TiO_2 สามารถทำลายและสลายสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บางชนิดได้แก่ สารที่ก่อให้เกิดมลภาวะ สารพิษที่มีอยู่ในน้ำ อากาศหรือในดิน ตลอดจนสามารถฆ่าแบคทีเรียหรือไวรัส ที่เกาะอยู่บนผิวได้โดยไม่ปล่อยสารพิษหรืออันตรายจากปฏิกิริยา อีกทั้งไทเทเนียมออกไซด์มีความเสถียร ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี และเป็นสารไม่มีพิษ หรือก่ออันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะลิสต์ เริ่มจากเมื่อมีแสงมากระทบ TiO_2 อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ (Valence band) ไปแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้น และเราเรียกออกซิเจนตัวนี้ว่าซูเปอร์ออกซิเจน (Super oxygen) และนอกจากนี้ จะทำให้เกิดช่องว่าง (Vacancy) ในแถบเวเลนซ์หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นออกไป ซึ่งช่องว่างนี้เรียกว่าโฮล (Hole) และ Hole นี้ทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรุนแรงหรือทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล

(Hydroxyl radical, OH^*) จากนั้นซูเปอร์ออกซิเจน กับ OH^* นี้จะไปสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ จึงสามารถใช้ในการฆ่าจุลินทรีย์ เช่น เชื้อแบคทีเรีย และเชื้อราได้

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis)

โฟโตแคตาไลซิส คือ กระบวนการที่เกิดจากการใช้แสงในช่วงอินตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) หรือในช่วงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible) ซึ่งมีความยาวคลื่น (Wave length) ในช่วง ระหว่าง 800-200 nm เข้าไปกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ให้ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) โดยจะทำหน้าที่ลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยาแต่ไม่ทำให้พลังงานของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พลังงานก่อกัมมันต์ต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งและมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดถูกกระตุ้นด้วยแสงทำจากโลหะตัวนำ (Transition Metal) หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เนื่องจากภายในวัสดุประเภทนี้จะมีวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) โดยมี Band Gap ขึ้นอยู่ระหว่างแบนด์ทั้งสอง เมื่อได้รับพลังงานของแสงที่มากกว่า Band Gap ทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอน (electron, e^-) ให้เคลื่อนที่จาก วาเลนซ์แบนด์ (valence band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ทำให้เกิดช่องว่างที่วาเลนซ์แบนด์เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-/h^+) โดยอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) หรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโฮลในวาเลนซ์แบนด์เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) (ไชยวงศ์ 2547)

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส นอกจากมีพลังงานแสงซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังต้องการน้ำหรือออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ ด้วย

การให้พลังงานเพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ทำโดยการฉายแสงในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) หรือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) ที่สูงพอจะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ซึ่งสามารถคำนวณค่าพลังงานได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

$$E = hc / \lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ

E คือพลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล (J)

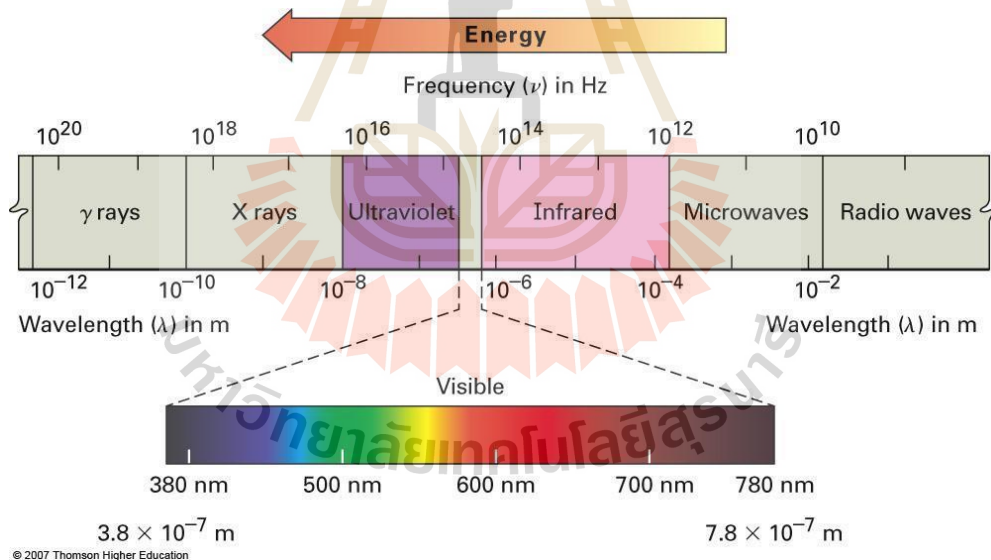
h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , J-s

ν คือความถี่ของคลื่นแสง, Hz หรือ s^{-1}

λ คือความยาวคลื่นแสง, nm

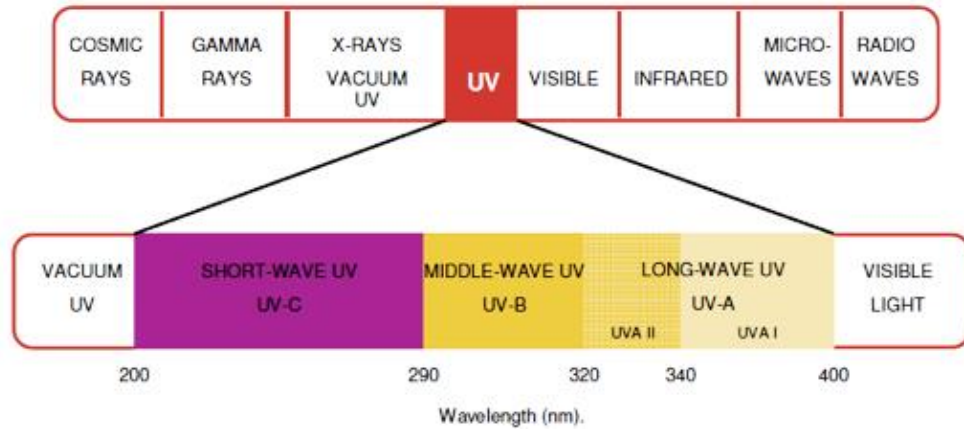
c คือความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 , m/s

จากสมการแสดงถึงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันของค่าพลังงานควอนตัมกับความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ และแปรผันตรงกับความถี่ของแสง เมื่อพิจารณารังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมายังโลกนั้นพบว่ามีความยาวคลื่นและความถี่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(ที่มา: https://www.slri.or.th/th/index.php?option=com_content&view=article&id=42:bl41-ir-&catid=56:bl41-ir)



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของรังสียูวี

(ที่มา: <https://www.sunumbra.com/ray-spectrum.html>)

สำหรับกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ช่วงแสงของรังสียูวี และ สเปกตรัมของรังสียูวี ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ความยาวคลื่นของแสงอุลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100–400 nm สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (visible light หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380–750 nm รังสียูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- 1) คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400–320 nm
- 2) คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320–280 nm
- 3) คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280–200 nm

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 nm มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง เนื่องจากแสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงยูวีและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการถูกดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 nm ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10–35 ไมล์, mile) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 nm มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่ใช้สาร ZnO เป็นตัวแคตาลิสต์นั้นเนื่องจาก ZnO เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ที่มีพลังงานช่องว่างแบบตรง (direct band gap) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแถบพลังงานในฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number, k) ของอิเล็กตรอน มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยยอดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์อยู่ตำแหน่ง wave number (k) ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบพลังงานคอนดักชัน (conduction band) ที่ตำแหน่ง $k = 0$ พอดี อีกทั้ง ZnO ยังมีแถบพลังงานช่องว่างที่กว้าง มีสมบัติการดูดกลืนแสงหรือการเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นตัวแคตาลิสต์และยังมีแถบพลังงานช่องว่างประมาณ 3.3 ถึง 3.4 eV ซึ่งทำให้ซิงค์ออกไซด์โปร่งแสง (transparent) ในช่วง

คลื่นแสงที่สายตามนุษย์มองเห็น ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 nm และทำงานได้ในความยาวคลื่นเหนือม่วง (Ultraviolet, UV) ถึงคลื่นแสงสีน้ำเงิน (blue light) ประมาณ 400 - 500 nm นอกจากนี้ ยังมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเอกซ์ซิตอน (exciton binding energy) ประมาณ 60 meV เมื่อเทียบกับ แกลเลียมไนไตรด์ (GaN) ที่มีค่าเท่ากับ 25 meV จากการที่มีค่า exciton binding energy สูง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเรืองแสงสูงขึ้นด้วย

2.2 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิสสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้

2.2.1 โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis)

กระบวนการนี้เป็นการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่นการย่อยสลาย 2,4-ไดไนโตรโทลูอิน (2,4-Dinitrotoluene) โดยใช้ UV/H₂O₂

2.2.2 โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis)

กระบวนการนี้ดำเนินการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลายไคคลอโรฟีนอล (2-Chlorophenol) โดยใช้ UV/ZnO

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิด ZnO นั้นหาง่าย มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษนอกจากนี้ ZnO มี Energy band gap ประมาณ 3.3-3.4 eV ซึ่งทำให้ ZnO มีความโปร่งใส

2.3 ชนิดของตัวแคตตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ได้แก่

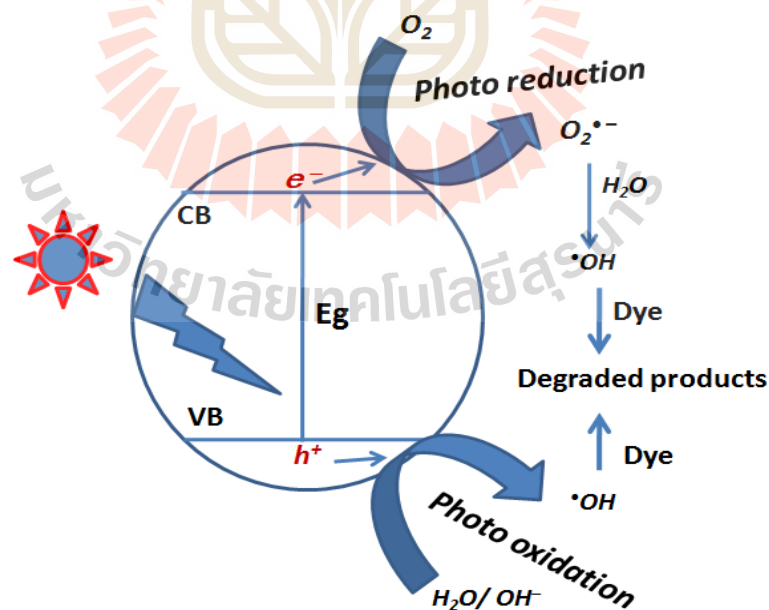
1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง (Copper, Cu) โครเมียม (Chromium, Cr) และนิกเกิล (Nickel, Ni) เป็นต้น

2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น โทเทเนียมไดออกไซด์แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e⁻) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (h⁺) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h⁺) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron - Hole Pairs, e⁻/ h⁺) สามารถเคลื่อนที่ไปมา

ระหว่างวาเลนซ์แบนด์และ คอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ ทำให้คู่ e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัว catalyst ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวแคตตาไลสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำแสดงปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้ จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Redical ($O_2^{\bullet-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ

2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็น OH^\bullet และเรดิคอลตัวอื่น ดังแสดงในสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอลเปอร์ไฮดรอกซิล-เรดิคอล ดังสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) และ H_2O_2 แสดงในสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามามีบทบาทเข้รับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคอล (Hydrogen Radical, H^\bullet) ตามสมการที่ (2.11) OH^\bullet เป็นสารออกซิเดนต์หลักในปฏิกิริยา โฟโตแคตาไลซิส เพราะ ไฮดรอกซิลเรดิคอลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก F^\bullet แต่สูงกว่า Cl^\bullet และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคอลต่างๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

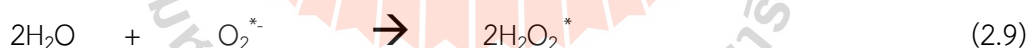
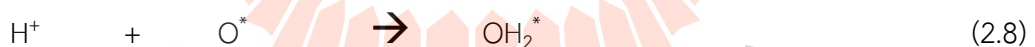
การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



การเกิดเรดิคอล จาก e^-/h^+



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



เมื่อ

h^+ คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)

e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

OH^- คือ ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion)

OH^\bullet คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl Radical)

O_2 คือ ออกซิเจน (Oxygen)

O_2^- คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)

OH_2^* คือ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)

H^* คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)

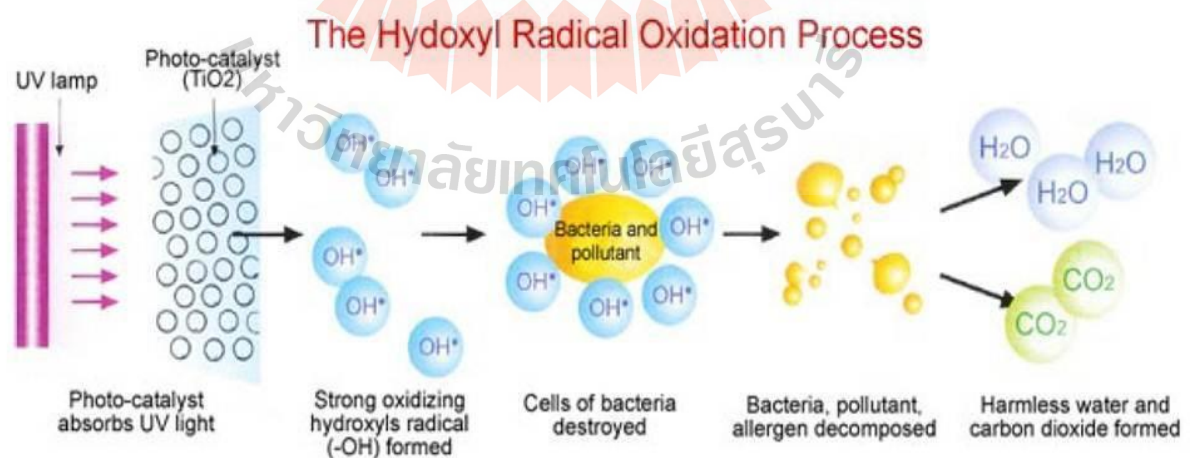
H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion)

เนื่องจาก OH^* และ h^+ ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดซ์ของ h^+ กับ OH^* ได้ OH^* และขณะเดียวกัน h^+ เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ โฟโตแคตาไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับ OH^- หรือน้ำได้ OH^* และปฏิกิริยาของ e^- กับ O_2 หรือ H^+ ได้ O_2^* , OH_2^* หรือ H^*

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวแคตาลิสต์กับ h^+ ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบน TiO_2 หรือตัวแคตาลิสต์อื่น Kwaguchi และ Matthews สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิด คือ OH^* กับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง h^+ กับสารอินทรีย์โดยตรง เป็นปฏิกิริยารอง ซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโฟโตแคตาไลซิส มีการเกิดปฏิกิริยาของ OH^* และสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- OH^* อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- OH^* ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- OH^* ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- OH^* ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.5 กระบวนการไฮดรอกซิล เรดิคัลออกซิเดชัน

2.5 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Meng และ Juan (2008) ได้เสนอว่า ZnO มีสมบัติทาง Photocatalytic oxidation ที่ดี สามารถดูดกลืนช่วงคลื่นกว้าง และมีการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่างๆ เช่น น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยยา น้ำเสียจากสีย้อมต่างๆ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของผลึก ZnO ขึ้นอยู่กับปริมาณของ ZnO, ความเข้มข้นของมลพิษ, เวลาในการฉายแสง, ความเข้มของแสง, ค่าความเป็นกรดต่างและปริมาณออกซิเจนในน้ำ

Mekasuwandumrong (2010) และคณะจากประเทศไทยได้สังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโนของ ZnO ในช่วง 8.8 ถึง 47 nm ด้วยวิธีเฟรม-สเปรย์ ไพโรไลซิส (Flame-spray pyrolysis, FSP) โดยศึกษาสถานะในการสังเคราะห์อนุภาคได้แก่ ความเข้มข้นของสาร อัตราการไหลตัวของสารตั้งต้น การกระจายออกซิเจนในระบบและการแอนนิล (Anneal) จากการวิจัยพบว่า เมื่ออนุภาคมีขนาด 47 nm จะให้สมบัติทางการสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (photocatalytic degradation) ได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งพบว่าอนุภาคที่ได้จากการวิจัยมีประสิทธิภาพในการสลายได้ดีกว่า Degussa P-25 และ JRC-TiO₂ ทางการค้า อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของอนุภาคเพิ่มมากขึ้นเป็น 52.6 - 103.5 พบว่ามีสมบัติ Photocatalytic ลดลง และสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกและพื้นที่ผิวของสารจะมีผลต่อสมบัติด้านโฟโตแคตตาไลติก

Yousef และคณะ (2012) ได้ศึกษาและสังเคราะห์ไฟเบอร์ขนาดนาโนของแคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide, CdO) ที่เจือกับ ZnO โดยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CdO จะทำให้สารมี band gap ลดลง และทำให้ผลสมบัติโฟโตแคตตาไลซิส ดีขึ้น และทำให้เกิด solid solubility มากขึ้นด้วย และเมื่อเติม CdO 39.4 โดยน้ำหนัก (wt%) พบว่ามีสอง band gap จากผล PL spectra ซึ่งสามารถชะล้างสีของ methylene blue ได้ดีที่สุด

Baruah และคณะ (2012) ได้รายงานเกี่ยวกับ ZnO ขนาดอนุภาคนาโนที่มีสมบัติด้าน photocatalytic สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ดี และได้กล่าวถึงกระบวนการในการสังเคราะห์ ZnO ขนาดอนุภาคนาโนต่างๆ

Saif และคณะ (2013) ได้รายงานการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Samarium (Sm³⁺) ที่มีโครงสร้างพูนด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบ Hydrothermal จากการทดลองพบว่าซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (mol%) Sm³⁺ จะให้ผลดีที่สุด โดยจากการศึกษาด้วย Fluorescent probe method พบว่ามีตัวออกซิแดนซ์ที่รุนแรงมากของ OH[•] (active oxidative species) เกิดขึ้นบนผิวฟิล์มบางจำนวนมาก ซึ่งฟิล์มบางนี้มีสมบัติในการเป็นพื้นผิวที่ทำความสะอาดตัวเองและปราศจากเชื้อโรค (self-cleaning and sterilizing applications)

Selvam และคณะ (2013) ได้สังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของ ZnO บริสุทธิ์ และ ZnO ที่เติม Mg ด้วยวิธี Co-precipitation ที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลองพบว่าได้อนุภาคระดับนาโนที่มีโครงสร้างผลึกดีและมีขนาดสม่ำเสมอ และสามารถชะล้างสีของ Chlorophenol โดยการเจือด้วย Mg ใน ZnO ส่งผลต่อโครงสร้างผลึก รูปร่างของอนุภาค สมบัติทางแสง และ Photocatalytic activity

Shi-Qian และคณะ (2014) ได้เตรียมสารเชิงซ้อนของ ZnO/แร้ดิน (rectorite) หรือ ZnO/REC โดยวิธี Hydrothermal ขนาดอนุภาคของ ZnO/REC มีการกระจายตัวที่มีและมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสารเชิงซ้อนของ ZnO/REC สามารถชะล้างสีของ Methylene blue ได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.9 กรัมต่อลิตร และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สารเชิงซ้อนนี้ทำงานได้โดยปราศจากการเติม H_2O_2 แต่ใช้เพียงแสงอาทิตย์ จึงเหมาะในการใช้บำบัดน้ำเสียจากสีย้อมต่างๆ

Lbănescu และคณะ (2014) ได้เตรียมอนุภาคนาโนของ Ag/ZnO โดยต้องการลดการเติม Ag ให้น้อยลงเพื่อใช้ในการเคลือบบนผ้าที่ต้องการสมบัติด้านการต้านเชื้อโรค ผงอนุภาคนาโนเตรียมได้จาก ZnO sol และ Ag/ZnO sol และนำไปกระจายในตัวกลางที่เตรียมจาก 3-glycidyloxypropyl-trimethoxysilane (GPTMS) และ tetraethoxysilane (TEOS) ซึ่งพบว่าผ้าที่เคลือบสารดังกล่าวมีสมบัติ photocatalytic activity และการต้านเชื้อ Gram-negative และ Gram-positive ได้ดี

Saleh และคณะ (2014) ได้ศึกษาการเจือ Mn และ Co ใน ZnO อนุภาคขนาดนาโนเมตร จากวิธี Co-precipitation ผงอนุภาคนาโนที่เจือด้วย 12 % Mn และ Co ในซิงค์ออกไซด์จะให้ผล Photocatalytic activity ดีที่สุดและพบว่า Mn จะให้ผลดีกว่า Co ซึ่งจากการวิจัยสรุปว่าเกิดจาก charge trapping states ที่ได้จากการเติมสารเจือในโครงสร้างผลึกของ ZnO

Saleh และคณะ (2014) ศึกษาการเตรียมผงอนุภาคนาโนของ Wurtzite ZnO ที่เจือด้วย Fe และวิเคราะห์ด้วย XRD, energy dispersive X-ray spectroscopy, Scanning electron microscope UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy, electron spin resonance และ magnetometer จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือมากขึ้น จะทำให้เกิดการหมุนของอ็อกซิดอน Fe^{2+} มากขึ้นและการหมุนของอ็อกซิดอน Fe^{3+} ลดลง มีผลทำให้ค่า magnetization มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติ photocatalytic activity มากขึ้นด้วย ดังนั้นปริมาณการเติมสารเจือ Fe จะส่งผลต่อสมบัติด้าน photocatalytic activity ของ ZnO

Khan และคณะ (2014) ได้สังเคราะห์ ZnO quantum dots ด้วยวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ อนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่างกลมและมีโครงสร้างผลึกดี ซึ่งจากการทดสอบ ZnO quantum dots สามารถชะล้างสีของ Methyl orange ได้ถึง 97% ภายในเวลา 160 นาที เมื่อทำงานภายใต้แสง UV

Yang และคณะ (2014) ได้สังเคราะห์ ZnO ขนาดอนุภาคนาโนที่มีรูปร่างต่างๆ ด้วยวิธี hydrothermal ซึ่งเป็นกระบวนการที่เตรียมจาก Zn foil ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอนุภาคที่มีรูปร่างต่างกัน จะส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลาย Rhodamine B ที่แตกต่างกัน

Li และคณะ (2014) ได้สังเคราะห์ ZnO ที่เจือด้วย Sr^{2+} โดยวิธี microwave hydrothermal จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมสารเจือ Sr^{2+} ในปริมาณ 0-0.3 % จะทำให้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD มีการเลื่อนมุม 2θ ไปที่มุมต่ำลงและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจาก lamellar ไปเป็น hexagonal columnar เมื่อเติมสารเจือ Sr^{2+} เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ได้เผยแพร่ค่อนข้างจะเป็นงานวิจัยที่ใหม่ รวมทั้งสิทธิบัตรยังไม่มีการศึกษาผลในการบำบัดหรือฆ่าเชื้อโรคของฟิล์มนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมบิสมัทโดยวิธีโซลเจลและการเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยง ซึ่งวิธีการสังเคราะห์และเตรียมฟิล์มนาโนโดยเทคนิคโซลเจลใช้พลังงานต่ำ ต้นทุนต่ำและสามารถนำไปประยุกต์และควบคุมการเจือด้วยสารเจืออื่นๆ และเคลือบลงบนผิววัสดุอื่นๆได้



บทที่ 3

การศึกษาปรากฏการณ์ Photocatalytic พิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท

การเตรียมฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์จะใช้การเตรียมผ่านสารละลายโซล-เจลที่มีการเติมบิสมัทเป็นสารเจือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสให้ ZnO และทำการปรับปรุงคุณภาพของผิวฟิล์มบางให้เกิดจับตัวเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการเติม CTAB ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวลงไปในการเตรียมโซล-เจล จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงเพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มบางตามด้วยการอบความร้อนในสภาวะที่เหมาะสม ทำให้เกิดฟิล์มบางที่ก่อตัวเป็นผลึกนาโน ZnO : Bi ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.1 การสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลของซิงค์ออกไซด์แสดงดังตารางที่ 3.1

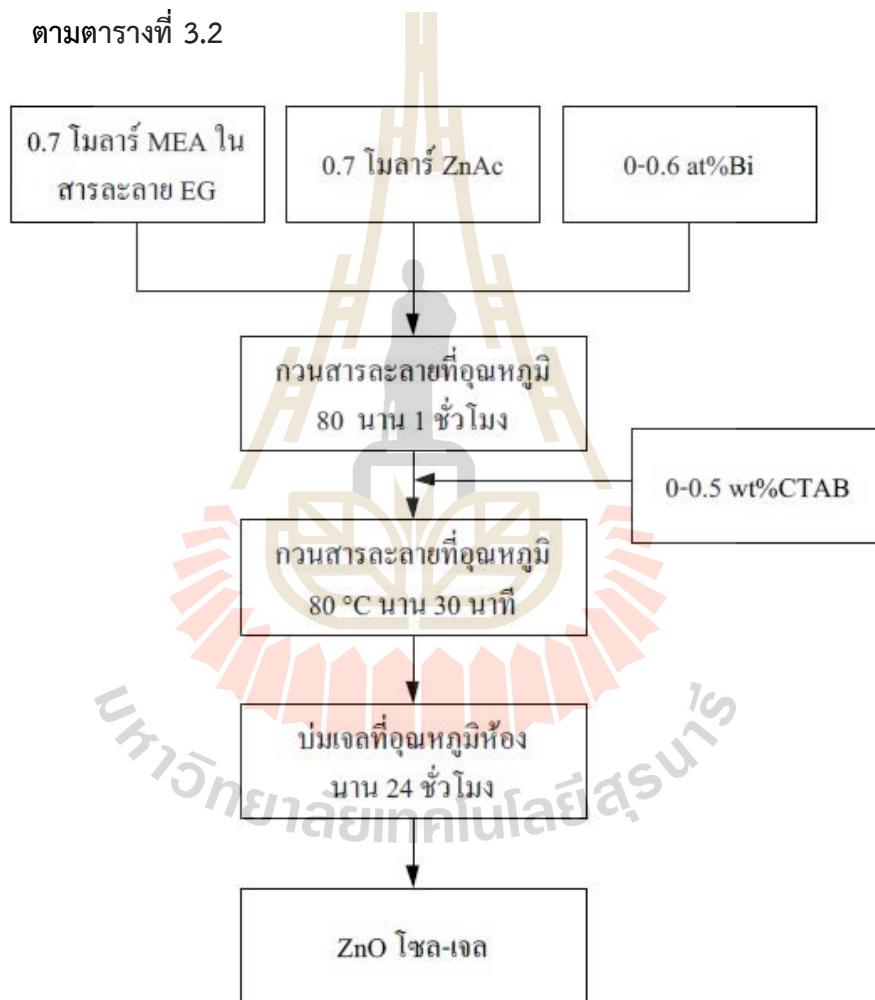
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลของ ZnO : Bi

สารตั้งต้น	สูตรเคมี	มวลโมเลกุล	ความบริสุทธิ์	หน้าที่
ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc Acetate Dihydrate, ZnAc)	$Zn-(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$	219.49	99.5 %	สารละลายตั้งต้น
เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG)	CH_2OHCH_2OH	62.07	99.5 %	สารตัวทำละลาย
โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA)	$NH_2C_2H_4OH$	61.08	97 %	สารช่วยเพิ่มความเสถียรของโซลเจล
บิสมัทไนเตรต เพนตะไฮเดรต (Bismuth Nitrate Pentahydrate)	$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$	485.07	98 %	สารเจือให้อะตอมบิสมัท
เฮกซะดีเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรมไนด์ (Hexadecyltrimethylammonium Bromide)	$C_{19}H_{42}BrN$	364.45	96 %	สารลดแรงตึงผิวและเพิ่มความเสถียรของโซลเจล

3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1.) เริ่มต้นกระบวนการเตรียมสารละลายโซล-เจลประกอบด้วย Ethylene Glycol (EG) และ Ethanolamine (MEA) โดยให้อัตราส่วนของ ZnAc : MEA เท่ากับ 1 โดยในการทดลองนี้ได้เตรียมสารตั้งต้นของโซล-เจล ปริมาณ 25 ml ดังนั้นเพื่อให้ได้อัตราส่วนของ ZnAc : MEA = 1 (ความเข้มข้นของ ZnAc = 0.7 M) จึงเตรียม MEA ให้มีความเข้มข้น 0.7 M แล้วเติม EG ในปริมาณ 100 ml)

2.) ละลาย ZnAc ลงในสารละลาย Ethylene Glycol กับ MEA ให้ได้ความเข้มข้น 0.7 mol/l โดยมีลำดับการใส่ส่วนผสมเพื่อให้เกิดสารละลายโซล-เจล แสดงในแผนผังรูปที่ 3.1 และตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์สารละลายโซล-เจลซึ่งคือออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมบิสมท์กับการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB

ตารางที่ 3.2 การเตรียมสารละลายเจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทกับเติมสารลดแรงตึงผิวที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

ลำดับ	สารเคมี	ความเข้มข้น	ปริมาณ	หมายเหตุ
1	MEA	97.0 %	MEA 4.322 ml	ผสมสาร 1 + 2 (ปริมาณ ~20 ml)
2	EG	99.5 %	ละลายใน EG ปรับให้ มีปริมาณ 100 ml	
3	Zn(CH ₃ COO) ₂ ·2H ₂ O	99.5 %	3.860 g	เติมลงในสารละลาย 1+2
4	Bi(NO ₃) ₃ ·5H ₂ O in EG	98.0 %	0.619 g ใน EG แล้ว ปรับให้เป็น 10 ml	เติมลงในสารละลาย 3
5	C ₁₉ H ₄₂ BrN (CTAB)	96.0%	0 – 0.075 g	เติมลงในสารละลาย 4 แล้ว เติมสาร 1+2 ปรับให้เป็น 25 ml

3.) เตรียมสารละลาย Bismuth nitrate pentahydrate (Bi(NO₃)₃ ·5H₂O) ที่มีความเข้มข้น 0.125 mol/l หรือ 0.619 g ละลายใน Ethylene Glycol ในขวดปริมาตร 10 ml ที่ปริมาณความเข้มข้นบิสมัทตั้งแต่ 0-0.6 at% เติมสารละลาย (Bi(NO₃)₃ ·5H₂O) ลงในสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 2 อย่างช้าๆ ในอัตรา 1 หยดต่อ 3 วินาที พร้อมกวนผสมด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นและปริมาณของสารละลาย (Bi(NO₃)₃ ·5H₂O) แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย Bi(NO₃)₃ ·5H₂O ใช้เป็นอะตอมสารเจือ

ความเข้มข้น Bismuth (at%)	ปริมาณ Bismuth(ml)
0	0
0.1	0.14
0.2	0.28
0.3	0.42

4.) เตรียมสารลดแรงตึงผิว Hexadecyltrimethylammonium Bromide, CTAB (C₁₉H₄₂BrN) ความเข้มข้น 0.1 M ละลายใน Ethylene Glycol ในปริมาตร 10 ml โดยใช้ความเข้มข้นของ CTAB เป็น 0-0.6 wt% ซึ่งได้จากการปรับปริมาณการหยด CTAB ลงในสารละลายที่ได้จากข้อ 3 ซึ่ง

มีความเข้มข้นของ บิสมัท 0, 0.1, 0.2, และ 0.3 at% ตามลำดับ อย่างช้าๆ ในอัตรา 1 หยดต่อ 3 วินาที พร้อมกวนผสมด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที และปิดฝาให้สนิท ความเข้มข้นสารละลายที่ได้จากการปรับปริมาณที่หยดสารละลาย CTAB และอัตราส่วนโดยโมลของ ZnAc : MEA : CTAB แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว CTAB สำหรับการเตรียมสารละลายโซล-เจล ZnO ที่เจือด้วยอะตอมบิสมัท

ความเข้มข้น CTAB(wt%)	ปริมาณที่หยดสาร CTAB (ml)	Molar ratio ZnAc : MEA : CTAB
0	0	1 : 1 : 0
0.05	0.34	1 : 1 : 0.002
0.1	0.68	1 : 1 : 0.004
0.2	1.37	1 : 1 : 0.008
0.3	2.06	1 : 1 : 0.012
0.6	2.74	1 : 1 : 0.016

5.) ตั้งสารละลายซิงค์ออกไซด์ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการปรับปริมาณสารละลายที่ได้ด้วย EG ปรับให้ได้ปริมาตรเป็น 25 ml

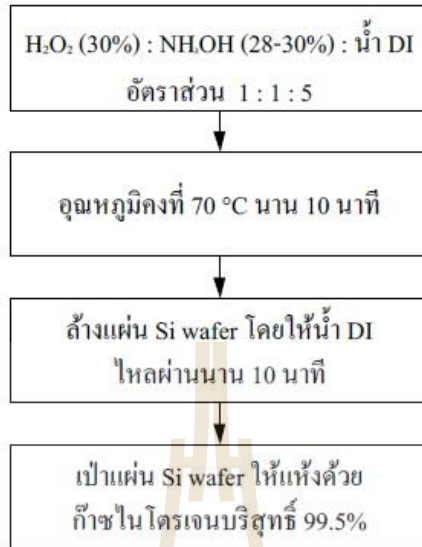
6.) ทิ้งให้สารละลายจากข้อ 5 ว่างที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เจลเกิดความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์

3.2 การผลิตฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท (ZnO:Bi) ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยง

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานฟิวส์ควอตซ์ (Fused quartz) สำหรับเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงจะทำการเคลือบแผ่นฟิล์มลงบนแผ่นฐานฟิวส์ควอตซ์ เพื่อความเหมาะสมในการวัดคุณสมบัติทางแสง ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แผ่นฐานฟิวส์ควอตซ์บริสุทธิ์มีขนาด 25×25 mm. ความหนา 1 mm ผ่านการทำความสะอาดแผ่นฐานด้วยวิธี RCA1 เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (organic) และวิธี RCA2เพื่อกำจัดอะตอมโลหะ

(metal ions) ออกจากผิวของแผ่นฐานพีวซ์ควอตซ์ โดยมีขั้นตอนการทำความสะอาดดังที่แสดงในแผนผังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 การทำความสะอาดโดยวิธี RCA1



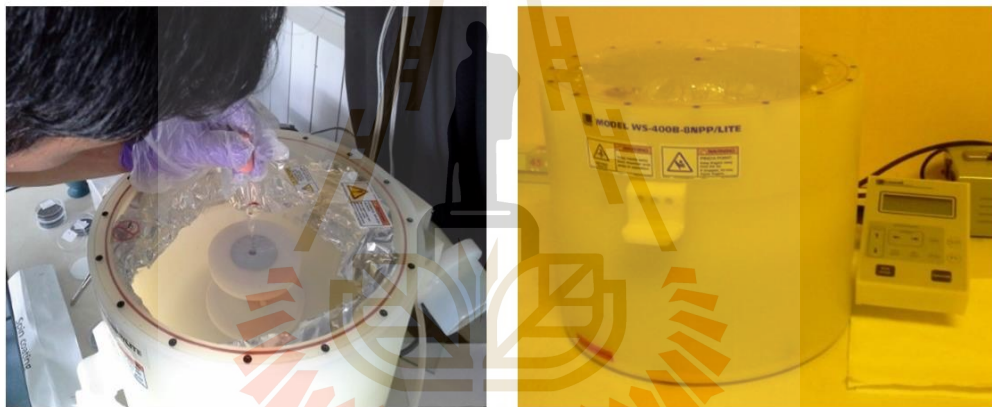
รูปที่ 3.3 การทำความสะอาดโดยวิธี RCA2

การผลิตฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้ผลิตด้วยเทคนิคการเคลือบผิวแรงเหวี่ยง (Spin coating) สามารถควบคุมความหนาฟิล์มได้จากความเร็วรอบการหมุน, เวลาและความหนืดของเจล สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมฟิล์มบางที่มีความหนาในช่วง 60 - 90 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่เหมาะสมในการเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงให้เซลล์แสงอาทิตย์, ช่วยให้การสะท้อนกลับของแสงลดลงและเกิดการหักเหของแสงผ่านทะลุเข้าไปในเซลล์ได้มากขึ้น โดยขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีรายละเอียดดังนี้

3.2.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จำนวน 1 ชั้น

1.) นำสารละลายโซล-เจล ZnO ที่บ่มไว้ 24 ชั่วโมง หยดลงบนแผ่น Fused quartz ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว สำหรับการเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (Spin coating) แบ่งความเร็วรอบในการหมุนแผ่นเป็น 2 ชั้นดังนี้ ชั้นที่หนึ่งใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ 500 รอบต่อนาที นาน 15 วินาทีและชั้นที่สองใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาทีดังรูปที่ 3.4

2.) ทิ้งฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนแผ่นฐาน Fused quartz ที่ผ่านการเคลือบจำนวน 1 ชั้น ภายในตู้ไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99% เพื่อให้ฟิล์มแห้ง

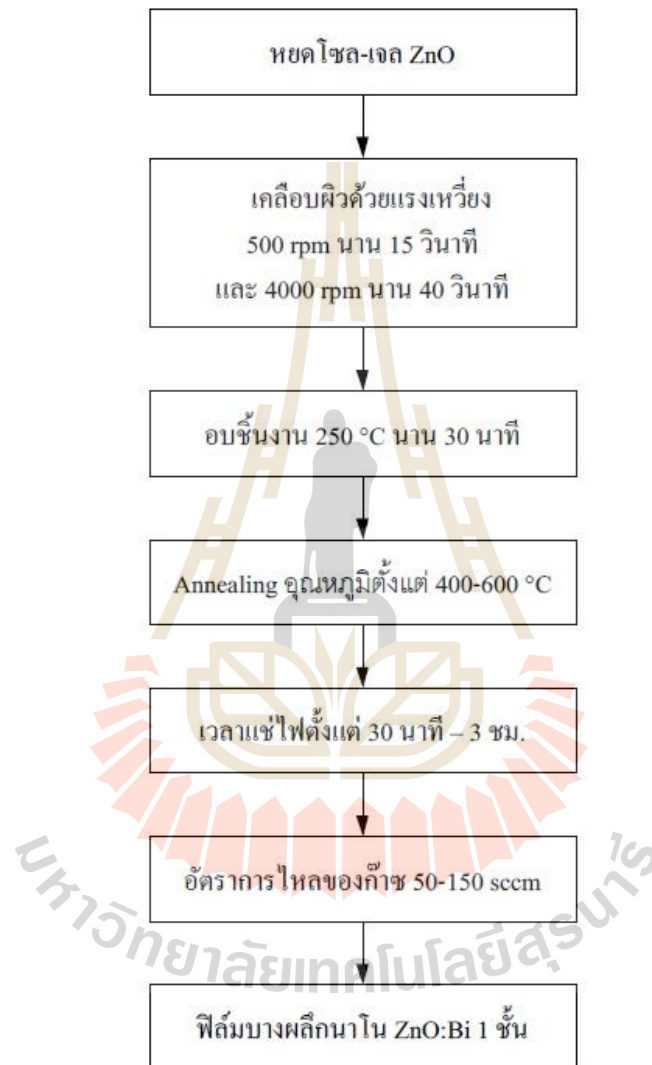


รูปที่ 3.4 เครื่องมือสำหรับเคลือบผิวฟิล์มบาง ZnO:Bi ด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

3.2.3 ขั้นตอนการอบแอนนีลลิ่ง (Annealing)

การอบด้วยความร้อนเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการเปลี่ยนโครงสร้างของฟิล์มบางให้เป็นฟิล์มบางผลึกนาโน ZnO : Bi ในขั้นตอนนี้จะทำการอบด้วยความร้อน 2 ครั้ง คือการอบที่ความร้อนต่ำ (Drying) ประมาณ 250 °C เพื่อให้ตัวทำละลายและสารลดแรงตึงผิว CTAB ระเหยออกไปและทำให้ฟิล์มแห้งสนิท จากนั้นทำการอบแอนนีลลิ่ง ที่อุณหภูมิประมาณ 600 °C ภายใต้บรรยากาศปกติและบรรยากาศแบบ forming gas เพื่อให้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เกิดโครงสร้างผลึกนาโนและอะตอมบิสมีท์เกิดการเกาะเกี่ยวเกิดพันธะกับพันธะในโมเลกุล ZnO พบว่าโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการอบด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศปกติอาจเกิดจุดบกพร่องของการเกาะเกี่ยวพันธะโครงสร้างผลึกขึ้นจากการเผาอุณหภูมิที่สูง

หรือเรียกว่าพันธะแขวนขาด (Dangling bond) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงจุดบกพร่องของผลึกด้วยการอบความร้อนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน 5% และไนโตรเจน 95% หรือเรียกว่าเทคนิค forming gas สามารถช่วยให้อะตอมไฮโดรเจนเข้าไปเกาะเกี่ยวเกิดพันธะกับพันธะแขวนขาดที่เกิดจากโครงสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทได้ แผนผังแสดงลำดับการอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แสดงในรูปที่ 3.5 และรายละเอียดวิธีการอบแอนนีลลิ่ง ดังนี้



รูปที่ 3.5 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ZnO : Bi จำนวน 1 ชั้นบนแผ่นฐานซิลิกอนและฟิวส์ควอทซ์

1.) นำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ไปอบ (Drying) ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 1°C ต่อนาที เพื่อให้ตัวทำละลายและสารลดแรงตึงผิว CTAB ในฟิล์มบางเกิดการระเหยของ (solvent) ออกให้หมด

2.) นำแผ่นพีวีซีควอตซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอน 3.2.2 มาทำการอบแอนนีลลิ่ง ในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 400, 500 และ 600°C ตามลำดับ อัตราการให้ความร้อน 1°C ต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและภายใต้สภาวะ forming gas

3.) ทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาแช่ไฟแอนนีลลิ่งเป็น 30 นาที 1, 2 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและเทคนิค forming gas

4.) สำหรับการอบแอนนีลลิ่งด้วยเทคนิค forming gas ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนตั้งแต่ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

5.) นำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติต่างๆในขั้นตอนต่อไป

3.3 ศึกษาปัจจัยในการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทโดยเทคนิคโซล-เจลสำหรับประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำ

3.3.1 ขอบเขตของการทดลอง

1.) ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูอยู่ที่ 20 μM

2.) ความเข้มของแสง 3.89 mW/cm^2

3.3.2 เงื่อนไขสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางแยกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

เงื่อนไขที่ 1 ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi 0.2 at% ด้วย CTAB ปริมาณต่างๆ

เงื่อนไขที่ 2 ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ CTAB 0.3 wt%

เงื่อนไขที่ 3 ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.3 wt% ภายใต้การอบ Annealing Forming Gas ในบรรยากาศ N_2 5% , H_2 95%

จากเงื่อนไขที่กำหนด สามารถสรุปชนิดของตัวอย่างสำหรับการทดสอบตามเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ชนิดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจล

ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้น สารเจือ ปิสมันท์ (%atom)	ความเข้มข้นสาร ลดแรงตึงผิว CTAB (%wt)	บรรยากาศ Annealing	อุณหภูมิ Annealing (°C)
Bi 0.0 C 0.3	0.0	0.3	Air	600
Bi 0.1 C 0.3	0.1	0.3	Air	600
Bi 0.2 C 0.3	0.2	0.3	Air	600
Bi 0.2 C 0.3 AnFg 400 °C	0.2	0.3	N ₂ 5%, H ₂ 95%	400
Bi 0.2 C 0.3 AnFg 500 °C	0.2	0.3	N ₂ 5%, H ₂ 95%	500
Bi 0.2 C 0.3 AnFg 600 °C	0.2	0.3	N ₂ 5%, H ₂ 95%	600
Bi 0.2 C 0.0	0.2	-	Air	600
Bi 0.2 C 0.05	0.2	0.05	Air	600
Bi 0.2 C 0.1	0.2	0.1	Air	600
Bi 0.2 C 0.2	0.2	0.2	Air	600
Bi 0.2 C 0.5	0.2	0.5	Air	600
Bi 0.2 C 0.7	0.2	0.7	Air	600
Bi 0.3 C 0.3	0.3	0.3	Air	600
Bi 0.4 C 0.3	0.4	0.3	Air	600
Bi 0.6 C 0.3	0.6	0.3	Air	600

** หมายเหตุ : Bi คือ ปิสมันท์ และ C คือ CTAB (สารลดแรงตึงผิว) : AnFg คือ บรรยากาศที่มี N₂ 5% , H₂ 95%

3.3.3 วัสดุอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงตามตารางที่ 3. 6

ตารางที่ 3. 6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยในการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย비스มาทโดยเทคนิคโซล-เจล

อุปกรณ์	ขนาด	จำนวน
บีกเกอร์	30, 250, 1000 ml	อย่างละ 1 ใบ
ปิเปตต์แบบปริมาตร	1, 2, 5, 25 ml	อย่างละ 1 ชิ้น
ปิเปตต์แบบใช้ดวง	5, 25 ml	อย่างละ 1 ชิ้น
ขวดวัดปริมาตร	100, 1000 ml	1-6 ใบ
ขวดฉีดยาน้ำกลั่น	205 ml	2 ใบ
อะซิโตน	450 ml	1 ขวด
หลอดหยดสาร	-	50 ชิ้น
ฟอยล์อะลูมิเนียม	-	1 ม้วน
คีมคีบพลาสติก	-	2 ชิ้น
ลูกยางปิเปตต์	-	1 ชิ้น
หลอดไฟฮาโลเจน	50 W	1 ชิ้น
หน้ากากปิดปาก		
คิวเวทท์สำหรับเครื่อง UV-VIS		
ผงเมทิลีนบลู C16H18N3SCL		
ช้อนตักสาร		
มีดตัดกระจก		
ถังแก๊สออกซิเจน		
เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง		

3.3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1.) เตรียมสารเมทิลีนบลู โดยนำผงเมทิลีนบลูไปชั่งเครื่องชั่งสี่ตำแหน่งประมาณ 0.3735 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ 25 ml แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อละลายเมทิลีนบลู หลังจากนั้นนำไปปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 1000 ml แล้วห่อด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมให้มิดชิด จะได้ Standard stock ที่มีความเข้มข้น 1000 μM

2.) นำ Standard stock มาเจือจางให้มีความเข้มข้น 5 , 10, 15, 20, 30 และ 50 μM ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดวัดปริมาตร ห่อด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมให้มิดชิด ได้เป็น standard ที่ใช้กับเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

3.) ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ได้มา มาตัดเป็นสี่เหลี่ยมให้มีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร

4.) เตรียมการทดลองโดยการตั้งหลอดไฟห่างจากพื้นเป็นระยะ 1 ฟุต แล้ววางบีกเกอร์ ห่างจากหลอดไฟเป็นระยะประมาณ 10 cm

5.) ทำการปิเปตสารตัวอย่างที่จะใช้เป็นตัว standard ในการทดลอง ใช้ที่ความเข้มข้น 2.0 μM มาใส่ในบีกเกอร์ ปริมาณ 10 ml ต่อสายออกซิเจนมาที่บีกเกอร์ไว้

6.) ทำการวัดค่าสารตัวที่เป็น standard โดยใช้ หลอดหยด ดูขึ้นมาจากบีกเกอร์ใน ข้อที่ 5 ใส่ในคิวเวทท์ แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แล้วนำกลับมาเทกลับคืนที่บีกเกอร์ใน ข้อที่ 5 บันทึกผลที่ได้ลงตารางที่ 3.7

7.) จากนั้นทำการเปิดออกซิเจน ครบเวลา 10 นาที วัดค่าให้เหมือนกับใน ข้อที่ 6 แล้วทำการบันทึกผลตามตารางบันทึกผลนี้



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างตารางบันทึกผลข้อมูล

ตัวอย่าง	เวลา(นาที)	Absorbance			เฉลี่ย	ความเข้มข้น
		1	2	3		
1	0					
2	10 ตัวอย่าง + O ₂ (g)					
3	20 ตัวอย่าง + O ₂ (g) + แผ่น					
4	4 ตัวอย่าง + O ₂ (g) + แผ่น(เปิดไฟ)					
5	8					
6	12					
7	16					
8	20					
9	24					
10	28					
11	30					
12	45					
13	60					
14	75					
15	90					
16	120					
17	150					
18	180					

3.3.4 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำ ด้วยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นาโนที่เจือด้วยบิสมัท โดยการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคโซล-เจล และเติมสารลดแรงตึงผิวภายใต้เงื่อนไขตามในหัวข้อ 3.3.2 ได้ผลดังนี้

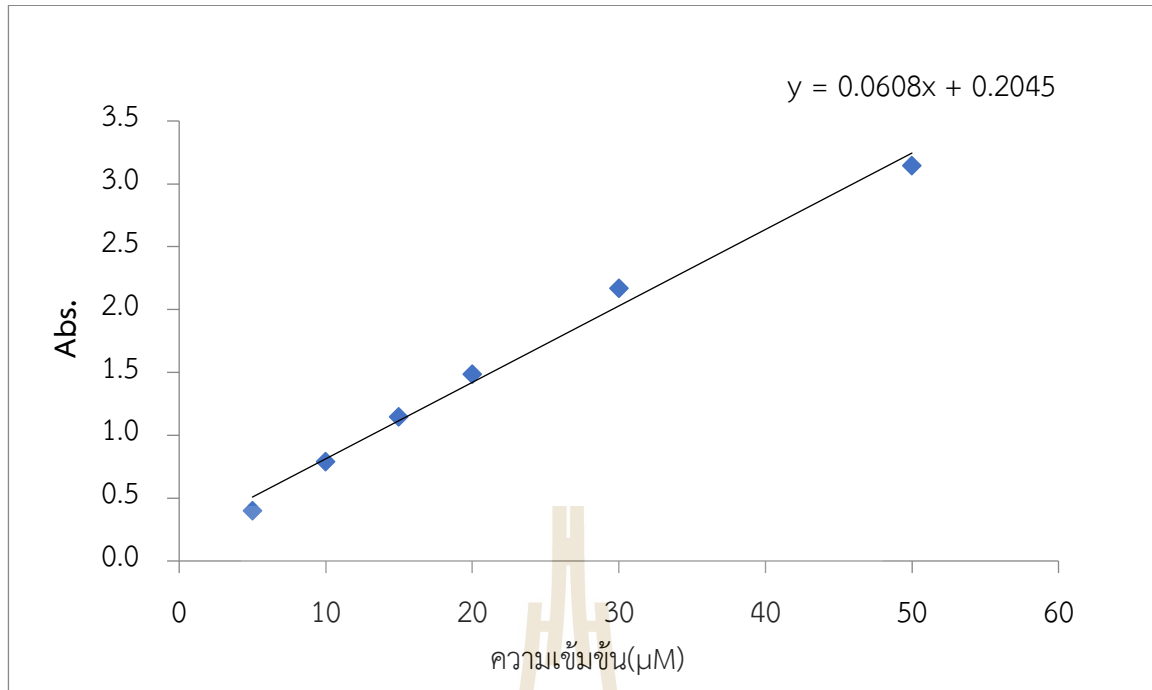
3.3.4.1 ผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 1 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติมสารเจือด้วย Bi 0.2 (at%) และปริมาณ CTAB ในปริมาณต่างๆ

ผลการทดสอบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นาโนที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% เตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจลและเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ในปริมาณช่วง 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 และ 0.6 wt% โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูในช่วง 5, 10, 15, 20, 30 และ 50 μM ดังตารางที่ 3.8, 3.9, 3.11, 3.13, 3.15 และ 3.17 และนำค่าการดูดกลืนแสงไปสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น ดังรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 และ 3.12

ตารางที่ 3.8 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ ไม่เติม CTAB

Standard Bi 0.2 C 0.0				
ความเข้มข้น(μM)	Absorbance			ADS. (ค่าเฉลี่ย)
	1	2	3	
5	0.4007	0.4005	0.4006	0.4006
10	0.7910	0.7909	0.7910	0.7910
15	1.1463	1.1460	1.1461	1.1461
20	1.4842	1.4849	1.4846	1.4846
30	2.1662	2.1681	2.1668	2.1670
50	3.1462	3.1419	3.1393	3.1425

การวัดค่า Absorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ เพื่อสร้าง Calibration curve



รูปที่ 3.7 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบ

ตัวอย่าง Bi 0.2 C 0.0

เมื่อ

X = ความเข้มข้น (μM)

Y = ค่า Absorbance

X = $(Y - 0.2045)/0.0608$

หมายเหตุ : ค่าจุดตัดกับความชันจะไม่เท่ากันทุกชิ้นงานขึ้นกับ Standard ที่เตรียม

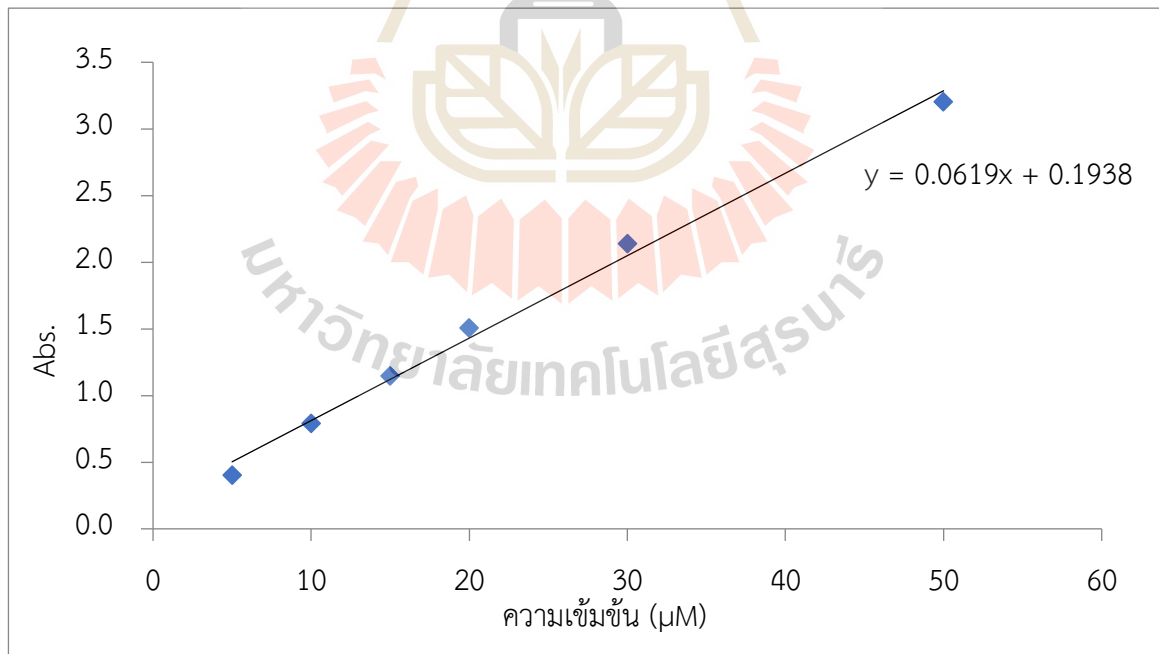
ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือบิสมัท 0.2at% และไม่ได้เติมสารลดแรงตึงผิว CTAB โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลู ในสภาวะที่มีออกซิเจน ภายใต้แสงที่มีความเข้มของแสง 3.89 mW/cm^2 โดยเก็บตัวอย่างสีย้อมออกมาวัดค่าการดูดกลืนแสงทุกๆ 2 นาที ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3. 9

ตารางที่ 3. 9 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และไม่ได้เติมสารลดแรงตึงผิว ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

Bi 0.2 C 0.0						
ลำดับ	เวลา (นาที)	Absorbance				ค่าความเข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs. (ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0 นาที	1.4572	1.4574	1.4542	1.4563	20.5883
2	หลังให้ออกซิเจน 10 นาที	1.3734	1.3736	1.3741	1.3737	19.2303
3	หลังให้ออกซิเจน+แช่แผ่น 20 นาที	1.3337	1.3342	1.3348	1.3342	18.5811
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่แผ่น+เปิดไฟ 24 นาที	1.3214	1.3212	1.3217	1.3214	18.3706
5	28	1.3001	1.3000	1.2998	1.3000	18.0175
6	32	1.2889	1.2887	1.2889	1.2888	17.8344
7	36	1.2676	1.2680	1.2678	1.2678	17.4885
8	40	1.2523	1.2521	1.2525	1.2523	17.2336
9	44	1.2284	1.2288	1.2285	1.2286	16.8432
10	48	1.2202	1.2201	1.2201	1.2201	16.7045
11	50	1.1929	1.1939	1.1948	1.1939	16.2725
12	65	1.1712	1.1713	1.1716	1.1714	15.9024
13	80	1.148	1.1483	1.1486	1.1483	15.5230
14	95	1.1215	1.1218	1.1222	1.1218	15.0877
15	110	1.1066	1.1070	1.1069	1.1068	14.8410
16	140	1.0773	1.0783	1.0792	1.0783	14.3712
17	170	1.0425	1.0431	1.0433	1.0430	13.7906
18	200	0.9807	0.9808	0.9815	0.9810	12.7714

ตารางที่ 3.10 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.05 wt%

Standard Bi 0.2 C0.05				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.4049	0.4049	0.4048	0.4049
10	0.7945	0.7943	0.7945	0.7944
15	1.1492	1.149	1.1489	1.1490
20	1.5096	1.5095	1.5093	1.5095
30	2.1404	2.1397	2.1411	2.1404
50	3.2082	3.2072	3.2054	3.2069



$$X = (Y - 0.1938)/0.0619$$

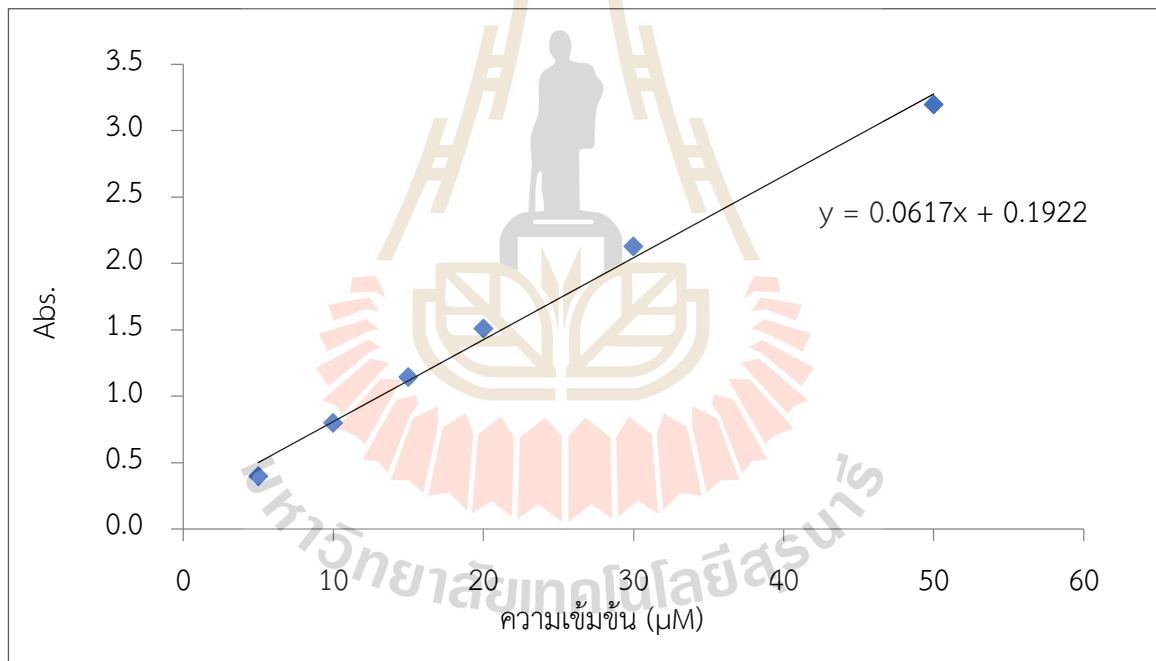
รูปที่ 3.8 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับการทดสอบตัวอย่าง Bi 0.2 C 0.05

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.05 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

Bi 0.2 C 0.05						
ลำดับ	เวลา/นาที	Absorbance				ค่าความเข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4214	1.4217	1.422	1.4217	19.8368
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3754	1.3756	1.3762	1.3757	19.0942
3	หลังให้ออกซิเจน+ แช่แผ่น 20	1.3397	1.3395	1.3392	1.3395	18.5083
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.3317	1.3323	1.3318	1.3319	18.3866
5	28	1.2979	1.2978	1.2982	1.2980	17.8379
6	32	1.2789	1.279	1.2788	1.2789	17.5299
7	36	1.2632	1.2629	1.2628	1.2630	17.2725
8	40	1.2355	1.2361	1.2362	1.2359	16.8358
9	44	1.2235	1.2236	1.2236	1.2236	16.6360
10	48	1.1876	1.1874	1.1841	1.1864	16.0350
11	50	1.1815	1.182	1.1816	1.1817	15.9596
12	65	1.1132	1.1133	1.1134	1.1133	14.8546
13	80	1.0426	1.0423	1.0422	1.0424	13.7087
14	95	0.9747	0.9748	0.9746	0.9747	12.6155
15	110	0.9183	0.918	0.9185	0.9183	11.7038
16	140	0.8778	0.8779	0.8786	0.8781	11.0549
17	170	0.7077	0.7064	0.7058	0.7066	8.2849
18	200	0.636	0.6363	0.6363	0.6362	7.1470

ตารางที่ 3.12 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.1 wt%

Standard Bi 0.2 C 0.1				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.3974	0.3975	0.3974	0.3974
10	0.7966	0.7967	0.7961	0.7965
15	1.1433	1.1432	1.1432	1.1432
20	1.5107	1.5106	1.5107	1.5107
30	2.1282	2.1276	2.1292	2.1283
50	3.1956	3.1997	3.1947	3.1967



$$X = (Y - 0.1922)/0.0617$$

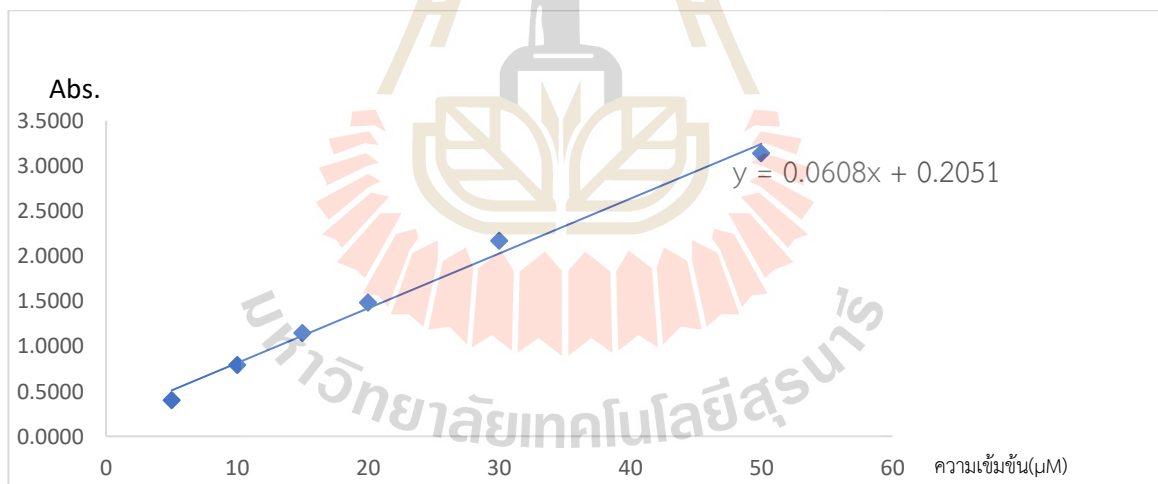
รูปที่ 3.9 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.1 wt%

ตารางที่ 3.13 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ สารลดแรงตึงผิว 0.1 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

Bi 0.2 C 0.1						
ลำดับ	เวลา/นาที	Absorbance				ค่าความเข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4545	1.4545	1.4544	1.4545	20.4581
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3132	1.3126	1.3125	1.3128	18.1615
3	หลังให้ออกซิเจน+แช่แผ่น 20	1.2645	1.2649	1.2645	1.2646	17.3814
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่แผ่น+เปิดไฟ 24	1.2299	1.2304	1.2308	1.2304	16.8260
5	28	1.2133	1.2134	1.2136	1.2134	16.5516
6	32	1.1897	1.1893	1.1893	1.1894	16.1626
7	36	1.167	1.167	1.1668	1.1669	15.7979
8	40	1.158	1.1576	1.158	1.1579	15.6510
9	44	1.1481	1.1478	1.1485	1.1481	15.4932
10	48	1.1178	1.1169	1.1169	1.1172	14.9919
11	50	1.0999	1.1006	1.1	1.1002	14.7158
12	65	1.0612	1.0621	1.0616	1.0616	14.0913
13	80	1.0247	1.0247	1.0253	1.0249	13.4959
14	95	0.9901	0.9998	0.9904	0.9934	12.9860
15	110	0.9454	0.9434	0.9433	0.9440	12.1853
16	140	0.8938	0.8935	0.8938	0.8937	11.3695
17	170	0.8327	0.8328	0.8328	0.8328	10.3820
18	200	0.767	0.7668	0.7667	0.7668	9.3133

ตารางที่ 3.14 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.2 wt%

Standard Bi 0.2 C 0.2				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.4007	0.4005	0.4006	0.4006
10	0.791	0.7909	0.791	0.7910
15	1.1463	1.146	1.1461	1.1461
20	1.4842	1.4849	1.4846	1.4846
30	2.1662	2.1681	2.1668	2.1670
50	3.1402	3.1419	3.1393	3.1405



$$X = (Y - 0.2051)/0.0608$$

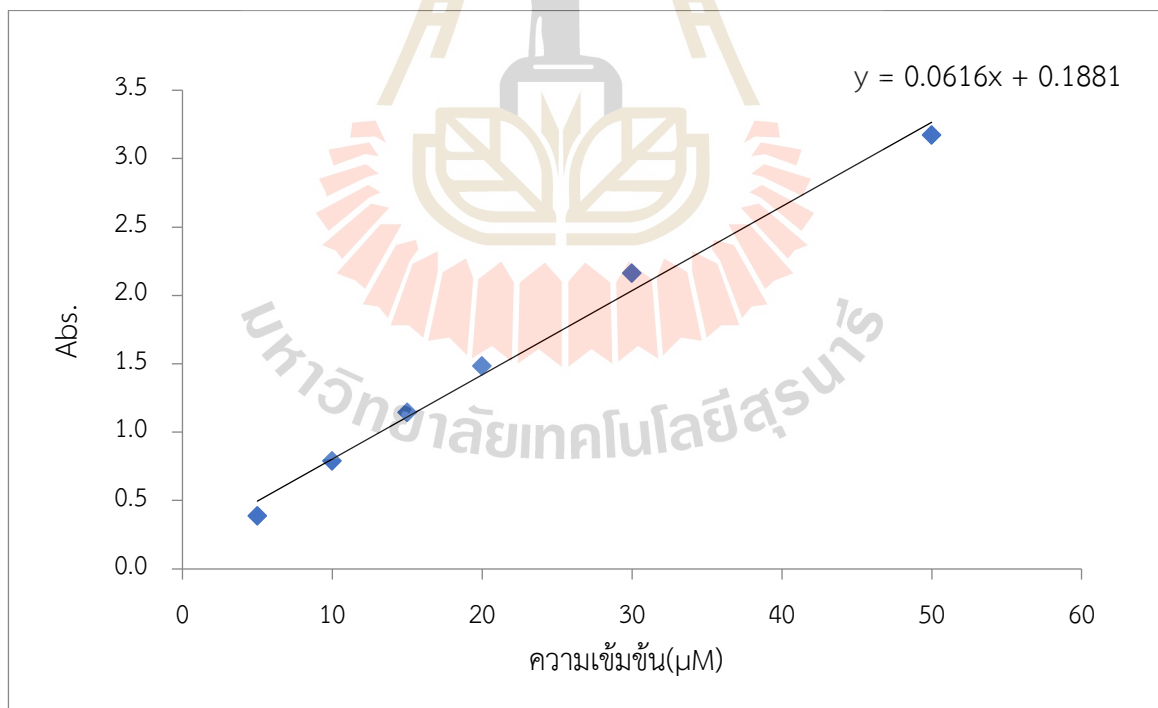
รูปที่ 3.10 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at%และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.2 wt%

ตารางที่ 3.15 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi0.2 at% และ สารลดแรงตึงผิว 0.2 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

Bi 0.2 C 0.2						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4484	1.4488	1.4485	1.4486	20.4518
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.2595	1.2603	1.261	1.2603	17.3547
3	หลังให้ออกซิเจน+แซ่ แผ่น 20	1.2299	1.2299	1.2302	1.2300	16.8569
4	หลังให้ออกซิเจน+แซ่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.1939	1.1936	1.1936	1.1937	16.2599
5	28	1.1674	1.1674	1.1674	1.1674	15.8273
6	32	1.127	1.1266	1.1269	1.1268	15.1601
7	36	1.117	1.1181	1.1177	1.1176	15.0082
8	40	1.0864	1.0861	1.0863	1.0863	14.4929
9	44	1.0796	1.0796	1.0798	1.0797	14.3843
10	48	1.0684	1.0682	1.068	1.0682	14.1957
11	50	1.0517	1.0517	1.052	1.0518	13.9260
12	65	1.0049	1.0054	1.0053	1.0052	13.1595
13	80	0.9668	0.9669	0.9667	0.9668	12.5280
14	95	0.9252	0.9258	0.9242	0.9251	11.8416
15	110	0.8818	0.8821	0.8814	0.8818	11.1294
16	140	0.7935	0.7955	0.7928	0.7939	9.6848
17	170	0.7193	0.7189	0.7191	0.7191	8.4539
18	200	0.6536	0.6534	0.6537	0.6536	7.3761

ตารางที่ 3.16 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.5 wt%

Standard Bi 0.2 C 0.5				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.3884	0.3881	0.388	0.38817
10	0.7868	0.7866	0.7866	0.78667
15	1.1421	1.1423	1.142	1.14213
20	1.4843	1.4843	1.4845	1.48437
30	2.1596	2.1599	2.16	2.15983
50	3.1703	3.1663	3.1726	3.16973



$$X = (Y - 0.1881)/0.0616$$

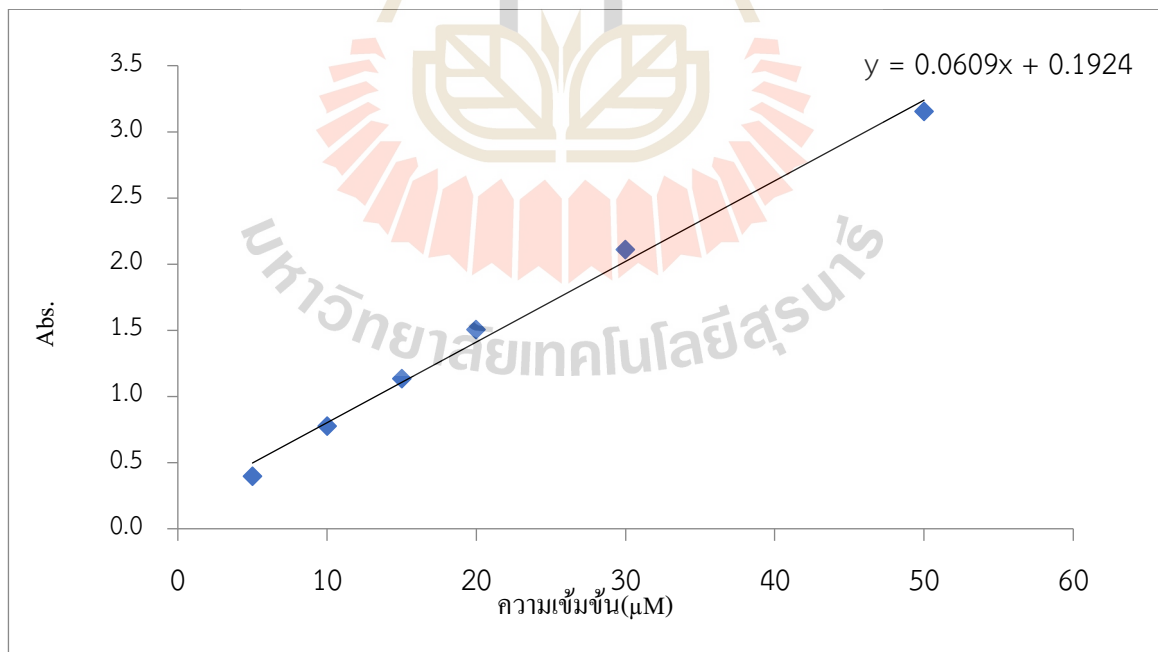
รูปที่ 3.11 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at%และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.5 wt%

ตารางที่ 3.17 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi0.2 at% และ สารลดแรงตึงผิว 0.5 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

Bi 0.2 C 0.5						
ลำดับ	เวลา/นาทีก่อน/หลังให้ออกซิเจน	Absorbance				ค่าความเข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4801	1.4796	1.4798	1.4798	20.9697
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.2501	1.2498	1.2506	1.2502	17.2413
3	หลังให้ออกซิเจน+แช่แผ่น 20	1.1861	1.1854	1.1871	1.1862	16.1365
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่แผ่น+เปิดไฟ 24	1.1643	1.1647	1.1649	1.1646	15.8528
5	28	1.1339	1.1332	1.1334	1.1335	15.3474
6	32	1.1057	1.1054	1.1054	1.1055	14.8929
7	36	1.0769	1.0772	1.0773	1.0771	14.4324
8	40	1.0592	1.0591	1.0608	1.0597	14.1494
9	44	1.0254	1.0252	1.0236	1.0247	13.5817
10	48	0.99	0.9903	0.9902	0.9902	13.0206
11	50	0.9674	0.9671	0.9678	0.9674	12.6515
12	65	0.8987	0.9007	0.9016	0.9003	11.5622
13	80	0.8351	0.8353	0.8357	0.8354	10.5076
14	95	0.7806	0.781	0.7815	0.7810	9.6255
15	110	0.7216	0.7236	0.7211	0.7221	8.6688
16	140	0.6236	0.6238	0.6246	0.6240	7.0763
17	170	0.5448	0.5468	0.5446	0.5454	5.8003
18	200	0.5016	0.5004	0.5016	0.5012	5.0828

ตารางที่ 3.18 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.7 wt%

Standard Bi 0.2 C 0.7				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.396	0.3957	0.3956	0.3958
10	0.7759	0.7758	0.7757	0.7758
15	1.1359	1.1362	1.1361	1.1361
20	1.5031	1.5033	1.5034	1.5033
30	2.111	2.1114	2.1097	2.1107
50	3.1552	3.1553	3.1539	3.1548



$$X = (Y - 0.1924)/0.0609$$

รูปที่ 3.12 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิว 0.7 wt%

ตารางที่ 3.19 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ สารลดแรงตึงผิว 0.7 wt% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

Bi 0.2 C 0.7						
ลำดับ	เวลา/นาที	Absorbance				ค่าความ เข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.456	1.4557	1.4562	1.4560	20.7482
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3222	1.322	1.322	1.3221	18.5495
3	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น 20	1.2991	1.2991	1.2994	1.2992	18.1741
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.2781	1.2779	1.2781	1.2780	17.8265
5	28	1.2601	1.2598	1.2598	1.2599	17.5287
6	32	1.2416	1.2417	1.2421	1.2418	17.2315
7	36	1.2229	1.2226	1.2224	1.2226	16.9168
8	40	1.2011	1.2012	1.2016	1.2013	16.5665
9	44	1.1848	1.1846	1.1847	1.1847	16.2939
10	48	1.1698	1.1698	1.1697	1.1698	16.0487
11	50	1.1602	1.1602	1.1596	1.1600	15.8883
12	65	1.1059	1.1062	1.1065	1.1062	15.0049
13	80	1.0318	1.0315	1.0312	1.0315	13.7783
14	95	0.9829	0.9829	0.9829	0.9829	12.9803
15	110	0.942	0.9423	0.9416	0.9420	12.3082
16	140	0.8509	0.8509	0.8506	0.8508	10.8112
17	170	0.7677	0.7677	0.7674	0.7676	9.4450
18	200	0.7426	0.7431	0.7428	0.7428	9.0383

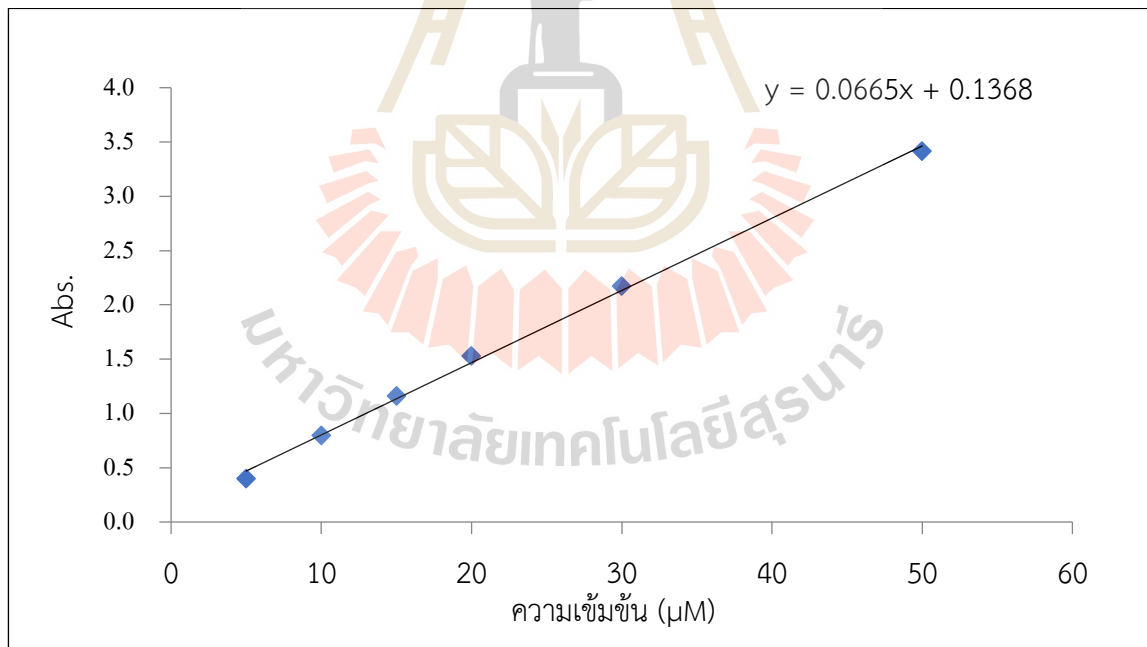
3.3.4.2 ผลการทดสอบเงื่อนไซท์ 2 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 และเจือด้วย Bi (at%) ในปริมาณต่างๆ

การทดสอบการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมด้วยบิสมัทในปริมาณต่างๆ เตรียมด้วยเทคนิคโซลเจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.3 wt% โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานที่มีความเข้มข้นในช่วง 5, 10, 15, 20, 30 และ 50 μM ดังแสดงในตารางที่ 3.19, 3.21, 3.23, 3.25, 3.27 และ 3.29 และนำค่าการดูดกลืนแสง

ไปสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น ดังรูปที่ 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.20 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ปราศจากสารเจือ และ CTAB 0.3 wt%

Standard C 0.3 Bi 0.0				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.3986	0.3984	0.3986	0.3985
10	0.794	0.7938	0.7936	0.7938
15	1.1601	1.1605	1.1604	1.1603
20	1.5301	1.5289	1.5295	1.5295
30	2.1709	2.1717	2.1719	2.1715
50	3.4152	3.4174	3.4171	3.4166



$$X = (Y - 0.1368)/0.0665$$

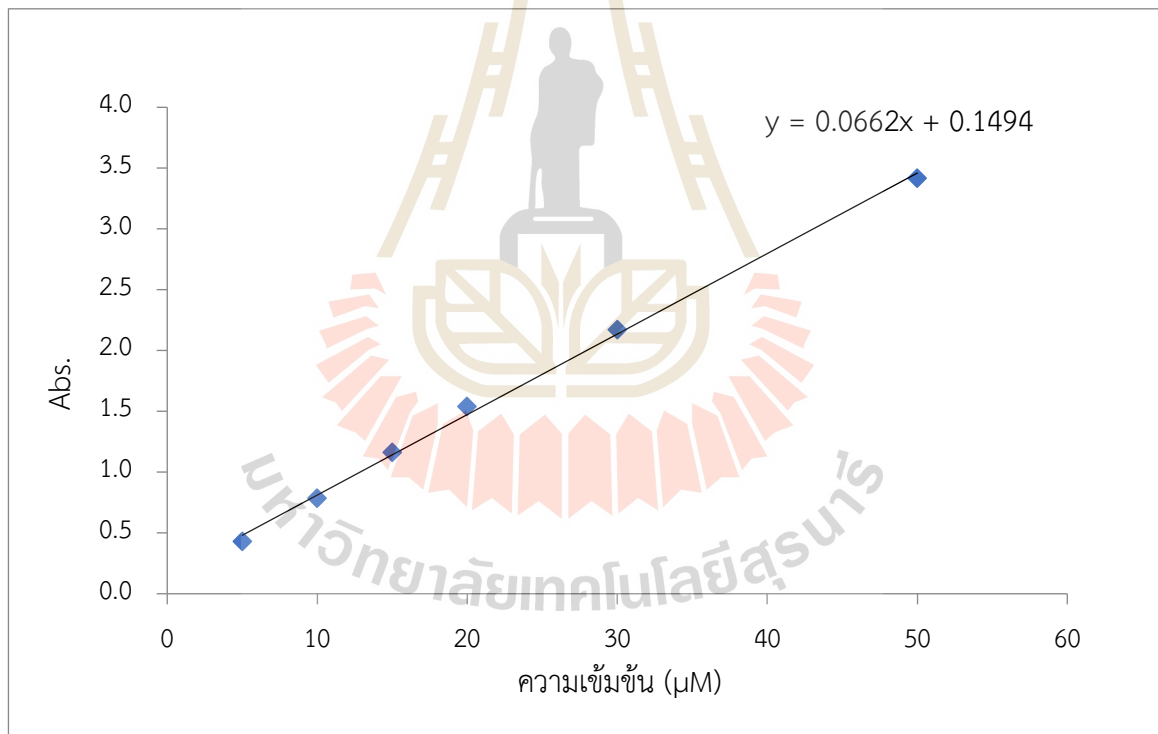
รูปที่ 3.13 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบตัวอย่างฟิล์มบาง ZnO เติม CTAB 0.3 wt% ที่ปราศจากสารเจือ

ตารางที่ 3.21 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และปราศจากสารเจือ ภายใต้งานที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.0						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4712	1.4707	1.4709	1.4709	20.0622
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3736	1.3738	1.3736	1.3737	18.5995
3	หลังให้ออกซิเจน+ แช่แผ่น 20	1.3208	1.3208	1.3211	1.3209	17.8060
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.3145	1.315	1.3146	1.3147	17.7128
5	28	1.3021	1.3022	1.3019	1.3021	17.5228
6	32	1.2908	1.2911	1.2915	1.2911	17.3584
7	36	1.2737	1.2734	1.273	1.2734	17.0912
8	40	1.2542	1.2541	1.2533	1.2539	16.7980
9	44	1.2429	1.2431	1.2429	1.2430	16.6341
10	48	1.232	1.2321	1.232	1.2320	16.4697
11	50	1.2262	1.2258	1.2261	1.2260	16.3794
12	65	1.1709	1.1709	1.1706	1.1708	15.5489
13	80	1.1252	1.1247	1.1253	1.1251	14.8612
14	95	1.0764	1.0764	1.0763	1.0764	14.1288
15	110	1.0285	1.0284	1.0282	1.0284	13.4070
16	140	0.938	0.9378	0.9379	0.9379	12.0466
17	170	0.8507	0.8502	0.8501	0.8503	10.7298
18	200	0.7701	0.7696	0.7699	0.7699	9.5198

ตารางที่ 3.22 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.1 at%

Standard C 0.3 Bi 0.1				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.4292	0.429	0.429	0.4291
10	0.7849	0.785	0.7853	0.7851
15	1.1609	1.1607	1.1605	1.1607
20	1.5402	1.5401	1.5401	1.5401
30	2.1712	2.1713	2.1715	2.1713
50	3.4157	3.4158	3.416	3.4158



$$X = (Y - 0.1494)/0.0662$$

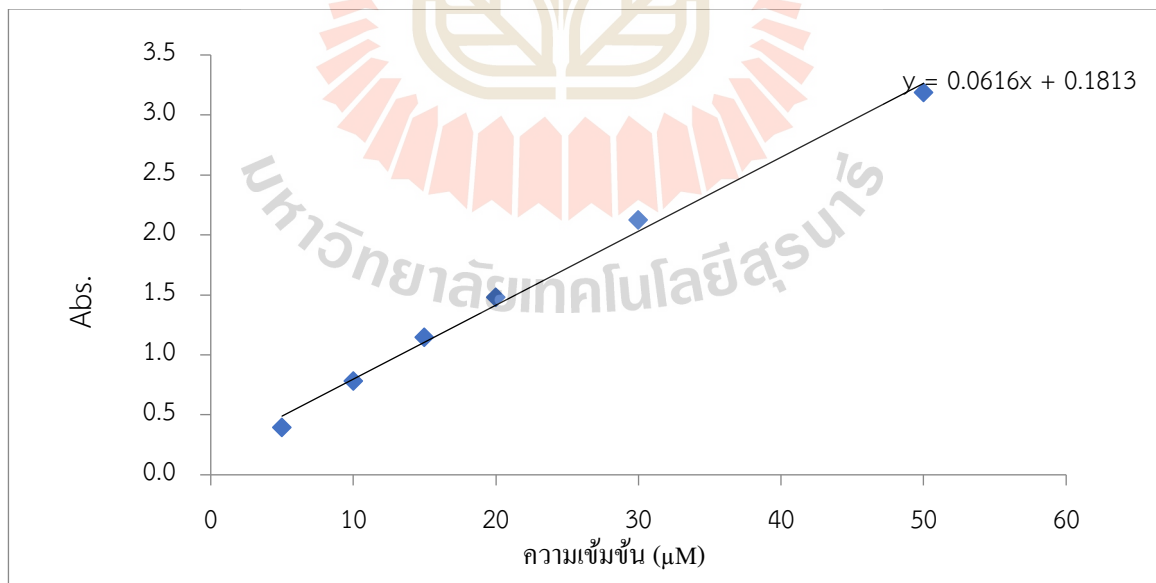
รูปที่ 3.14 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.1 at%

ตารางที่ 3.23 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.1 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.1						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4585	1.4581	1.4587	1.4584	19.7739
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3735	1.3734	1.3733	1.3734	18.4894
3	หลังให้ออกซิเจน+แซ่ แผ่น 20	1.3621	1.3624	1.3619	1.3621	18.3192
4	หลังให้ออกซิเจน+แซ่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.3516	1.353	1.3521	1.3522	18.1697
5	28	1.3432	1.3432	1.3435	1.3433	18.0347
6	32	1.3333	1.3331	1.333	1.3331	17.8812
7	36	1.3241	1.3238	1.3234	1.3238	17.7397
8	40	1.3179	1.3182	1.3177	1.3179	17.6516
9	44	1.3034	1.3027	1.3026	1.3029	17.4245
10	48	1.2948	1.2949	1.2943	1.2947	17.3001
11	50	1.2919	1.2921	1.2919	1.2920	17.2593
12	65	1.2569	1.2564	1.2567	1.2567	16.7261
13	80	1.2253	1.2249	1.225	1.2251	16.2487
14	95	1.1894	1.1885	1.1891	1.1890	15.7039
15	110	1.1591	1.1586	1.1603	1.1593	15.2558
16	140	1.0916	1.0912	1.0916	1.0915	14.2306
17	170	1.0248	1.0248	1.0248	1.0248	13.2236
18	200	0.9616	0.9614	0.9614	0.9615	12.2669

ตารางที่ 3.24 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at%

Standard C 0.3 Bi 0.2				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.3908	0.3911	0.3915	0.3911
10	0.7813	0.7812	0.7812	0.7812
15	1.1451	1.1446	1.1449	1.1449
20	1.4772	1.4767	1.4767	1.4769
30	2.1237	2.1229	2.1237	2.1234
50	3.183	3.1863	3.1845	3.1846



$$X = (Y - 0.1813)/0.0616$$

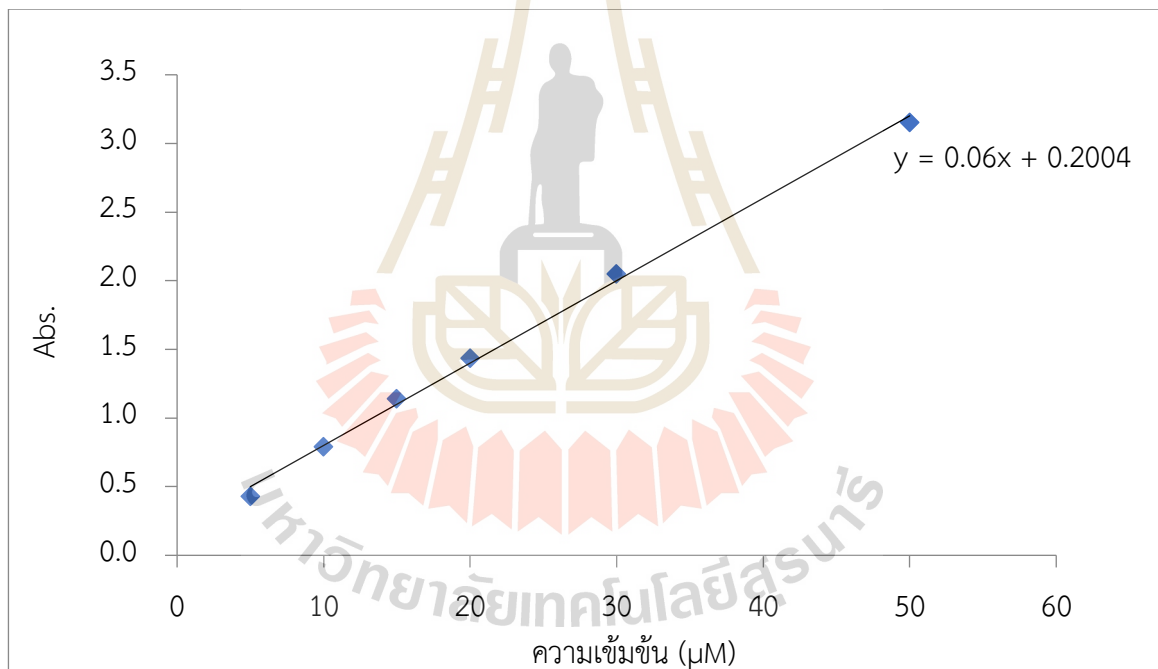
รูปที่ 3.15 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at%

ตารางที่ 3.25 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.2 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.2						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความ เข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4237	1.4233	1.4235	1.4235	20.1656
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3931	1.3933	1.3933	1.3932	19.6742
3	หลังให้ ออกซิเจน+แช่ แผ่น 20	1.3292	1.3297	1.3293	1.3294	18.6380
4	หลังให้ ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.3049	1.3049	1.3047	1.3048	18.2392
5	28	1.2796	1.2792	1.2794	1.2794	17.8263
6	32	1.2545	1.2537	1.2539	1.2540	17.4145
7	36	1.218	1.218	1.2175	1.2178	16.8268
8	40	1.1923	1.1923	1.1928	1.1925	16.4150
9	44	1.1717	1.1713	1.1714	1.1715	16.0741
10	48	1.143	1.1429	1.1427	1.1429	15.6098
11	50	1.1322	1.1323	1.1326	1.1324	15.4394
12	65	1.0889	1.0888	1.0884	1.0887	14.7305
13	80	1.0185	1.0183	1.0185	1.0184	13.5898
14	95	0.9582	0.9578	0.9576	0.9579	12.6066
15	110	0.9094	0.9093	0.9093	0.9093	11.8187
16	140	0.8197	0.8195	0.8196	0.8196	10.3620
17	170	0.7294	0.7294	0.7294	0.7294	8.8977
18	200	0.6219	0.622	0.6218	0.6219	7.1526

ตารางที่ 3.26 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.3 at%

Standard C 0.3 Bi 0.3				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.4318	0.4318	0.4313	0.4316
10	0.7904	0.7901	0.79	0.7902
15	1.1425	1.1426	1.1423	1.1425
20	1.4365	1.4362	1.4367	1.4365
30	2.049	2.0487	2.0482	2.0486
50	3.155	3.154	3.1531	3.1540



$$X = (Y - 0.2004)/0.06$$

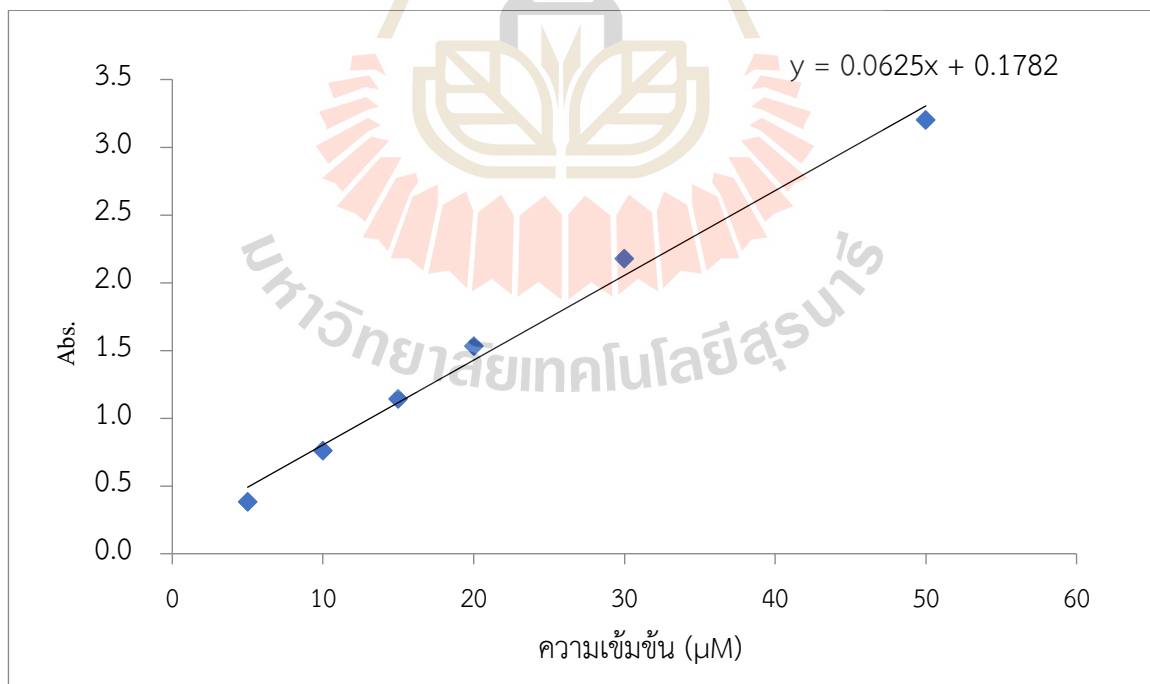
รูปที่ 3.16 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบตัวอย่างฟิล์มบาง ZnO เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.3 at%

ตารางที่ 3.27 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.3 at% ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.3						
ลำดับ	เวลา/นาที	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.391	1.3904	1.3904	1.3906	19.8367
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3733	1.3735	1.374	1.3736	19.5533
3	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น 20	1.3572	1.3579	1.3571	1.3574	19.2833
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.3356	1.3357	1.3355	1.3356	18.9200
5	28	1.3242	1.3245	1.3245	1.3244	18.7333
6	32	1.3077	1.3079	1.3077	1.3078	18.4561
7	36	1.2889	1.2891	1.2887	1.2889	18.1417
8	40	1.2794	1.2788	1.2784	1.2789	17.9744
9	44	1.2654	1.2651	1.2651	1.2652	17.7467
10	48	1.25	1.2502	1.2501	1.2501	17.4950
11	50	1.2492	1.2481	1.2488	1.2487	17.4717
12	65	1.2091	1.2089	1.2093	1.2091	16.8117
13	80	1.1466	1.1469	1.1471	1.1469	15.7744
14	95	1.0923	1.0918	1.0923	1.0921	14.8622
15	110	1.0482	1.0482	1.0485	1.0483	14.1317
16	140	0.9705	0.9698	0.9704	0.9702	12.8306
17	170	0.886	0.8859	0.8862	0.8860	11.4272
18	200	0.8066	0.8061	0.8068	0.8065	10.1017

ตารางที่ 3.28 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเงื่อนไข CTAB 0.3 wt% เดิมสารเจือ Bi 0.4 at%

Standard C 0.3 Bi 0.4				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.3827	0.3827	0.3826	0.3827
10	0.7628	0.7628	0.7626	0.7627
15	1.1442	1.1446	1.1445	1.1444
20	1.5319	1.5319	1.5314	1.5317
30	2.1763	2.171	2.1768	2.1747
50	3.2023	3.2095	3.2013	3.2044



$$X = (Y - 0.1782)/0.0625$$

รูปที่ 3.17 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำกาทดสอบ ตัวอย่างฟิล์มบาง ZnO เดิม CTAB 0.3 wt% เดิมสารเจือ Bi 0.4 at%

ตารางที่ 3.29 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.4 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.4						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความ เข้มข้น(μM)
		1	2	3	Abs. (ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4192	1.4196	1.4195	1.4194	19.8597
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3744	1.3746	1.3746	1.3745	19.1413
3	หลังให้ออกซิเจน+แซ่แผ่น 20	1.3637	1.3638	1.3641	1.3639	18.9707
4	หลังให้ออกซิเจน+แซ่แผ่น+ เปิดไฟ 24	1.3513	1.3511	1.3515	1.3513	18.7696
5	28	1.3355	1.3362	1.3357	1.3358	18.5216
6	32	1.3203	1.3198	1.3199	1.3200	18.2688
7	36	1.3087	1.3085	1.3087	1.3086	18.0869
8	40	1.2995	1.2993	1.2997	1.2995	17.9408
9	44	1.2819	1.2817	1.2815	1.2817	17.6560
10	48	1.2677	1.267	1.2678	1.2675	17.4288
11	50	1.2587	1.2582	1.2582	1.2584	17.2827
12	65	1.2106	1.2107	1.2104	1.2106	16.5179
13	80	1.164	1.1639	1.1636	1.1638	15.7701
14	95	1.1114	1.1111	1.1109	1.1111	14.9269
15	110	1.06	1.0595	1.059	1.0595	14.1008
16	140	0.9666	0.9667	0.9665	0.9666	12.6144
17	170	0.8848	0.8848	0.8844	0.8847	11.3035
18	200	0.7969	0.7967	0.7969	0.7968	9.8981

ตารางที่ 3.30 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.6 at% ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

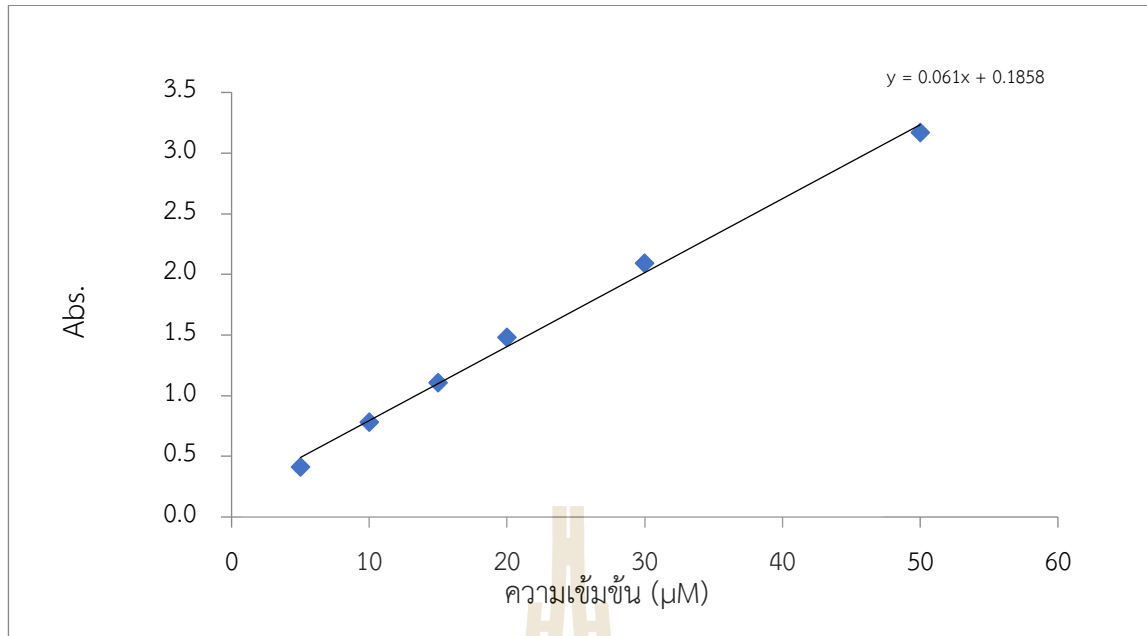
C 0.3 Bi 0.6						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (μM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4529	1.453	1.4525	1.4528	20.5921
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3129	1.3129	1.3128	1.3129	18.2906
3	หลังให้ออกซิเจน+ แช่แผ่น 20	1.2617	1.262	1.2619	1.2619	17.4518
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.2258	1.2257	1.2256	1.2257	16.8569
5	28	1.2024	1.2024	1.2021	1.2023	16.4720
6	32	1.1693	1.1694	1.1695	1.1694	15.9309
7	36	1.1353	1.1356	1.1351	1.1353	15.3706
8	40	1.102	1.1019	1.1016	1.1018	14.8196
9	44	1.0745	1.0742	1.0743	1.0743	14.3673
10	48	1.0483	1.0487	1.0495	1.0488	13.9479
11	50	1.0233	1.0231	1.023	1.0231	13.5252
12	65	0.9659	0.9661	0.9658	0.9659	12.5844
13	80	0.8824	0.882	0.8816	0.8820	11.2039
14	95	0.8181	0.8178	0.818	0.8180	10.1508
15	110	0.7909	0.7906	0.7906	0.7907	9.7023
16	140	0.7653	0.7652	0.7647	0.7651	9.2807
17	170	0.7216	0.7218	0.7219	0.7218	8.5685
18	200	0.6669	0.6665	0.6665	0.6666	7.6617

3.3.4.3 ผลการทดสอบของเงื่อนไขที่ 3 พิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติมสารเจือ Bi 0.2 at% CTAB 0.3 wt% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดสอบการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% เตรียมด้วยการเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงของโซลเจล ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.3 wt% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานที่มีความเข้มข้นในช่วง 5, 10, 15, 20, 30 และ 50 μM ดังแสดงในตารางที่ 3.31, 3.33 และ 3.35 และนำค่าการดูดกลืนแสงไปสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น ดังรูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.31 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเงื่อนไข CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิ 400°C

Standard C 0.3 Bi 0.2 AnFg 400 °c				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.4137	0.4136	0.4136	0.4136
10	0.7836	0.7834	0.7835	0.7835
15	1.1066	1.1071	1.1062	1.1066
20	1.4786	1.4785	1.4789	1.4787
30	2.0898	2.0898	2.0899	2.0898
50	3.1669	3.1654	3.1696	3.1673



$$X = (Y - 0.1858)/0.061$$

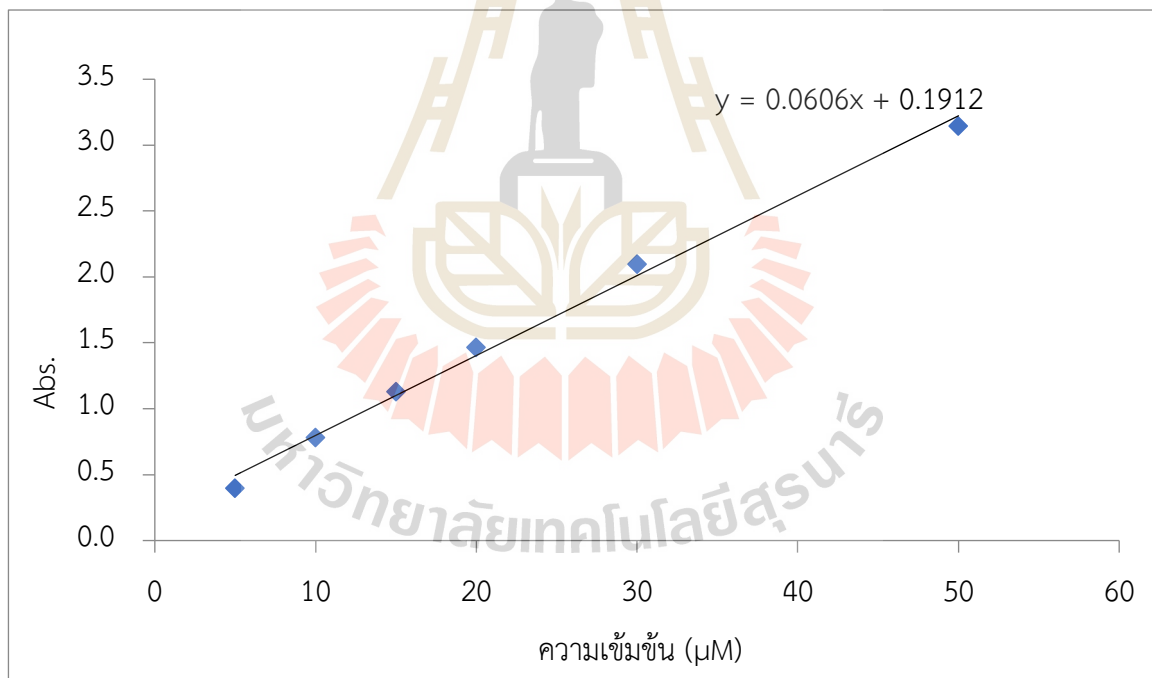
รูปที่ 3.18 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิ 400°C

ตารางที่ 3.32 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่ อุณหภูมิ 400°C ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.2 AnFg 400 °c						
ลำดับ	เวลา/นาทื	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (µM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4388	1.4381	1.4385	1.4385	20.5355
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3812	1.3807	1.381	1.3810	19.5929
3	หลังให้ออกซิเจน+ แช่แผ่น 20	1.2358	1.2363	1.2362	1.2361	17.2180
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.1885	1.1866	1.1841	1.1864	16.4033
5	28	1.1604	1.1604	1.1604	1.1604	15.9770
6	32	1.1188	1.1186	1.1182	1.1185	15.2907
7	36	1.091	1.09	1.0913	1.0908	14.8355
8	40	1.0543	1.0535	1.0535	1.0538	14.2290
9	44	1.0275	1.0285	1.029	1.0283	13.8120
10	48	0.9999	0.9995	0.9993	0.9996	13.3404
11	50	0.9798	0.9797	0.9794	0.9796	13.0137
12	65	0.9132	0.9137	0.9139	0.9136	11.9311
13	80	0.8548	0.848	0.8551	0.8526	10.9317
14	95	0.794	0.7928	0.7928	0.7932	9.9574
15	110	0.7338	0.734	0.7335	0.7338	8.9831
16	140	0.6335	0.633	0.6334	0.6333	7.3361
17	170	0.5491	0.5492	0.5493	0.5492	5.9574
18	200	0.4708	0.471	0.4705	0.4708	4.6716

ตารางที่ 3.33 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิ 500°C

Standard C 0.3 Bi 0.2 AnFg 500 °c				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.3983	0.3995	0.3992	0.3990
10	0.7854	0.7854	0.7856	0.7855
15	1.1328	1.1329	1.1332	1.1330
20	1.4659	1.4651	1.4663	1.4658
30	2.0993	2.0985	2.0979	2.0986
50	3.146	3.1485	3.1457	3.1467



$$X = (Y - 0.1912)/0.0606$$

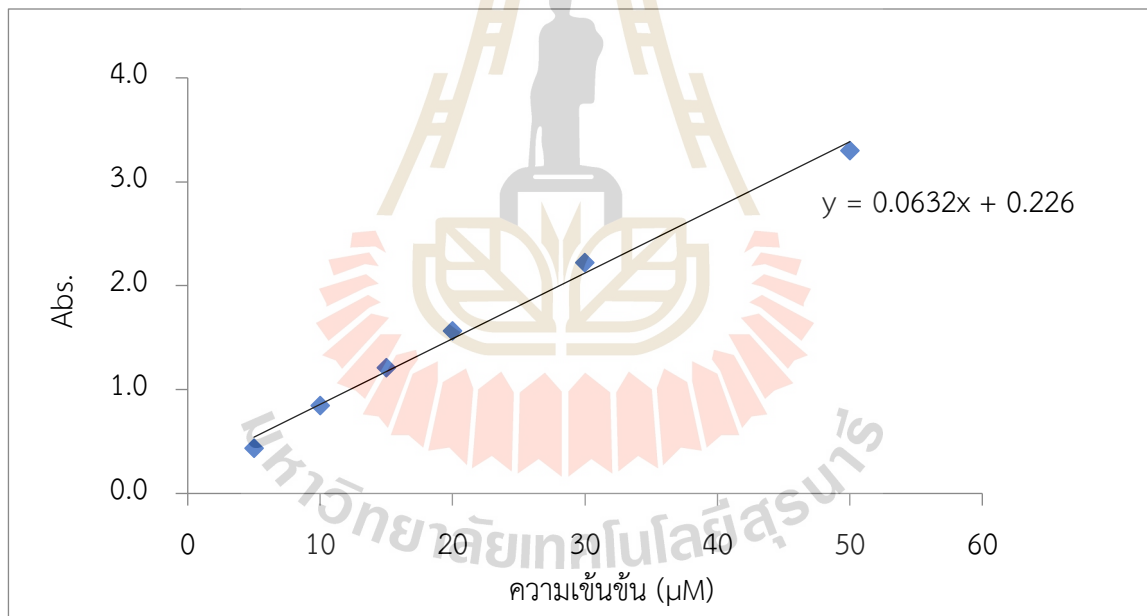
รูปที่ 3.19 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนนัลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิ 500°C

ตารางที่ 3.34 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่ อุณหภูมิ 500°C ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนและมีแสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.2 AnFg 500 °c						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (µM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.4242	1.4247	1.4247	1.4245	20.3520
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3079	1.3086	1.3086	1.3084	18.4351
3	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น 20	1.2486	1.2492	1.2488	1.2489	17.4532
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.2188	1.2191	1.2186	1.2188	16.9576
5	28	1.2052	1.2046	1.2051	1.2050	16.7288
6	32	1.1633	1.1629	1.1626	1.1629	16.0352
7	36	1.1344	1.1349	1.1338	1.1344	15.5638
8	40	1.105	1.1047	1.1059	1.1052	15.0825
9	44	1.083	1.0827	1.0817	1.0825	14.7074
10	48	1.0481	1.0478	1.0474	1.0478	14.1348
11	50	1.0244	1.0252	1.0259	1.0252	13.7618
12	65	0.9619	0.9623	0.963	0.9624	12.7261
13	80	0.9028	0.9025	0.9028	0.9027	11.7409
14	95	0.8342	0.8339	0.8343	0.8341	10.6095
15	110	0.7719	0.772	0.7721	0.7720	9.5842
16	140	0.6711	0.6714	0.6714	0.6713	7.9224
17	170	0.5779	0.5779	0.5778	0.5779	6.3806
18	200	0.4961	0.4961	0.4954	0.4959	5.0275

ตารางที่ 3.35 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการ annealing ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิ 600°C

Standard C 0.3 Bi 0.2 AnFg 600 °c				
ความเข้มข้น(um)	Absorbance			
	1	2	3	ADS.(ค่าเฉลี่ย)
5	0.4339	0.4339	0.4336	0.4338
10	0.8451	0.8448	0.8449	0.8449
15	1.2065	1.2065	1.2067	1.2066
20	1.5647	1.5648	1.5646	1.5647
30	2.2209	2.2206	2.2215	2.2210
50	3.2972	3.3022	3.2981	3.2992



$$X = (Y - 0.226)/0.0632$$

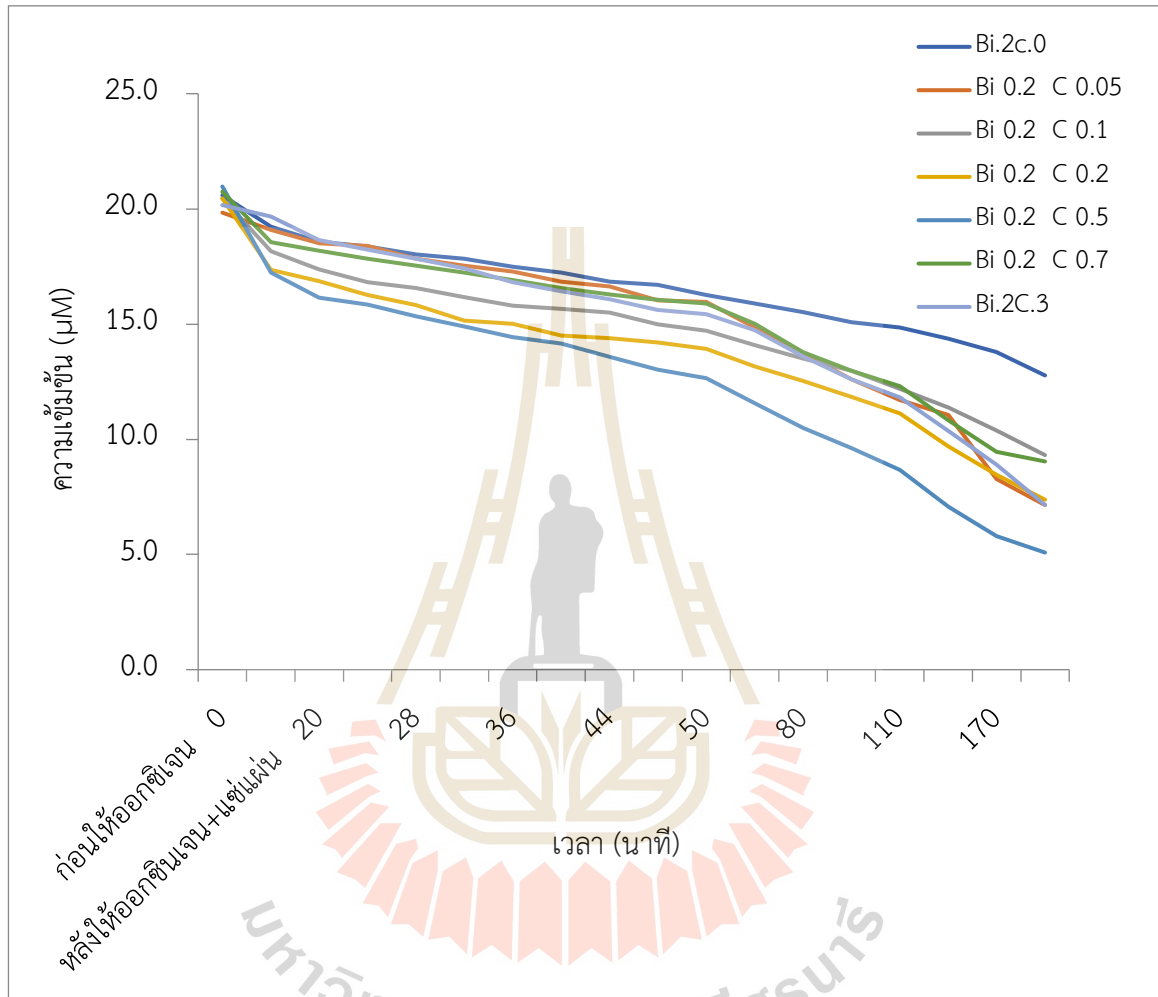
รูปที่ 3.20 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น สำหรับทำการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่อุณหภูมิ 600°C

ตารางที่ 3.36 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติม CTAB 0.3 wt% และ สารเจือ Bi 0.2 at% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H₂ 95 % กับ N₂ 5% ที่ อุณหภูมิ 600°C ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ

C 0.3 Bi 0.2 AnFg 600 °c						
ลำดับ	เวลา/นาที่	Absorbance				ค่าความเข้มข้น (µM)
		1	2	3	Abs.(ค่าเฉลี่ย)	
1	ก่อนให้ออกซิเจน 0	1.5148	1.5147	1.5151	1.5149	20.3935
2	หลังให้ออกซิเจน 10	1.3341	1.3348	1.3343	1.3344	17.5380
3	หลังให้ออกซิเจน+ แช่แผ่น 20	1.3052	1.3043	1.3051	1.3049	17.0707
4	หลังให้ออกซิเจน+แช่ แผ่น+เปิดไฟ 24	1.2679	1.2683	1.2681	1.2681	16.4889
5	28	1.2349	1.2683	1.2681	1.2571	16.3149
6	32	1.2046	1.235	1.2352	1.2249	15.8059
7	36	1.1802	1.1804	1.1796	1.1801	15.0960
8	40	1.1541	1.1541	1.1542	1.1541	14.6857
9	44	1.1232	1.123	1.1235	1.1232	14.1967
10	48	1.1003	1.1001	1.1002	1.1002	13.8323
11	50	1.0863	1.0868	1.0867	1.0866	13.6171
12	65	1.0222	1.0225	1.0226	1.0224	12.6018
13	80	0.9605	0.9604	0.9606	0.9605	11.6218
14	95	0.8976	0.8976	0.8976	0.8976	10.6266
15	110	0.8461	0.8458	0.8455	0.8458	9.8070
16	140	0.7603	0.76	0.7602	0.7602	8.4520
17	170	0.6835	0.6832	0.6839	0.6835	7.2395
18	200	0.6113	0.6113	0.6111	0.6112	6.0955

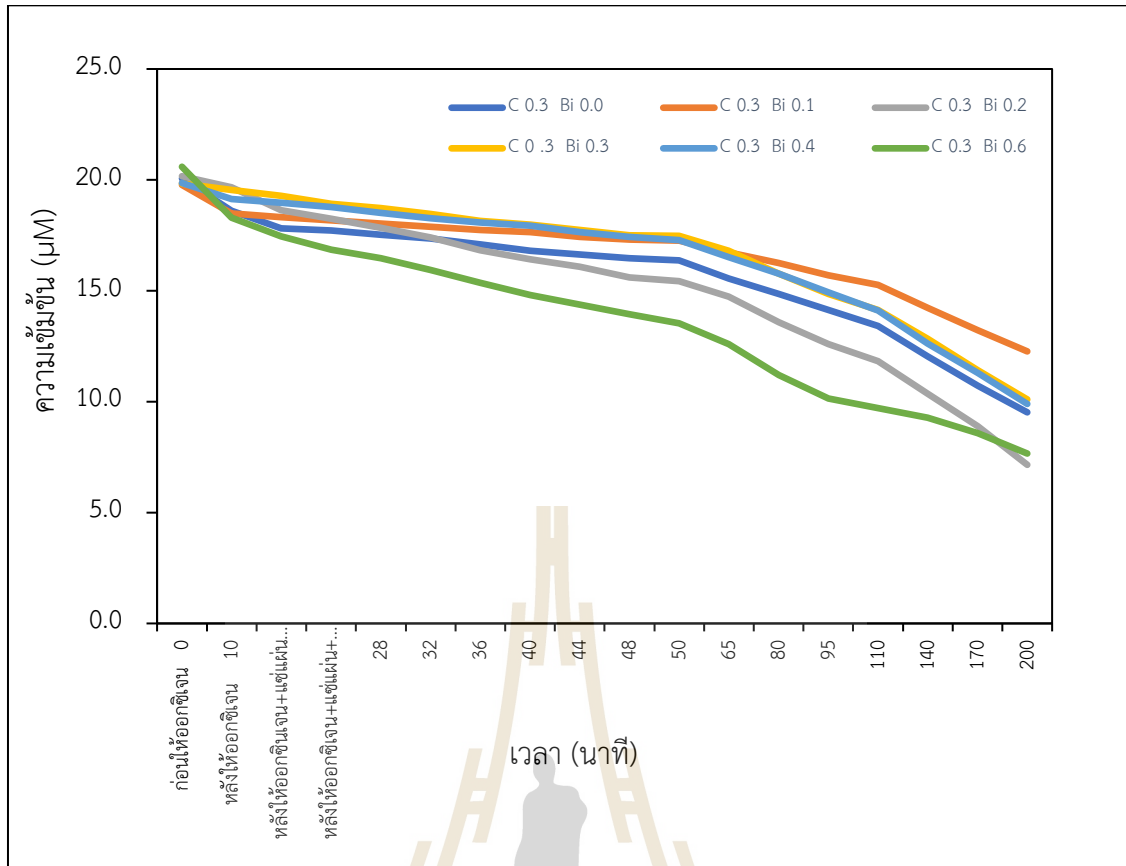
3.3.4.4 ผลการทดสอบการสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 µM ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางต่างๆ เมื่อทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% และเตรียมฟิล์มโดยการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการวัดความเข้มข้นของ

สารละลายเมทิลีนบลูเมื่อทำการฉายแสงเป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% สามารถย่อยสลายสีย้อมให้มีความเข้มข้นลดลงจาก 20 μM เป็น 5 μM โดยฟิล์มบางที่เจือด้วยบิสมัทและเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ในปริมาณความเข้มข้น 0.5 wt% สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุด และมีความคงทนในการยึดเกาะกับแผ่นกระจกได้อย่างดีด้วย ดังรูปที่ 3.21



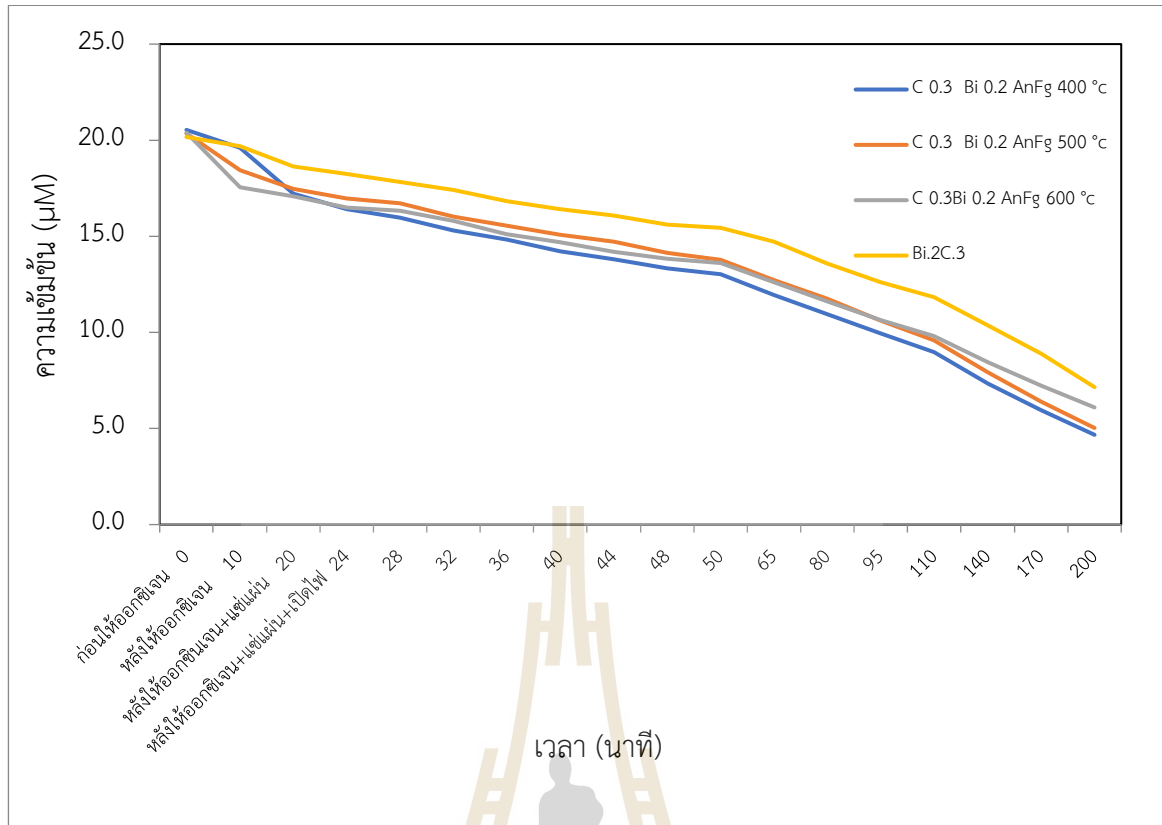
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณต่างๆ

เมื่อทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ และเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ในปริมาณ 0.3 %โดยน้ำหนัก พบว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือบิสมัทในช่วง 0.1 - 0.3%at สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ โดยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทในปริมาณ 0.6 %at จะสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุด จากความเข้มข้น 20 μM ลดลงเป็น 8 μM ภายในเวลาการสลายตัว 200 นาที ดังรูป 3.22



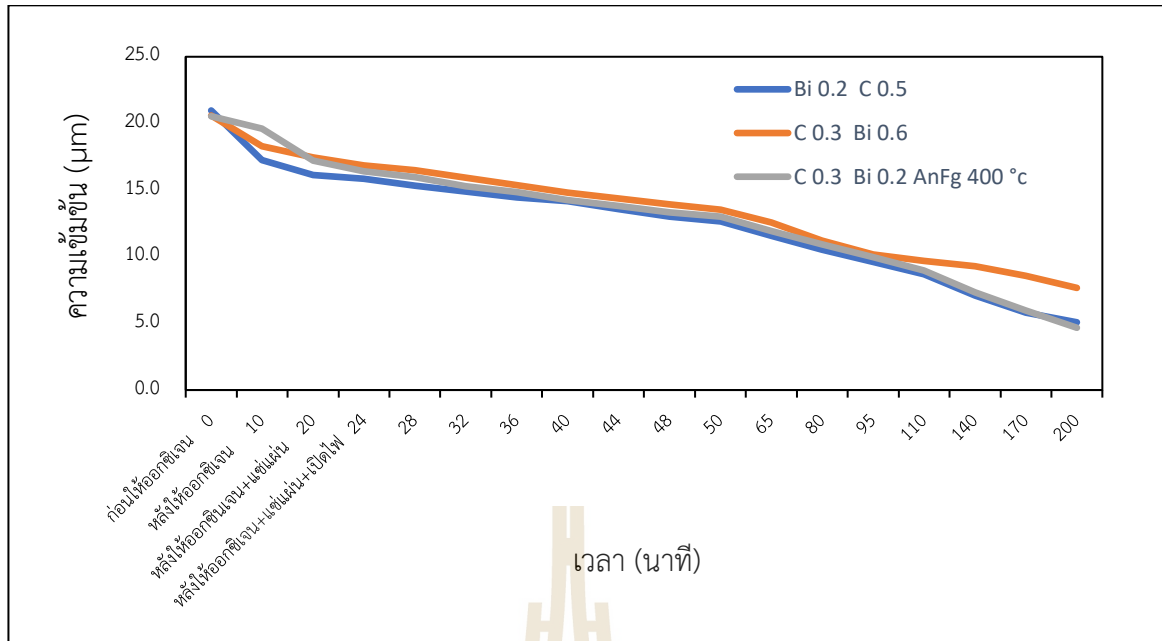
รูปที่ 3. 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทที่มีความเข้มข้นต่างๆ และเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณ 0.3 wt%

เมื่อทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2% atom และเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ในปริมาณ 0.3% โดยน้ำหนัก และ ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H_2 95 % กับ N_2 5% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้บรรยากาศ H_2 95 % กับ N_2 5% ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 $^{\circ}C$ สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้มีความใกล้เคียงกัน และพบว่ามี ความสามารถในการสลายสีย้อมได้ดีกว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนิลลิ่งในบรรยากาศปกติ (ในสถานะที่มี ออกซิเจน) โดยการแอนิลลิ่งในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนและไนโตรเจน สามารถลดการขาดกันของ พันธะ Zn-O และทำให้ลดช่องว่างในการส่งผ่านพาหะ และอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพการ เร่งปฏิกิริยาดูดแสงของซิงค์ออกไซด์นาโนได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.23



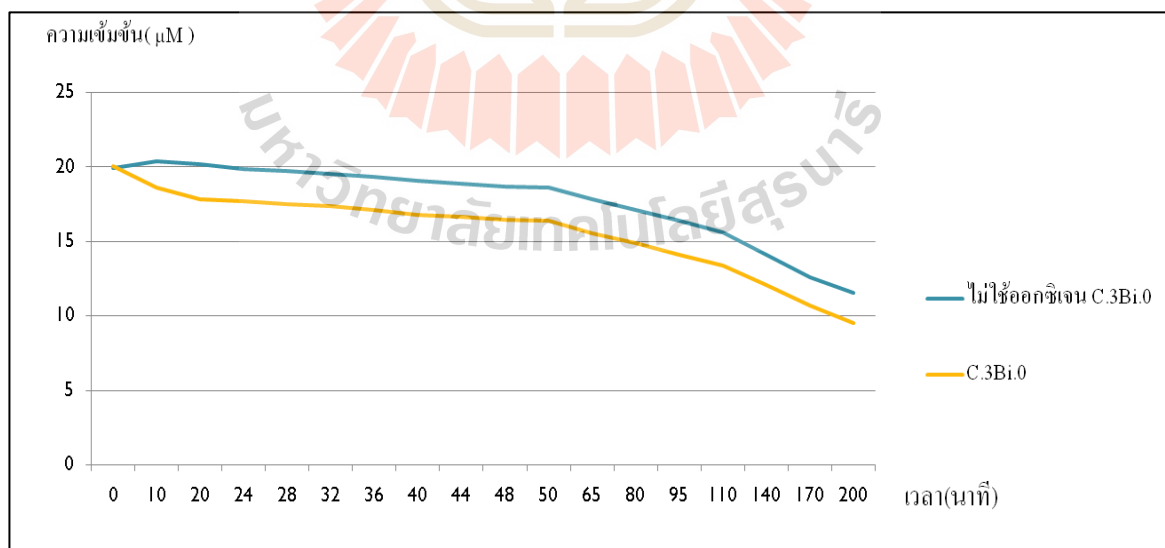
รูปที่ 3. 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทที่ความเข้มข้น 0.2 at% และเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณ 0.3 wt% ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้ ในบรรยากาศ H_2 95 % กับ N_2 5% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทในเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มต่างๆ ได้ศึกษาเปรียบเทียบดังแสดงในรูป 3.24 พบว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2%at มีความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมได้สูงสุด และมีความสามารถในการสลายสีย้อมได้ใกล้เคียงกับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือบิสมัท 0.2%at และเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.3%โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการแอนิลลิ่งภายใต้บรรยากาศ H_2 95 % กับ N_2 5% ในช่วงอุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทที่มีความเข้มข้นต่างๆ และสถานะในการเตรียมฟิล์มบางต่างๆ

3.3.4.5 ผลการทดสอบการย่อยสลายสีของฟิล์มบาง ZnO เตรียมด้วยเทคนิคโซลเจลที่เติมสารลดแรงตึงผิว ในสถานะที่มีและไม่มีออกซิเจน ภายใต้แสงที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3. 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู กับ เวลาในการฉายแสง สำหรับการทดสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 3 wt% ในสถานะที่มีและไม่มีออกซิเจน

จากรูปที่ 3.25 ผลการทดสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซลเจล ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 3 wt% ภายใต้สภาวะที่มีแสงในระยะเวลาต่างๆ โดยการทดสอบในสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนภายใต้แสง พบว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์สามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีกว่าภายในสภาวะที่มีออกซิเจนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการเกิด Photocatalytic ดังนั้นในการใช้งานสภาวะจริงจึงควรมีการปล่อยพ่นหรือตีน้ำเพื่อให้ออกซิเจนลงในน้ำ ร่วมกับการใช้งานภายใต้แสง จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น

3.3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ทั้งหมด 15 ตัวอย่างดังมีสภาวะการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ได้แก่

- | | |
|-------------------------------|------------------|
| 1. Bi 0.0 C 0.3 | 8. Bi 0.2 C 0.05 |
| 2. Bi 0.1 C 0.3 | 9. Bi 0.2 C 0.1 |
| 3. Bi 0.2 C 0.3 | 10. Bi 0.2 C 0.2 |
| 4. Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 400 °C | 11. Bi 0.2 C 0.5 |
| 5. Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 500 °C | 12. Bi 0.2 C 0.7 |
| 6. Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 600 °C | 13. Bi 0.3 C 0.3 |
| 7. Bi 0.2 C 0.0 | 14. Bi 0.4 C 0.3 |
| | 15. Bi 0.6 C 0.3 |

การทดสอบได้แบ่งออกเป็นเงื่อนไขย่อยได้ 3 เงื่อนไข ได้แก่

- เงื่อนไขที่ 1.) ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi 0.2 at% ด้วย CTAB ปริมาณต่างๆ
- เงื่อนไขที่ 2.) ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ CTAB 0.3 wt%
- เงื่อนไขที่ 3.) ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.3 wt% ภายใต้การอบ annealing forming gas ในบรรยากาศ N₂ 5% , H₂ 95%

จากผลการทดลองในเงื่อนไขที่ 1.) ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi 0.2 at% ด้วย CTAB ปริมาณต่างๆ ได้แก่ Bi 0.2 C 0.0 , Bi 0.2 C 0.05 , Bi 0.2 C 0.1 , Bi 0.2 C 0.2 , Bi 0.2 C 0.5 , Bi 0.2 C 0.7 และ Bi 0.2 C 0.3 พบว่า กราฟมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มตั้งแต่การที่ให้ออกซิเจนเข้าไป ก็ทำให้ความเข้มข้นของสารตัวอย่างลดลง แสดงให้เห็นว่า ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายของเมทิลีนบลู และเมื่อเราใส่ฟิล์มบางเข้าไปภายใต้สภาวะที่มีแสง กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูลดลง จากนั้นทำการทดสอบต่อขึ้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง กับอีก 20 นาที ภายใต้การจำลองแสง UV จากหลอดไฟฮาโลเจน ขนาด 50 W ในเงื่อนไขนี้พบว่าแผ่นฟิล์มที่เจือด้วย Bi 0.2 at% , CTAB 0.3 wt% เป็นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สามารถสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดของเงื่อนไขนี้ โดยมีค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดอยู่ที่ 5 µM แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ CTAB มีผลต่อปัจจัยในการสลายสีของเมทิลีนบลูด้วย

จากผลการทดลองในเงื่อนไขที่ 2.) ฟิล์มบางที่เจือด้วย Bi ความเข้มข้นต่างๆ โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.3 wt% ได้แก่ขึ้นทดสอบ Bi 0.0 C 0.3 , Bi

0.1 C 0.3 , Bi 0.2 C 0.3, Bi 0.3 C 0.3 , Bi 0.4 C 0.3 และ Bi 0.6 C 0.3 พบว่า จากกราฟผลการทดลอง มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับกับผลการทดลองในเงื่อนไขที่ 1. แต่ในเงื่อนไขที่ 2. นี้พบว่ามีการลดลงของความเข้มข้นได้ไม่สูงเท่ากับในเงื่อนไขที่ 1. แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ Bi มีผลในการสลายสีของเมทิลีนบลู และในผลการทดลองในเงื่อนไขนี้พบว่า C 0.3 Bi 0.2 มีค่าการสลายของสีเมทิลีนบลูมากที่สุด ในเงื่อนไขนี้ โดยมีความเข้มข้นสุดท้ายอยู่ที่ $7 \mu\text{M}$

จากผลการทดลองในเงื่อนไขที่ 3.) พิล์มบางที่เจือด้วย Bi 0.2 at% และ CTAB 0.3 wt% ภายใต้การอบ annealing forming gas ในบรรยากาศ N_2 5% , H_2 95% ได้แก่ Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 400°C , Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 500°C , Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 600°C และ Bi 0.2 C 0.3 จากกราฟของผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับ ในเงื่อนไขที่ 1. และเงื่อนไขที่ 2. แต่ในการอบแผ่นในเงื่อนไขที่ 3. นี้มีการอบในบรรยากาศ AnFg ที่อุณหภูมิ 400°C , 500°C และ 600°C ผลพบว่า แผ่นฟิล์มที่ Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 400°C มีผลการทดสอบพบว่าสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุด โดยมีค่าความเข้มข้นสุดท้ายอยู่ที่ $4.7 \mu\text{M}$ ในเงื่อนไขนี้ แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิและบรรยากาศในการอบแผ่นฟิล์ม ก็เป็นปัจจัยหนึ่ง ที่มีผลในการสลายของสีเมทิลีนบลู โดยการอบฟิล์มภายใน Forming gas จะทำให้ลดการเกิด non-Oxygen bridging ในฟิล์มบาง และทำให้โครงสร้างของฟิล์มมีความต่อเนื่องและสมบูรณ์มากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มบางมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวเร่งการเกิดโฟโตแคตตาไลติก ดีมากขึ้น



รูปที่ 3. 26 การสลายของสีเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์ม Bi 0.2 C 0.3 : AnFg 400°C ภายใต้สภาวะที่มีแสงและออกซิเจน เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง 20 นาที

3.3.6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์มบาง ZnO ภายใต้สภาวะที่มีแสงด้วยหลอดไฟฮาโลเจนขนาด 50 ความเข้ม 3.89 mW/cm^2 และออกซิเจน ในการ

ทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 20 นาที พบว่า फिल्मที่มี ปริมาณ ของ Bi 0.2 CTAB 0.3 ที่ทำการอบ Annealing Forming Gas ที่ อุณหภูมิ 400 °C สามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด และฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว สูตร Bi 0.2 CTAB 0.5 และ Bi 0.2 CTAB 0.3 ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีพื้นผิวที่ต่อเนื่องและลดการเกิดรอย ร้าวบนผิวฟิล์มได้ดี จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Photocatalytic ได้ดีที่สุด



บทที่ 4

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือสำหรับบำบัดความเป็นพิษในน้ำ

4.1 วัตถุประสงค์

4.1.1 เพื่อเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือด้วยวิธี Sol-gel ในสถานะการเติมสารเจือ Bismuth ในความเข้มข้นต่างๆ

4.1.2 เพื่อศึกษาสถานะการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในน้ำด้วยปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือบิสมัท

4.2 การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทในช่วงความเข้มข้น 0-0.6 at% ด้วยกระบวนการโซล-เจล

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท, ปริมาณสารที่ใช้, และความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ใช้เป็นอะตอมสารเจือ แสดงในตารางที่ 4.1- 4.3

ตารางที่ 4.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจล ZnO : Bi

สารตั้งต้น	สูตรเคมี	มวลโมเลกุล	ความบริสุทธิ์	หน้าที่
ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc Acetate Dihydrate, ZnAc)	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219.49	99.5%	สารละลายตั้งต้น
เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG)	$\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$	62.07	99.5%	สารตัวทำละลาย
โมนอเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA)	$\text{NH}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$	61.08	97%	สารช่วยเพิ่มความเสถียรของโซลเจล
บิสมัทไนเตรต เพนตะไฮเดรต (Bismuth Nitrate Pentahydrate)	$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	485.07	98%	สารเจือให้อะตอมบิสมัท
เฮกซะดีเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium Bromide, CTAB)	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	364.45	96%	สารลดแรงตึงผิวและเพิ่มความเสถียรของโซลเจล

ตารางที่ 4.2 การเตรียมสารละลายเจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือปนกับสารลดแรงตึงผิวที่ประมาณความเข้มข้นต่างๆ

ลำดับ	สารเคมี	ความเข้มข้น	ปริมาณ	หมายเหตุ
1	MEA	97%	MEA 4.322 ml ละลาย	ผสมสาร 1+2 (ปริมาณ ~20ml)
2	EG	99.5%	ใน EG ปรับให้มีปริมาณ 100 ml	
3	ZnAc	99.5%	3.860 g	เติมลงในสารละลาย 1+2
4	$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	98%	0.619 g ใน EG แล้ว ปรับให้เป็น 10 ml	เติมลงใน สารละลาย 3
5	CTAB	96%	0-0.075 g	เติมลงในสารละลาย 4 แล้วเติมสาร 1+2 ปรับให้เป็น 25 ml

ตารางที่ 4.3 ปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว CTAB สำหรับการเตรียมสารละลายโซล-เจล ZnO ที่เจือด้วยอะตอมบิสมัท

ความเข้มข้น CTAB (wt%)	ปริมาณที่หยดสาร CTAB (ml)	Molar ratio ZnAc : MEA : CTAB
0	0	1 : 1 : 0
0.5	0.34	1 : 1 : 0.002
0.1	0.68	1 : 1 : 0.004
0.2	1.37	1 : 1 : 0.008
0.3	2.06	1 : 1 : 0.012
0.6	2.74	1 : 1 : 0.016

4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมเจล ZnO ที่ไม่เจือ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

- 1.) นำ MEA 4.322 ml. ผสมกับ EG 100 ml. แล้วนำไปแบ่งใส่ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) 25 ml.
- 2.) ชั่ง ZnAc 3.860 g แล้วนำมาละลายใน ข้อที่ 1 ที่เตรียมไว้
- 3.) นำไปกวนด้วย magnetic stirrer โดยนำไปวางบนเครื่อง Hot Plate stirrer จนละลาย

- 4.) เตรียม CTAB โดยชั่ง CTAB มา 0.36445 g.ที่มีความเข้มข้น 0.1 Mแล้วนำมาละลายใน EG 10 ml.
 - 5.) หยด CTAB ที่เตรียมไว้จากข้อ 4 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 30 min (หยด 1 หยด ต่อ 3 sec) (เมื่อใส่ CTAB ที่ความเข้มข้น 0.3 wt% จะใช้ CTAB 2.06 ml.)
 - 6.) ยกลงมาจากเครื่อง Hot Plate stirrer แล้วทิ้งให้เย็น ที่ อุณหภูมิห้อง แล้วเติมด้วย EG ที่ผสมกับ MEA ที่เตรียมไว้จากข้อ 1 เพื่อให้ได้ปริมาตร 25 ml.
 - 7.) ปิดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ในโตรเจน 24 hr.
- 4.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเจล ZnO สารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์ ที่เจือ Bismuth 0.2 at%
- 1.) นำ MEA 4.322 ml. ที่มีความเข้มข้น 0.125 mol/l ผสมกับ EG 100 ml. แล้วนำไปแบ่งใส่ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) 25 ml.
 - 2.) ชั่ง ZnAc 3.860 g แล้วนำมาละลายใน ข้อที่ 1 ที่เตรียมไว้
 - 3.) นำไปกวนด้วย magnetic stirrer โดยนำไปวางบนเครื่อง Hot Plate stirrer จนละลาย
 - 4.) เตรียม $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ โดยการชั่ง $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.619 g แล้วนำมาละลายใน EG 10 ml.
 - 5.) เตรียม CTAB โดยชั่ง CTAB มา 0.36445 g. แล้วนำมาละลายใน EG 10 ml.
 - 6.) เมื่อ ZnAc ละลายแล้ว หยดสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ใน EG ที่เตรียมไว้จากข้อ 4 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 1 hr. (หยด 1 หยด ต่อ 3 sec) (เมื่อใส่ Bismuth ที่ความเข้มข้น 0.2 at% จะใช้ Bismuth 0.28 ml.)
 - 7.) หยด CTAB ที่เตรียมไว้จากข้อ 5 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 30 min (หยด 1 หยด ต่อ 3 sec) (เมื่อใส่ CTAB ที่ความเข้มข้น 0.3 wt% จะใช้ CTAB 2.06 ml.)
 - 8.) ยกลงมาจากเครื่อง Hot Plate stirrer แล้วทิ้งให้เย็น ที่ อุณหภูมิห้อง แล้วเติมด้วย EG ที่ผสมกับ MEA ที่เตรียมไว้จากข้อ 1 เพื่อให้ได้ปริมาตร 25 ml.
 - 9.) ปิดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ในโตรเจน 24 hr.
- 4.2.3 สารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์ ที่เจือ Bismuth 0.6 at%
- 1.) นำ MEA 4.322 ml. ผสมกับ EG 100 ml. แล้วนำไปแบ่งใส่ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) 25 ml.
 - 2.) ชั่ง ZnAc 3.860 g แล้วนำมาละลายใน ข้อที่ 1 ที่เตรียมไว้
 - 3.) นำไปกวนด้วย magnetic stirrer โดยนำไปวางบนเครื่อง Hot Plate stirrer จนละลาย

- 4.) เตรียม $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ โดยการชั่ง $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.619 g แล้วนำมาละลายใน EG 10 ml.
- 5.) เตรียม CTAB โดยชั่ง CTAB มา 0.36445 g. แล้วนำมาละลายใน EG 10 ml.
- 6.) เมื่อ ZnAc ละลายแล้ว หยดสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ใน EG ที่เตรียมไว้จากข้อ 4 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 1 hr. (หยด 1 หยด ต่อ 3 sec) (เมื่อใส่ Bismuth ที่ความเข้มข้น 0.6 %atom จะใช้ Bismuth 0.85 ml.)
- 7.) หยด CTAB ที่เตรียมไว้จากข้อ 5 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 30 min (หยด 1 หยด ต่อ 3 sec) (เมื่อใส่ CTAB ที่ความเข้มข้น 0.3 %atom จะใช้ CTAB 2.06 ml.)
- 8.) ยกลงมาจากเครื่อง Hot Plate stirrer แล้วทิ้งให้เย็น ที่ อุณหภูมิห้อง แล้วเติมด้วย EG ที่ผสมกับ MEA ที่เตรียมไว้จากข้อ 1 เพื่อให้ได้ปริมาตร 25 ml.
- 9.) ปิดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ไนโตรเจน 24 ชั่วโมง

4.3 การเตรียมฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์

4.3.1 การทำความสะอาดแผ่นฟิวส์ควอตซ์

การแผ่นฟิวส์ควอตซ์ที่จะนำมาใช้ในการเคลือบฟิล์มนั้นต้องผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดด้วย หลักการ Ratio Corporation America (RCA) ตามวิธีการทำความสะอาด RCA1 และ RCA2 โดยขั้นตอนการทำความสะอาดด้วย RCA1และRCA2 โดยมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

1.) เตรียมสารละลาย RCA1 และ RCA2 ดังนี้

a. RCA1 ประกอบด้วย H_2O_2 : NH_3OH : น้ำ DI ในอัตราส่วน 1 : 1 : 5 ปริมาตร 500 ml ดังนั้นใช้ H_2O_2 และ NH_3OH อย่างละ 71 ml น้ำ DI 358 ml ผสมเข้าด้วยกัน

b. RCA2 ประกอบด้วย H_2O_2 : HCL : น้ำ DI ในอัตราส่วน 1 : 1 : 5 โดยเตรียมปริมาตร 500 ml ดังนั้นใช้ H_2O_2 และ HCL ปริมาตร 71 ml น้ำ DI ปริมาตร 358 ml

2.) นำแผ่นฟิวส์ควอตซ์ มาใส่บีกเกอร์ RCA1 ที่ อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 นาที

3.) ล้างแผ่นฟิวส์ควอตซ์ โดยให้น้ำ DI ไหลผ่านนาน 10 นาที

4.) นำแผ่นฟิวส์ควอตซ์ ใส่บีกเกอร์ RCA2 แล้วทำซ้ำขั้นตอนในข้อ 2-3

5.) เป่าแผ่นฟิวส์ควอตซ์ ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.5% แล้วได้แผ่นฟิวส์ควอตซ์ ที่สะอาด

การทำความสะอาดผิวของ Fused quartz ด้วยกระบวนการ RCA แสดงในรูปแบบที่



ผสม RCA1 และ RCA2



นำแผ่น Fused quartz มาใส่ปีกเกอร์ RCA1 ที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 10 นาที



แผ่น Fused quartz ที่สะอาด



ล้างแผ่น Fused quartz โดยให้น้ำ DI ไหลผ่านนาน 10 นาที



รูปที่ 4. 1 การทำความสะอาดผิวของ Fused quartz ด้วยกระบวนการ RCA

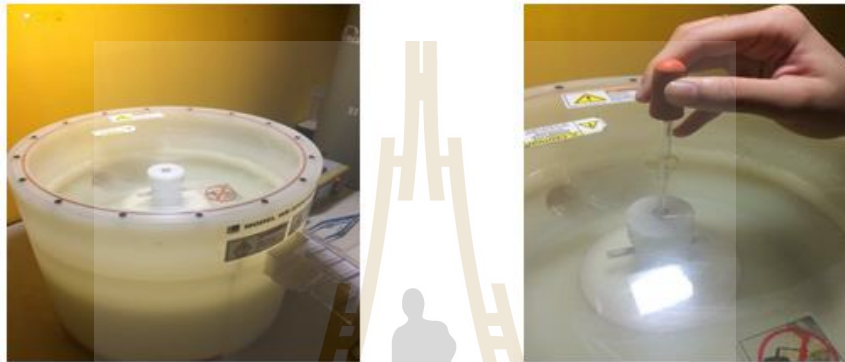
4.3.2 การผลิตฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยง (Spin coating)

1.) เจลที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าได้เจลใสที่ไม่มีตะกอน แล้วทำการเคลือบลงบนแผ่นพิวสควอตซ์ที่ทำความสะอาดแล้ว ด้วยเทคนิคกระบวนการเคลือบด้วยแรงเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบของการหมุนเหวี่ยงที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที และ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาที

2.) พักให้เจลที่เคลือบบนแผ่นพิวสควอตซ์แห้ง และนำไปอบที่ 100 °C เป็น เวลา 30 นาที แล้วทำซ้ำหลายๆครั้งเพื่อที่จะได้ความหนาตามต้องการ

3.) ทำการอบที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 1°C ต่อนาที ด้วยเตาไฟฟ้าในบรรยากาศปกติ

4.) นำชิ้นงานที่อบมาแล้ว มาเผาด้วยความร้อน 600°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 1°C ต่อนาที ด้วยเตาไฟฟ้าในบรรยากาศปกติ ได้ฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือและไม่เจือบิสมัทที่จำนวน 1 ชั้นบนแผ่นฐานพิวซ์ควอตซ์ รูปการเตรียมเจลซิงค์ออกไซด์ และการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางด้วยกระบวนการแรงเหวี่ยง แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเตรียมเจลซิงค์ออกไซด์ และการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางด้วยกระบวนการแรงเหวี่ยง

4.4 การเตรียมอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

ในการทดลองนี้ได้ทำการหาปริมาณแบคทีเรียในน้ำตัวอย่างก่อนการทดสอบจากนั้นใช้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมไว้ มาทดสอบด้วยกระบวนการ Photocatalysis ในน้ำที่มีปริมาณแบคทีเรียอาศัยอยู่ทำการหาปริมาณแบคทีเรียในน้ำตัวอย่างหลังการทดสอบจากนั้นดำเนินการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1.) จานอาหารเลี้ยงเชื้อ (Petri dish) | 10.) ปีกเกอร์ |
| 2.) แท่งแก้วเกลี่ยเชื้อ (Spreader) | 11.) หลอดทดลองขนาด 1.3 x 10 cm |
| 3.) หัวถ่ายเชื้อ (Loop) | 12.) หลอด Centrifuge ขนาด 1,000 ไมโครลิตร |
| 4.) ช้อนตักสาร | 13.) Auto pipette |
| 5.) ถ้วยชั่งสาร | 14.) Micro centrifuge storage box |
| 6.) ปากคีบ (Forceps) | 15.) ตะเกียงแอลกอฮอล์ |
| 7.) กระจกตวง | 16.) เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (GALLENKAMP, UK) |
| 8.) ขวดใส่อาหารเลี้ยงเชื้อ (Duran) | |
| 9.) ขวดฝาเกลียวขนาด 15 มิลลิเมตร | |

- | | |
|---|--|
| 17.) เครื่องซั่งอย่างละเอียด (Percisa 205 ASCS) | 22.) หลอดยวี่ osrm paraphom ประเภท warm white 12 V., 10 watt |
| 18.) เครื่อง Spectrophotometer | 23.) กล้องกระดาษ |
| 19.) หม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดันไอน้ำ (Autoclave) | |
| 20.) ตู้บ่มเชื้อ (Incubator) | |
| 21.) ตู้เขี่ยเชื้อ (Laminar flow clean bench) | |

4.4.2 วิธีการเตรียมไนเตรทบรอต (nitrate broth)

1.) กำจัดจุลินทรีย์ในบริเวณพื้นที่ปฏิบัติ, อาหารเลี้ยงเชื้อและภาชนะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ทำให้ปราศจากสิ่งมีชีวิตในอาหารเลี้ยงเชื้อ วัสดุ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่ใช้ โดยการอบด้วยความร้อนชื้น (autoclave)

2.) เตรียมไนเตรทบรอต(nitrate broth) : NB ซึ่งมีองค์ประกอบด้วย KNO_3 ปริมาณ 5 g , กลูโคส ปริมาณ 5 g , K_2HPO_4 ปริมาณ 0.5 g, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ปริมาณ 0.2 g, $MgCO_3$ ปริมาณ 0.2 g และน้ำกลั่น ปริมาณ 1 L ละลายส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำกลั่น คนด้วยแท่งแก้วให้ใช้ความร้อนช่วยในการละลายส่วนประกอบของอาหารแล้วปรับปริมาตรให้ครบตามสูตรด้วยน้ำกลั่น ในกรณีที่อาหารมีตะกอนหรือเศษผงให้กรองผ่านผ้าขาวบาง ไนเตรทบรอตที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้วจัดแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4. 3 ไนเตรทบรอต (nitrate broth)

3.) เตรียม Nutrient agar โดยใช้ไนเตรทบรอต เติมน้ำ 15 g ต้มพร้อมกับคนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งน้ำตาลละลายหมด ใช้อุณหภูมิโดยประมาณ 97–100 °C จากนั้นปรับปริมาตรให้ครบตามสูตรด้วยน้ำกลั่น และปรับ pH ให้ได้ประมาณ 7.0

4.) บรรจุอาหารที่เตรียมเสร็จแล้วลงในหม้อกรอกอาหาร กรอกอาหารใส่ขวดและหลอดทดสอบ โดยบรรจุปริมาณครึ่งของขวด ระวังอย่าให้อาหารเปื้อนปากขวดหรือปากหลอด ปิดหลอด

อาหารด้วยการดูดด้วยจุกสำลีที่แน่นพอสมควรแล้วปิดขวดด้วยฝาเกลียวให้สนิทแล้วคลายเกลียวออกครึ่งรอบ หลังจากบรรจุอาหารเรียบร้อยแล้ว รวบรวมขวดและหลอดอาหารใส่เข้าไปในกล่องแช่แข็ง ภายหลังจากการนี้กล่องแช่แข็งแล้วจึงปิดเกลียวให้แน่น

5.) ทำความสะอาดภาชนะและเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมอาหารให้เรียบร้อย

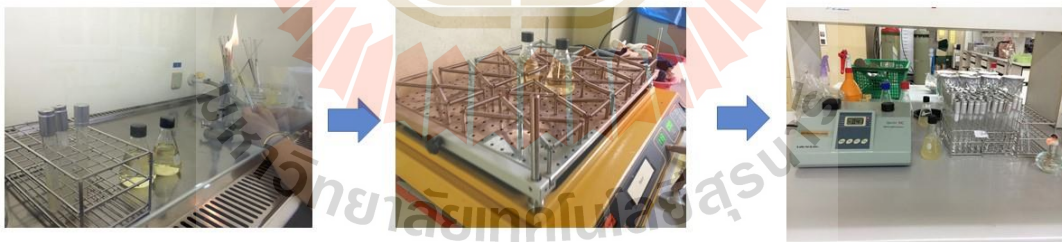
4.4.3 การเตรียมอีโอซินเมทิลีนบลูอะการ์ (Eosin methylene blue agar; EMB agar)

สารเคมีที่ใช้เตรียมประกอบด้วย K_2HPO_4 ปริมาณ 2 g, Peptone ปริมาณ 10 g, อีโอซิน ปริมาณ 0.4 g, เมทิลีนบลู ปริมาณ 0.065 g, อะการ์ ปริมาณ 15 g และ น้ำกลั่น 1 L สารละลายส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำกลั่น คนด้วยแท่งแก้วให้ส่วนประกอบของอาหารละลาย โดยใช้ความร้อนช่วย แล้วปรับปริมาตรให้ครบตามสูตรด้วยน้ำกลั่น ในกรณีที่อาหารมีตะกอนหรือเศษผงให้กรองผ่านผ้าขาวบาง จากนั้นจึงนำอาหารสำเร็จรูปมาเทใส่จาน

4.4.4 การวัดความเข้มข้นของเชื้อ E.coli จากหลอดเลี้ยงเชื้อ

1.) ทำการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจติดมาบน Loop หรือ Needle โดยการเผาไฟจนร้อนแดงก่อนใช้เขี่ยเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารเลี้ยงเชื้อ ส่วนการใช้ Forceps ในการคีบจับวัสดุต่างๆ ให้จุ่ม Forceps ในแอลกอฮอล์แล้วลนไฟทันที เมื่อฆ่าเชื้อที่อุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ทำการเขี่ยเชื้อจุลินทรีย์ลงบนอาหาร หลังจากเขี่ยเชื้อเรียบร้อยแล้วต้องทำการฆ่าเชื้อที่อุปกรณ์ อีกครั้ง จึงจะเสร็จขั้นตอนการเขี่ยเชื้อ

2.) ทำการบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 hrs. แล้วนำไปวัดความขุ่น (optical density ; OD) โดยใช้ความยาวคลื่น 625 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer ให้ได้ค่า OD = 0.08 - 0.1 ขั้นตอนการวัดความเข้มข้นของเชื้อแสดงในรูปที่ 4. 4



รูปที่ 4. 4 การวัดความเข้มข้นของเชื้อ

4.4.5 ขั้นตอนวิธีการทดสอบการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในน้ำ

- 1.) นำแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ใส่ในบีกเกอร์ ในปริมาตรน้ำ 100 ml. โดยบีกเกอร์ที่ 1 ไม่ใส่แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (เพื่อหาปริมาณแบคทีเรียในน้ำตัวอย่างก่อนการทดสอบ)
- บีกเกอร์ที่ 2 ใส่แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ 1 แผ่น
- บีกเกอร์ที่ 3 ใส่แผ่นฟิล์มบาง ZnO 2 แผ่น

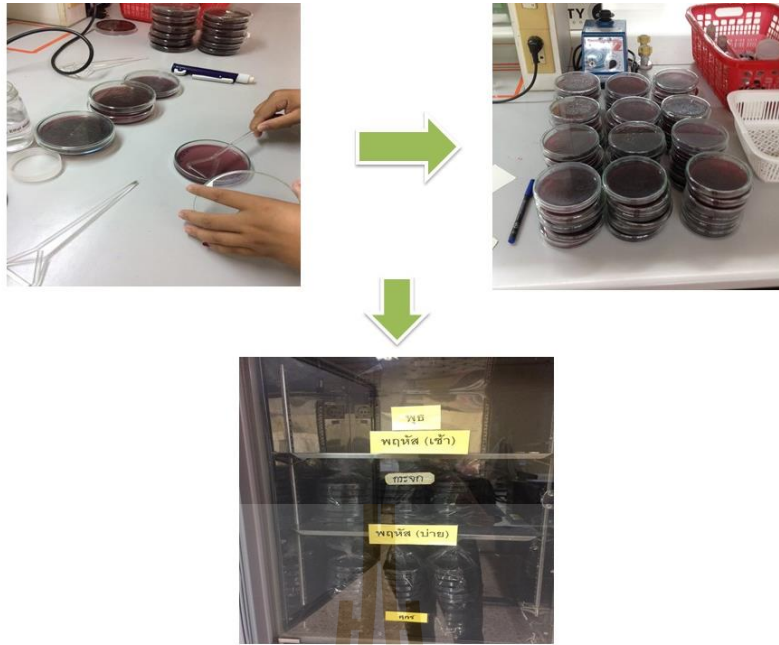
ปีกเกอร์ที่ 4 ใส่แผ่นฟิล์มบาง ZnO 3 แผ่น

- 2.) นำมาทดสอบด้วยกระบวนการ Photocatalysis โดยนำเชื้อที่วัดค่า OD = 0.08 - 0.1 นำมาตวงใส่ปีกเกอร์ ๑ละ 100 ml. จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางมาใส่ในน้ำที่มีเชื้อ แล้วจึงเปิดไฟจากหลอด UV ที่เตรียมไว้ แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผ่นฟิล์มบางที่นำมาใส่ในน้ำที่มีเชื้อ แล้วจึงเปิดไฟจากหลอด UV

- 3.) ทุกๆ 15 นาที ที่เก็บน้ำตัวอย่างมาปริมาณ 1 ml ให้นำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นที่ 10^{-3} , 10^{-4} และ 10^{-5} ml เมื่อเจือจางทุกครั้งควรนำมาปั่นให้แบคทีเรียผสมเข้ากับน้ำกลั่น
- 4.) เก็บตัวอย่างน้ำ 0.1 ml โดยเลือกความเจือจางที่ 10^{-3} , 10^{-4} และ 10^{-5} ml มาหยดลงตรงกลางจานอาหารรุ้น แล้วเกลี่ยด้วยแท่งแก้วที่ฆ่าเชื้อแล้ว ทิ้งให้แห้ง โดยแต่ละความเข้มข้นทำซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำไปอบที่ 28 - 30 °C เป็นเวลา 18-24 hrs. ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กรเชื้อเชื้อและอบเชื้อ

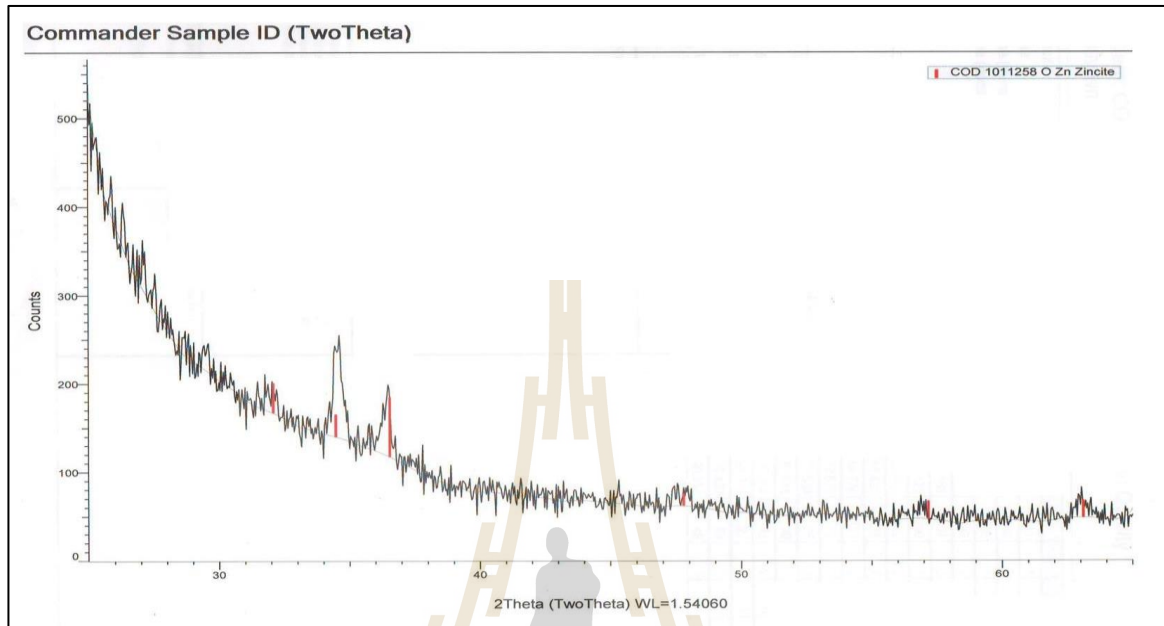
- 5.) นับจำนวนโคโลนีโดยนำจานอาหารวางบนกระดาษตาราง 1 โดยกำหนดให้จุดสีดำที่นับได้นับเป็น 1 โคโลนีดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 แล้วรายงานผลเป็น Colony forming unit (CFU)/ ml โดยที่จำนวนโคโลนีที่นับได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อ ต้องอยู่ระหว่าง 30-300 โคโลนี ต่อ หนึ่งจานเลี้ยงเชื้อ



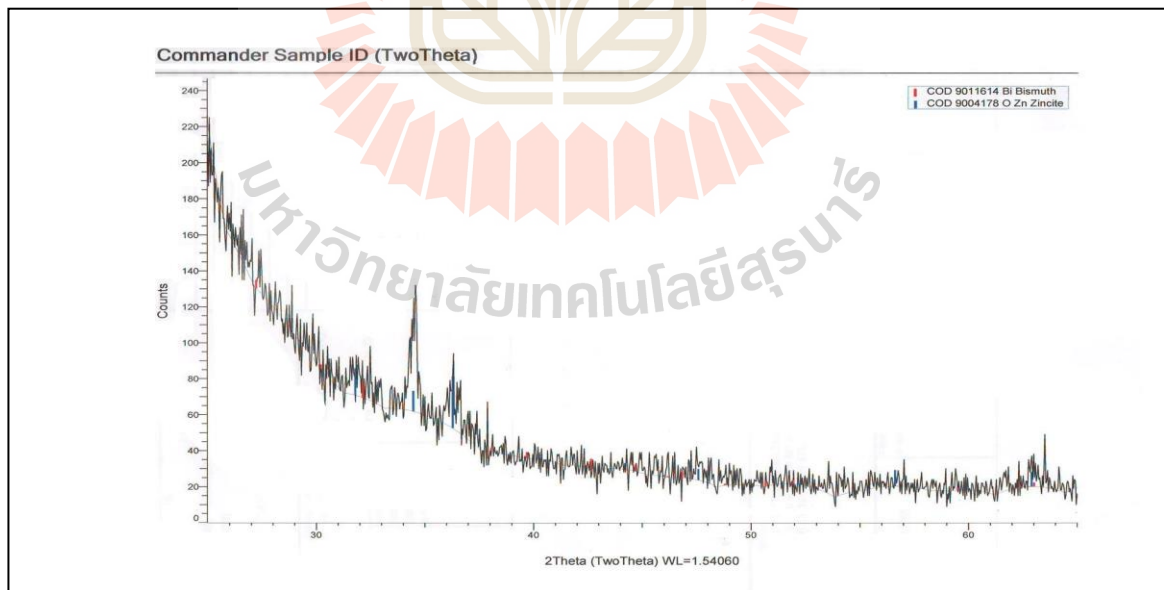
รูปที่ 4. 7 ลักษณะโคโลนี

4.5 ผลการทดลอง

4.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค Glancing X-ray diffraction ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 XRD pattern ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ไม่เจือ



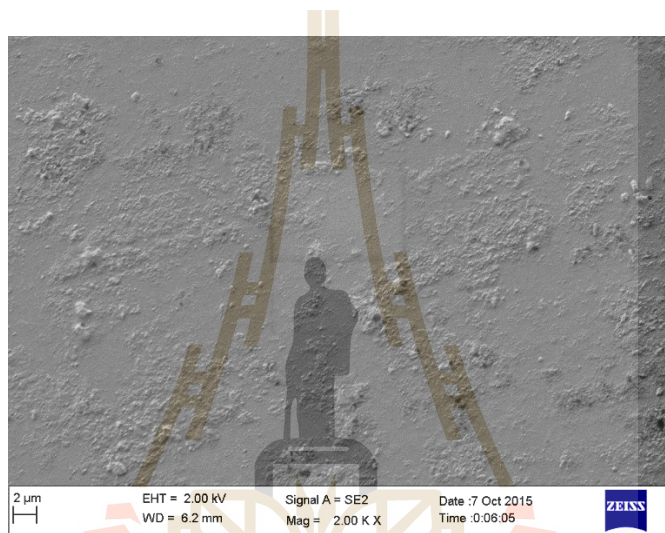
รูปที่ 4.9 XRD pattern ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือบิสมัท 0.25 at%

ผลการวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ปราศจากการเจือด้วย บิสมิท พบโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ปรากฏอยู่บนแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และเมื่อเจือด้วย

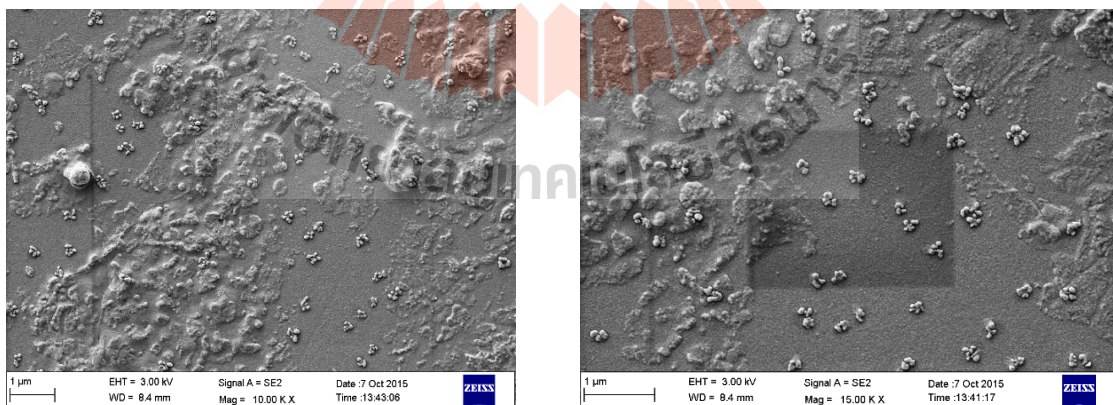
บิสมัทในปริมาณ 0.6 at% พบว่าแผ่นฟิล์มบางยังคงปรากฏผลึกของซิงค์ออกไซด์และปรากฏพีคโครงสร้างผลึกของบิสมัท ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.6 วิเคราะห์จุลโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยเทคนิค SEM

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ชนิดที่ไม่เจือบิสมัทและเจือบิสมัทที่ 0.2 at% และ 0.6 at% พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือด้วยบิสมัทสปรากฏการเกาะกลุ่มของ ZnO บนแผ่นฟิล์ม เมื่อเจือบิสมัทลงไปปริมาณ 0.2 at% พบว่า ZnO มีการกระจายตัวได้ดีขึ้นโดยขนาดของการเกาะกลุ่มของ ZnO น้อยลง และแผ่นฟิล์มบางที่เจือบิสมัท 0.6 at% มีการกระจายตัวได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 4.10 – 4.12 ตามลำดับ



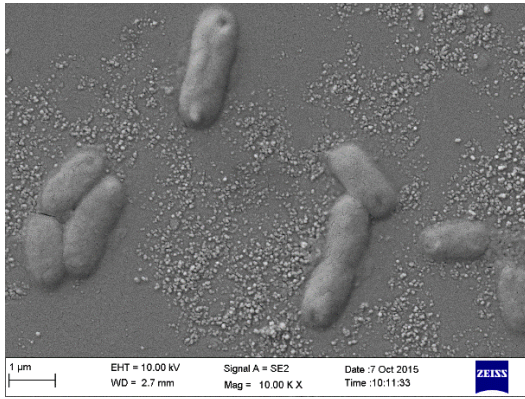
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ไม่เจือบิสมัท กำลังขยาย 2000 เท่า



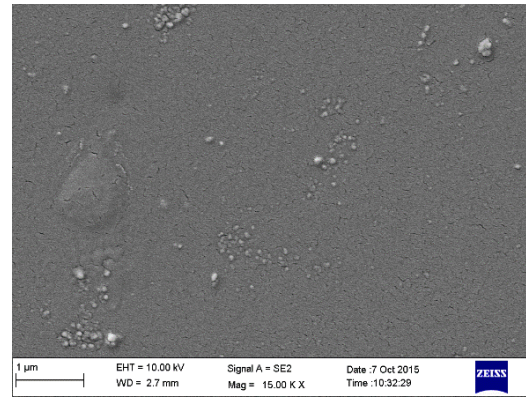
(ก) กำลังขยาย 10000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 15000 เท่า

รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือบิสมัท 0.2 at%



(ก) กำลังขยาย 10000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 15000 เท่า

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เจือบิทมัท 0.6 at% กำลังขยาย 15000 เท่า

4.7 ผลจากการทดสอบการวัดค่าความขุ่น (optical density ; OD) ที่ความยาวคลื่น 625 nm ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer

การทดสอบการวัดค่าความขุ่นหรือค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 625 nm โดยการทดสอบเมื่อแช่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ และเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการทดสอบที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิว โดยการเพิ่มจำนวนแผ่นของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงชัดเจน

ตารางที่ 4.4 ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่ปราศจากสารเจือ ที่จำนวนแผ่นต่างๆ ที่ในช่วงเวลา 15 - 60 นาที

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ใส่ในน้ำ 100 ml (แผ่น)	เวลา (min)				
	0	15	30	45	60
0	0.107	0.106	0.122	0.078	0.021
1	0.107	0.122	0.111	0.109	0.103
2	0.107	0.112	0.113	0.107	0.105
3	0.107	0.115	0.109	0.106	0.102

ตารางที่ 4.5 ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิสมัท 0.2 at%
เมื่อใช้จำนวนแผ่นต่างๆ ในช่วงเวลา 15 - 60 นาที

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ใส่ ในน้ำ 100 ml (แผ่น)	เวลา (min)				
	0	15	30	45	60
0	0.092	0.077	0.790	0.070	0.069
1	0.092	0.0845	0.075	0.114	0.122
2	0.092	0.115	0.114	0.110	0.111
3	0.092	0.115	0.111	0.110	0.088

ตารางที่ 4.6 ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิสมัท 0.6 at%
เมื่อใช้จำนวนแผ่นต่างๆ ในช่วงเวลา 15 - 60 นาที

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ใส่ ในน้ำ 100 ml (แผ่น)	เวลา (min)				
	0	15	30	45	60
0	0.098	0.099	0.103	0.101	0.098
1	0.098	0.117	0.127	0.118	0.105
2	0.098	0.102	0.111	0.105	0.120
3	0.098	0.141	0.126	0.123	0.114



รูปที่ 4.13 แสดงจำนวนโคโลนี ของแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่มากกว่า 300 โคโลนี



รูปที่ 4.14 แสดงจำนวนโคโลนี ของแผ่นฟิล์มบาง ZnO ที่อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนี

4.8 ผลการนับจำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ

ตารางที่ 4.7 จำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่ปราศจากสารเจือที่เวลาต่างๆ

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ ใส่ในน้ำ 100 ml (แผ่น)	ระดับความเจือ จาง	จำนวนโคโลนี			
		15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที
ไม่ใส่แผ่น	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	>300	206	196	187
1	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	>300	193	187	152
2	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	211	187	173	148
3	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	197	186	162	124

ตารางที่ 4.8 จำนวนโคโลนิบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่เติมสารเจือ Bi 0.2 at% ที่เวลาต่างๆ

จำนวนแผ่นฟิล์ม ที่ใส่ในน้ำ 100 ml (แผ่น)	ระดับความเจือ จาง	จำนวนโคโลนี			
		15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที
ไม่ใส่แผ่น	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	>300	210	200	198
1	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	105.5	83	80.5	66.5
2	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	105	75.5	74	59
3	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	103	72	67	52.5

ตารางที่ 4.9 จำนวนโคโลนิบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่เติมสารเจือ Bi 0.6 at% ที่เวลาต่างๆ

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ ใส่ในน้ำ 100 ml (แผ่น)	ระดับความเจือ จาง	จำนวนโคโลนี			
		15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที
ไม่ใส่แผ่น	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	>300	212	201	189
1	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	97.5	74.5	71	62

ตารางที่ 4.9 จำนวนโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทดสอบด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่เติมสารเจือ Bi 0.6 at% ที่เวลาต่างๆ (ต่อ)

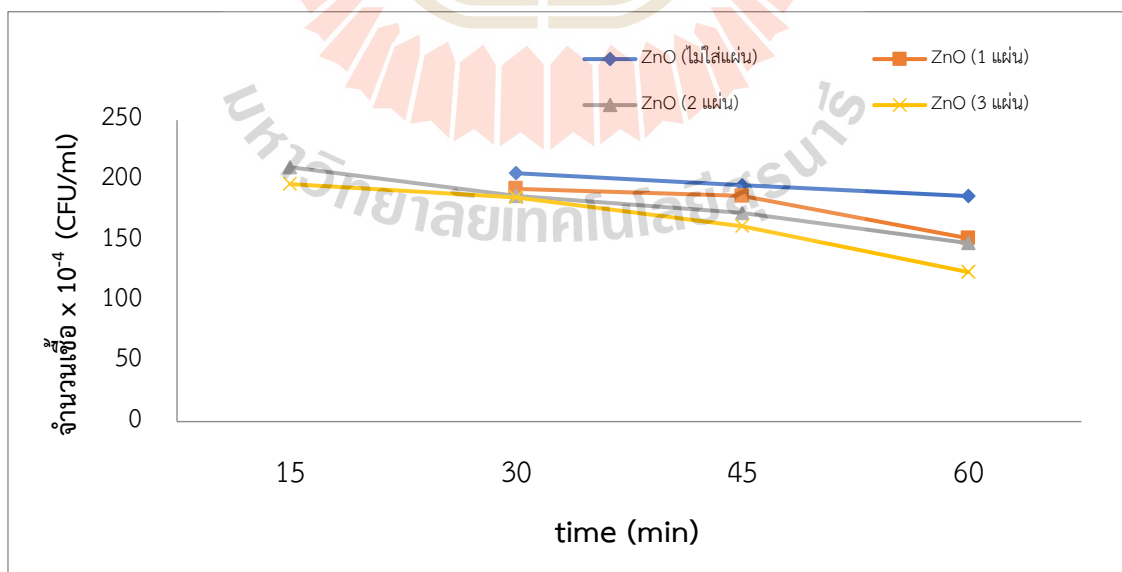
จำนวนแผ่นฟิล์มที่ใส่น้ำ 100 ml (แผ่น)	ระดับความเจือจาง	จำนวนโคโลนี			
		15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที
2	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	82.5	61.5	56.5	48
3	เจือจางที่ 10^{-3}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-4}	>300	>300	>300	>300
	เจือจางที่ 10^{-5}	42	36.5	21	14

ตารางที่ 4.10 แสดงจำนวนเชื้อที่เวลาต่างๆที่ระดับความเจือจาง 10^{-5} เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ใส่น้ำ 100 ml (แผ่น)	ฟิล์มบาง ZnO	จำนวนเชื้อ (CFU/ml)			
		15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที
0	ZnO	>300	206.00×10^{-4}	196.00×10^{-4}	187.00×10^{-4}
	ZnO 0.2	>300	210×10^{-4}	200×10^{-4}	198×10^{-4}
	ZnO 0.6	>300	212×10^{-4}	201×10^{-4}	189×10^{-4}
1	ZnO	>300	193.00×10^{-4}	187.00×10^{-4}	152.00×10^{-4}
	ZnO 0.2	105.50×10^{-4}	83.00×10^{-4}	80.50×10^{-4}	66.50×10^{-4}
	ZnO 0.6	97.50×10^{-4}	74.50×10^{-4}	71.00×10^{-4}	62.00×10^{-4}

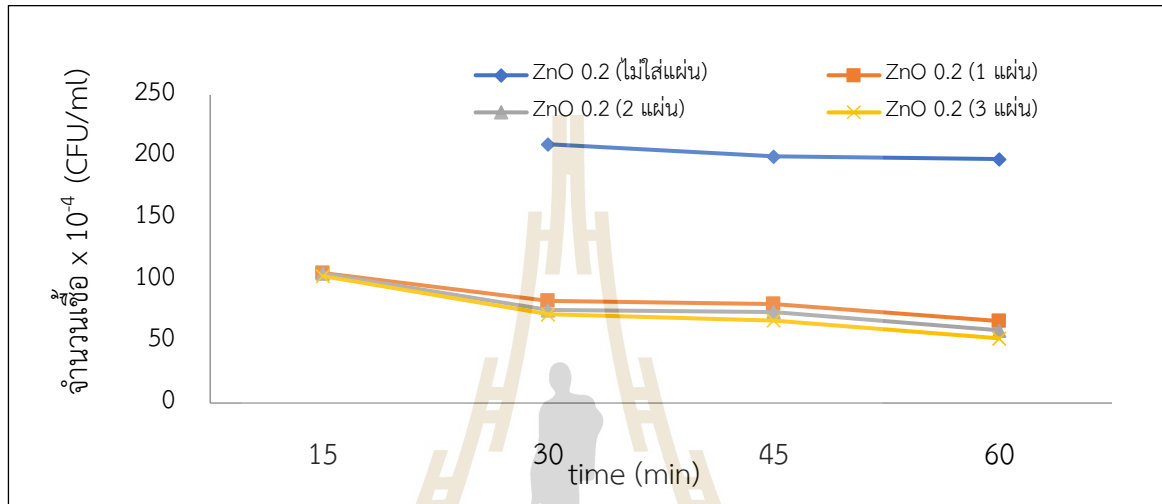
ตารางที่ 4.10 แสดงจำนวนเชื้อที่เวลาต่างๆที่ระดับความเจือจาง 10^{-5} เมื่อทดสอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ZnO (ต่อ)

จำนวนแผ่นฟิล์มที่ใส่น้ำ 100 ml (แผ่น)	ฟิล์มบาง ZnO	จำนวนเชื้อ (CFU/ml)			
		15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที
2	ZnO	211.00×10^{-4}	187.00×10^{-4}	173.00×10^{-4}	148.00×10^{-4}
	ZnO 0.2	105.00×10^{-4}	75.50×10^{-4}	74.00×10^{-4}	59.00×10^{-4}
	ZnO 0.6	82.50×10^{-4}	61.50×10^{-4}	56.50×10^{-4}	48.00×10^{-4}
3	ZnO	197.00×10^{-4}	186.00×10^{-4}	162.00×10^{-4}	124.00×10^{-4}
	ZnO 0.2	103.00×10^{-4}	72.00×10^{-4}	67.00×10^{-4}	52.50×10^{-4}
	ZnO 0.6	42.00×10^{-4}	36.50×10^{-4}	21.00×10^{-4}	14.00×10^{-4}



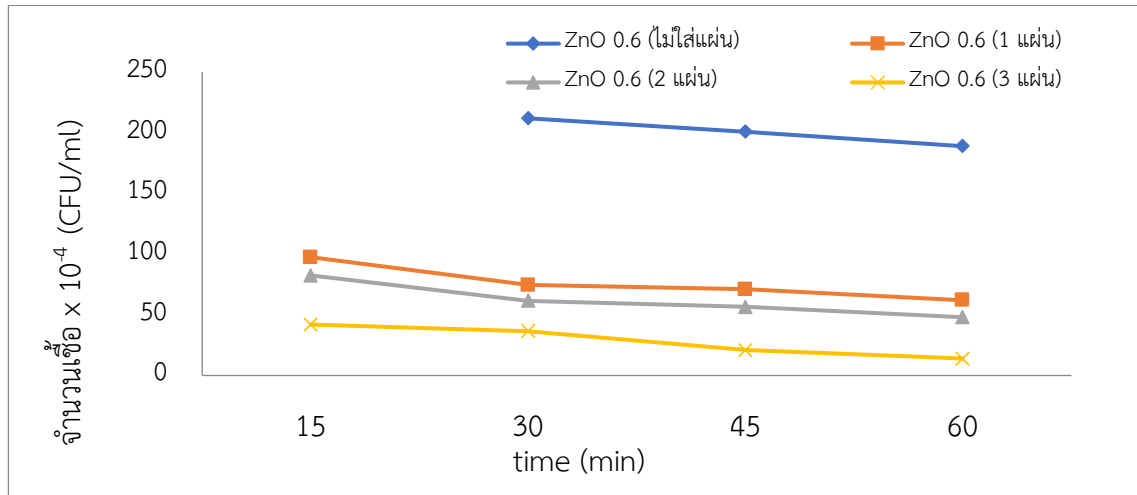
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนเชื้อ $\times 10^{-4}$ (CFU/ml) กับ เวลาที่ฉายแสงทดสอบ (นาที) ของฟิล์มบาง ZnO ที่ไม่ผ่านการเจือ

ผลการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อ E.Coli บนอาหารเลี้ยงเชื้อ พบว่าจำนวนโคโลนีที่ปรากฏบนจานเพาะเชื้อที่ไม่ใส่แผ่นฟิล์มที่เวลา 0 - 60 นาทีมีจำนวนโคโลนีโดยเฉลี่ยประมาณ 200 โคโลนีและจำนวนโคโลนีลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเวลาการฉายแสงเพิ่มขึ้น เมื่อนำแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ปราศจากสารเจือจำนวน 1-3 แผ่นใส่ลงในตัวอย่างทำการฉายแสงที่เวลา 0 - 60 นาทีจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปนับจำนวนโคโลนีทุกๆ 15 นาที พบว่าจำนวนโคโลนีลดลงเมื่อเวลาการฉายแสงและจำนวนแผ่นที่ใส่ลงไปในตัวอย่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนเชื้อ $\times 10^{-4}$ (CFU/ml) กับ เวลา (นาที) ของฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิสมัท 0.2at%

จากผลการทดสอบหาจำนวนโคโลนีของเชื้อในสถานะที่ใส่แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท 0.2 at% ที่เวลา 0 - 60 นาที พบว่าจำนวนโคโลนีลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มลงไปในตัวอย่าง พบว่า จำนวนโคโลนีที่นับได้น้อยกว่าตัวอย่างของจานเพาะเชื้อที่มีการใส่แผ่นฟิล์มน้อยกว่า ณ เวลาการฉายแสงที่เท่ากัน



รูปที่ 4. 17 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนเชื้อ $\times 10^{-4}$ (CFU/ml) กับ เวลา (นาที) ของฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิสมัท 0.6 at%

จากผลการนับจำนวนโคโลนีที่พบในตัวอย่างที่ทำการใส่แผ่นฟิล์มที่เติมสารเจือบิสมัท 0.6 at% ที่เวลา 0 – 60 นาที พบว่าจำนวนโคโลนีมีการลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการใส่แผ่นฟิล์มลงไป และเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มมากขึ้น พบว่าจำนวนโคโลนีที่นับได้ลดลงซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากพื้นผิวสัมผัสระหว่างเชื้อโรคกับแผ่นฟิล์มที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจากการฉายแสงมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเจือบิสมัทที่เติมลงไปในฟิล์มซิงค์ออกไซด์ พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือบิสมัทเพิ่มขึ้นจาก 0.2 at% เป็น 0.6 at% พบว่าจำนวนโคโลนีของเชื้อที่นับได้มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อโรคได้ดีมากขึ้น

4.9 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบการลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียด้วยฟิล์มบาง ZnO ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธี Sol-gel ในสภาวะการเติมสารเจือ Bismuth 0.2 และ 0.6 at% โดยอาศัยหลักการ Photocatalytic พบว่าฟิล์มบาง ZnO ที่เจือบิสมัทที่ความเข้มข้น 0.6 at% สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าฟิล์มบางอื่นๆ เนื่องจากการเติมบิสมัทในระดับอะตอมไปลดจุดบกพร่องบนแผ่นฟิล์มบางทั้งนี้การที่เจือบิสมัทที่ 0.6 at% ยังเพิ่มระดับพลังงานแบนด์แก๊ปให้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วย ส่งผลให้ไปเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการ Photocatalytic ให้เร็วขึ้นและเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นและเวลา ส่งผลต่อการลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียได้ดีขึ้น

บทที่ 5

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย สำหรับเคลือบบนผิวกระเบื้องเซรามิก

5.1 วัตถุประสงค์

- 5.1.1 เพื่อเตรียมผิวเคลือบกระเบื้องที่สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก
- 5.1.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ต่อสีของกระเบื้องเคลือบและสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรีย

5.2 ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

- ตัวแปรต้น : ปริมาณของซิงค์ออกไซด์ ขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ และเทคนิคการเคลือบ
- ตัวแปรตาม : ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย สีเคลือบที่เปลี่ยนไป
- ตัวแปรควบคุม : เวลาที่ใช้ในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย เวลาการจุ่มเคลือบ อัตราส่วนที่ใช้ผสมของเคลือบ และเอนโกป ชนิดของแสงที่ใช้ในการทดสอบ ปริมาณเชื้อ ขนาดกระเบื้อง 1x1 cm² ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสง

5.3 วิธีดำเนินการวิจัย

5.3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1.) กระเบื้อง | 10.) ปีกเกอร์ |
| 2.) เคลือบโรงงาน (Code WGP-032) | 11.) ซิงค์ออกไซด์ |
| 3.) เอนโกปโรงงาน (Code WEP-037) | 12.) โกร่ง |
| 4.) ซิงค์ออกไซด์ | 13.) ปี่เปต |
| 5.) Ethyl cellulose ethoxyl (EC) | 14.) เครื่อง SEM-EDS |
| 6.) Tetraethyl orthosilicate (TEOS) | 15.) เครื่อง Horiba Particle size analysis |
| 7.) Ethanol absolute | 16.) เครื่องวัดสี (Hunter lab) |
| 8.) Alpha-Terpineol | 17.) เพลต |
| 9.) เครื่อง Magnetic Stirrer | 18.) หลอดทดลอง |
| | 19.) เครื่องดูกระจายสารละลาย (Disperser) |

- | | |
|--|------------------------------|
| 20.) เครื่องผสมสารละลาย (Vortex Mixer) | 31.) กระบอบทวง (Cylinder) |
| 21.) ตู้อบ | 32.) น้ำเปล่า |
| 22.) Pipette Pump | 33.) น้ำ DI |
| 23.) แหล่งกำเนิดแสงหลอดไฟ LED | 34.) ถังพลาสติก |
| 24.) เครื่องชั่งสาร สามตำแหน่ง | 35.) ซ้อนตักสาร |
| 25.) ตะเกียงแอลกอฮอล์ | 36.) กระจกชั่งสารเคมี |
| 26.) แท่งแก้ว | 37.) NB (อาหารเชื้อ E. coli) |
| 27.) เครื่อง Autoclave | 38.) EMB Agar (อาหารบนเพลต) |
| 28.) Parafilm | 39.) ตะแกรงใส่หลอดทดลอง |
| 29.) อะลูมิเนียม ฟลอยด์ | 40.) ตู้บ่ม |
| 30.) เต้าเผา | 41.) ตู้ดูดอากาศ |
| | 42.) เครื่องตัด |

5.3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

5.3.2.1 SERIE A (เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ลงไปใต้น้ำเคลือบ)

- 1.) ผสมเอนโกบ 50 กรัมกับน้ำ 25 มิลลิลิตร และผสมเคลือบ 50 กรัมกับน้ำ 25 มิลลิลิตร เติมซิงค์ออกไซด์ลงไปปริมาณ 3, 5 และ 10%wt. (ใช้ชื่อย่อ A3, A5 และ A10 ตามลำดับ) ผสมเข้าด้วยกัน
- 2.) เช็ดหน้ากระเบื้องดิบด้วยฟองน้ำ แล้วนำไปจุ่มเอนโกบเป็นเวลา 5 วินาที และนำไปจุ่มเคลือบที่ผสมซิงค์ออกไซด์เป็นเวลา 5 วินาที
- 3.) นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
- 4.) จากนั้นนำชิ้นงานที่อบไว้ไปเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และแช่ไฟ 1 ชั่วโมง

5.3.2 SERIES B (เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ลงในซิลิกาโซลเจล)

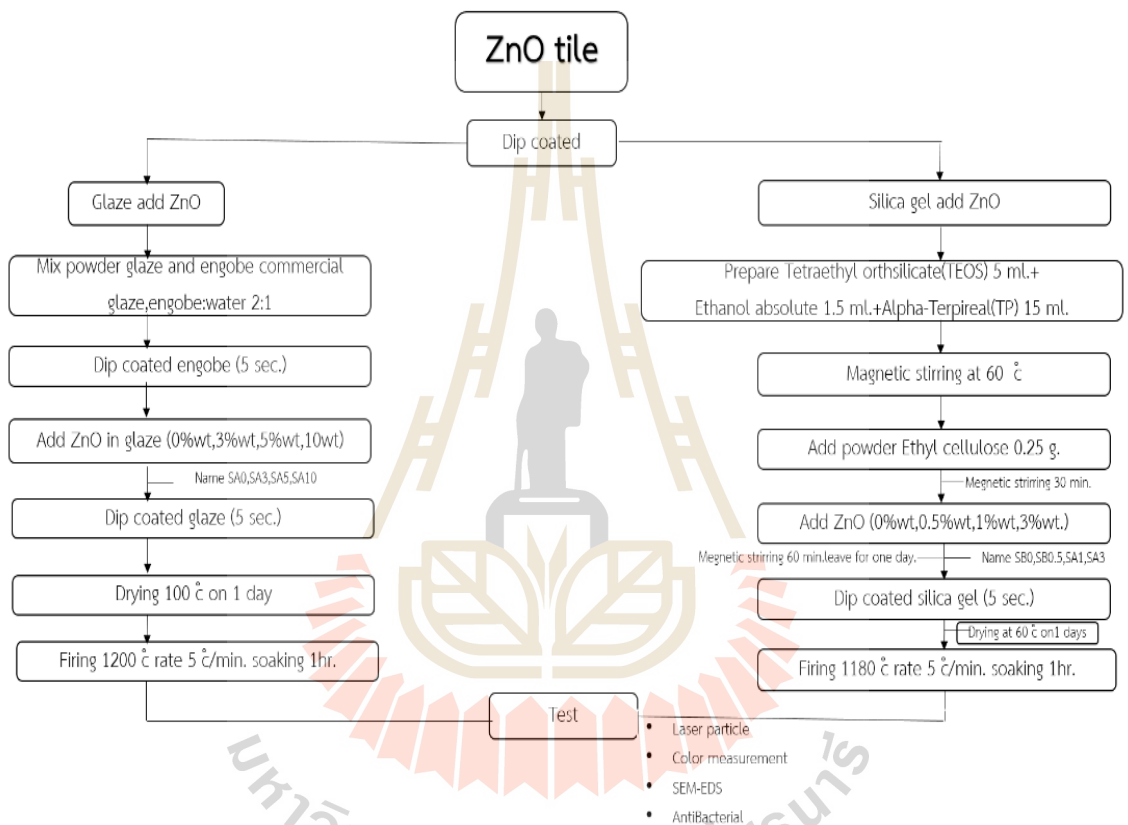
- 1.) เตรียมชิ้นงานโดยทำการผสมเอนโกบ 50 กรัมผสมน้ำ 25 มิลลิลิตร และผสมเคลือบ 50 กรัมกับน้ำ 25 มิลลิลิตร ผสมให้เข้าเป็นส่วนผสมเดียวกัน
- 2.) เช็ดหน้ากระเบื้องดิบด้วยฟองน้ำ และนำกระเบื้องจุ่มเอนโกบเป็นเวลา 5 วินาทีและจุ่มเคลือบเป็นเวลา 5 วินาที
- 3.) เตรียมซิลิกาโซลเจล โดยผสม Tetraethyl Orthsilicate (TEOS) 5 มิลลิลิตร Ethanol Absolute 1.5 มิลลิลิตร และ Alpha-Terpireal(TP) 15 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ แล้วนำไปวางบน Hot Plate ตั้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- 4.) เปิดเครื่อง Magnetic Stirrer เติมผง Ethyl Cellulose 0.25 กรัม ปิดด้วย Parafilm ปั่นทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันเติม ซิงค์ออกไซด์ใน

ปริมาณ 0.5, 1 และ 3%wt (ใช้ชื่อย่อ B0.5, B1 และ B3 ตามลำดับ) แล้ว ปิดด้วย Parafilm กวนทิ้งไว้ 60 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 1 วัน

5.) นำชิ้นทดสอบตามข้อ 2 ที่เตรียมไว้มาจุ่มเจลเป็นเวลา 5 วินาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

6.) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1180 องศาเซลเซียส อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้เวลาแช่ไฟ 1 ชั่วโมง

แผนภาพแสดงการเตรียมเคลือบกระเบื้องตาม Series A และ B แสดงในรูปที่ 5. 1



รูปที่ 5. 1 การเตรียมเคลือบกระเบื้องตาม Series A และ B

5.3.3 การตรวจสอบสมบัติของเคลือบเซรามิก และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย

5.3.3.1 วิธีทดสอบ Laser Particle Size Analysis ด้วยเครื่อง Horiba/LA950V2

1.) ชั่งสารชั่งค็อกไซด์ 1 กรัม

2.) ทำsampling โดยเอาผงชั่งค็อกไซด์ออกมา จากนั้นตัดแบ่งเป็น 4 กอง แล้วเอาฝั่งที่อยู่ตรงข้ามกันออกมา 2 กอง แล้วเอามาผสมกัน แล้วทำอีกรอบ

3.) เตรียมเครื่อง Horiba/LA950V2 ให้พร้อมใช้งาน

- 4.) นำผงซิงค์ออกไซด์ที่ได้ใส่ใน sample holder โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการกระจายอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ บันทึกผลการวิเคราะห์

5.3.3.2 วิธีการทดสอบ SEM-EDS รุ่น Auriga

- 1.) นำชิ้นงานกระเบื้อง ตัดขนาด $1 \times 1 \times 0.3 \text{ cm}^3$
- 2.) อบกระเบื้องที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.) ติดแผ่นคาร์บอนข้างหลังกระเบื้องเพื่อให้กระเบื้องสามารถนำไฟฟ้าได้
- 4.) นำไปเคลือบทอง โดยเปิดเครื่อง เปิดถังแก๊ส Argon วัดความสูงของตัวอย่างรวมกับ Stub
- 5.) กด Vent เพื่อให้ความดันภายในและภายนอกเท่ากัน วาง Stage บนแท่นวาง Stage เลือกเมนู Glow Discharge กด Start แล้วรอนจนกว่าจะเสร็จ พอเสร็จกด home เพื่อกลับสู่เมนูหลัก
- 6.) เลือกเมนู Sputtering แล้วกด Gold Sputtering ใส่ความหนาของทองที่จะเคลือบ 1 นาโนเมตร รอนจนเสร็จ แล้วกด Complete กด Home เพื่อกลับสู่หน้าจอหลัก แล้วกด Vent รอให้ความดันภายในและภายนอกเท่ากัน แล้วค่อยนำชิ้นงานออก
- 7.) จากนั้นนำกระเบื้องที่เคลือบด้วยทองไปส่องด้วยกล้อง (Scanning Electron Microscopy : SEM) โดยใช้กำลังขยาย 25 เท่า และ 2000 เท่า จากนั้นวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณธาตุด้วย (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) ในบริเวณที่เป็นอนุภาคซิงค์ออกไซด์
- 8.) บันทึกผล

5.3.4 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย

- 1.) ตัดกระเบื้องขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$
- 2.) เตรียม EMB (อาหารเลี้ยงเชื้ออีโคไล) และ NB (อาหารที่จะใส่ในเพลต) นำไป Autoclave (เครื่องฆ่าเชื้อแรงดันไอน้ำ) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส แช่ไฟเป็นเวลา 5 นาที
- 3.) นำอาหารที่ได้จากการนำไปฆ่าเชื้อ NB เกล่งในเพลตที่เตรียมไว้ แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- 4.) นำ EMB ที่ได้จากการฆ่าเชื้อ เชื้ออีโคไลลงใน EMB ตั้งบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
- 5.) เตรียมหลอดทดลองใส่น้ำ DI ปริมาณ 9 มิลลิลิตร นำไป Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส แช่ไฟเป็นเวลา 5 นาที

- 6.) นำกระเบื้องที่ตัดไว้ใส่ในบีกเกอร์ที่มีอาหาร EMB อยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วเปิดแสงไฟ LED สีขาวที่มีความยาวคลื่นประมาณ 462 nm เพื่อให้เกิดเกิดกระบวนการโฟโตแคตาไลติก
- 7.) ดูดสารขึ้นมาปริมาณ 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองบริเวณฝาตรงที่จะเปิด เพื่อให้ความร้อนฆ่าเชื้อโรค หยดในหลอดทดลองที่มีน้ำ DI ปริมาณ 9 มิลลิลิตร ลงในไฟอีกที จากนั้นนำไปใส่เครื่องผสมสารละลาย เปิดฝา ลงไฟ ดูดสารขึ้นมา 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่ในหลอดทดลองที่ 2 แล้วทำซ้ำเหมือนหลอดที่ 1 โดยในการทดลองนี้ทำการเจือจางแบบนี้ทั้งหมด 8 ครั้ง
- 8.) ดูด EMB ที่ได้จากการเจือจางในหลอดทดลองที่ 8 ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร นำไปหยดลงบนเพลต จากนั้นใช้แท่งแก้วเกลี่ยให้เชื้อกระจายทั่วทั้งเพลต เพื่อให้ง่ายต่อการนับ
- 9.) ทำแบบนี้ทุกๆ 15 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง แล้วนำเพลตที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
- 10.) นำเพลตมานับเชื้อ และบันทึกผล

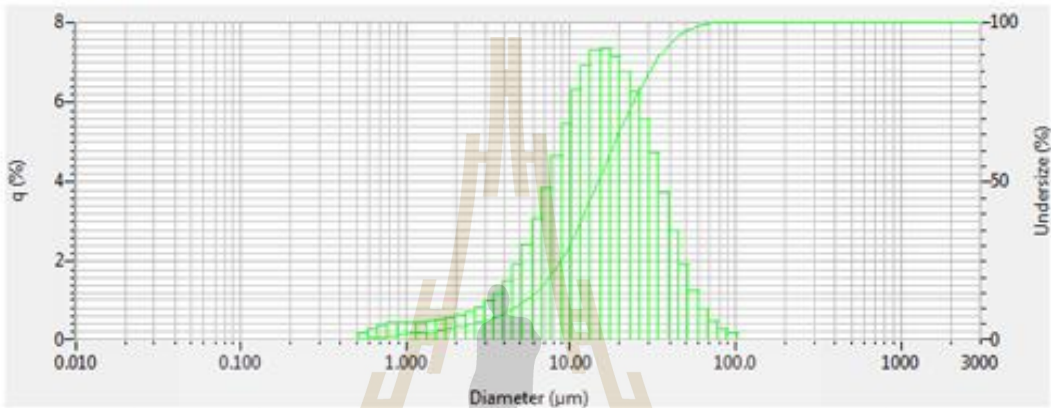
หมายเหตุ การทดลองนี้ต้องมีความระมัดระวังเรื่องความสะอาดอย่างมาก เพราะจะมีการปนเปื้อนของเชื้ออื่นที่ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนได้

5.4 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองของ Laser Scattering Particle Distribution Analyzer LA-950 แสดงในรูปที่ 5. 2 หาขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ โดยเครื่อง Horiba/LA950V2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean size) เท่ากับ 18.17 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคกลาง (Median size) เท่ากับ 14.87 ไมโครเมตร ค่า $D(v,0.1)$ คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้ เท่ากับ 4.68 ไมโครเมตร ค่า $D(v,0.5)$ คือ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้ เท่ากับ 14.87 ไมโครเมตร ค่า $D(v,0.9)$ คือ 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 35.77 ไมโครเมตร และค่าความกว้างในการกระจายตัวเท่ากับ (Span) 2.09

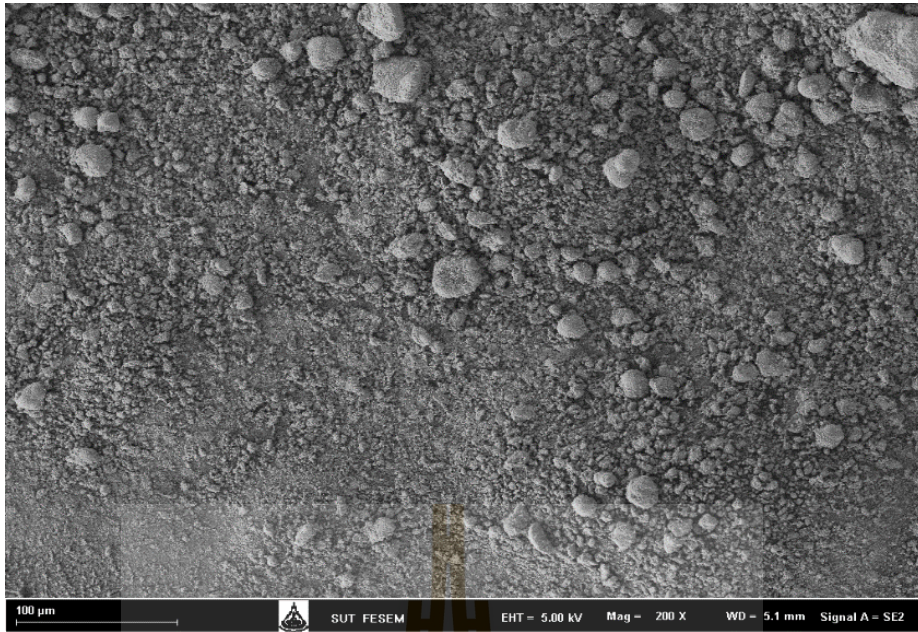
Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: ZP 40L Zinc Oxide	Median size	: 14.86769 (µm)
Data name	: 201709191128101	Mean size	: 18.17251 (µm)
Transmittance (R)	: 89.5 (%)	Variance	: 182.06 (µm ²)
Transmittance (B)	: 85.0 (%)	St. Dev.	: 13.4931 (µm)
Circulation speed	: 5	Mode size	: 16.2142 (µm)
Agitation speed	: 10	Geo. mean size	: 13.5003 (µm)
Ultrasound	: 01:00 (7)	Geo. variance	: 1.3752 (µm ²)
Iteration mode	: Auto	Span	: 2.0908
Distribution base	: Volume	D(v,0.1)	: 4.68236 (µm)
Refractive index (R)	: Zinc Oxide	D(v,0.5)	: 14.86769 (µm)
	[zinc oxide (2.000 - 0.000),water(1.333)]	D(v,0.9)	: 35.76705 (µm)
Refractive index (B)	: Zinc Oxide		
	[zinc oxide (2.000 - 0.000),water(1.333)]		
Material	:		
Source	:		
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	:		



No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.329	0.000	0.000	51	10.097	6.461	30.607	76	300.618	0.000	100.000
2	0.013	0.000	0.000	27	0.369	0.000	0.000	52	11.868	6.224	36.991	77	344.226	0.000	100.000
3	0.015	0.000	0.000	28	0.448	0.000	0.000	53	13.246	6.922	43.613	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	7.272	51.028	79	451.686	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.129	0.129	55	17.377	7.216	58.401	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.234	0.234	56	19.904	7.119	66.620	81	592.187	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.334	0.334	57	22.797	6.799	72.278	82	678.604	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.437	0.437	58	26.111	6.240	78.824	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.008	0.457	0.813	59	29.907	5.674	84.269	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.161	0.382	1.205	60	34.258	4.716	88.814	85	1019.518	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.401	1.306	61	39.234	3.728	92.639	86	1167.728	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.434	1.739	62	44.938	2.732	95.272	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.471	2.210	63	51.471	1.836	97.168	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.516	2.727	64	59.983	1.232	98.390	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.579	3.306	65	67.823	0.767	98.157	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.646	3.952	66	77.329	0.482	99.679	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.718	4.790	67	88.683	0.263	99.942	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.990	5.708	68	101.480	0.138	100.000	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.908	1.179	7.881	69	116.210	0.000	100.000				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	1.481	9.362	70	133.103	0.000	100.000				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	1.836	11.248	71	152.482	0.000	100.000				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	2.409	13.686	72	174.616	0.000	100.000				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	3.084	16.711	73	200.000	0.000	100.000				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	3.808	20.518	74	229.078	0.000	100.000				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	4.627	25.148	75	262.376	0.000	100.000				

รูปที่ 5. 2 แสดงขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของคลื่นแสงจากเครื่อง Horiba Laser Particle Size Distribution Analyzer(รุ่น LA 950)



รูปที่ 5.3 แสดงภาพถ่ายลักษณะการเกาะรวมกันของซิงค์ออกไซด์โดยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

ตารางที่ 5. 1 ค่าวิเคราะห์สีของชั้นทดสอบ Series A

Series A Exclude mode							
ID	L*	a*	b*	dL*	da*	db*	dE*
Control	91.06	-0.38	3.61	90.06	-0.38	3.61	
A3 ชั้นที่ 1	91.81	-0.79	4.64	0.75	-0.41	1.04	1.34
A3 ชั้นที่ 2	91.31	-0.79	4.85	0.24	-0.41	1.24	1.33
A3 ชั้นที่ 3	91.5	-0.79	4.81	0.43	-0.41	1.2	1.34
A5 ชั้นที่ 1	92.55	-0.6	3.72	1.49	-0.22	0.11	1.51
A5 ชั้นที่ 2	92.55	-0.59	3.74	1.49	-0.21	0.13	1.54
A5 ชั้นที่ 3	92.68	-0.59	3.81	1.62	-0.21	0.2	1.64
A10 ชั้นที่ 1	94.95	-0.51	3.06	3.89	-0.13	-0.55	3.93
A10 ชั้นที่ 2	94.02	-0.5	3.04	2.96	-0.12	-0.57	3.02
A10 ชั้นที่ 3	94.21	-0.46	3.2	3.15	-0.8	-0.41	3.27

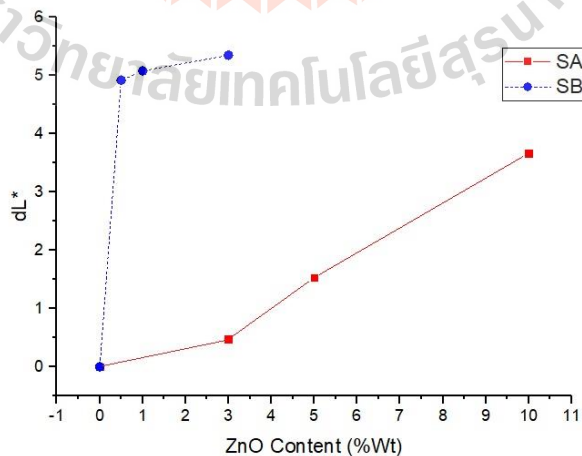
ตารางที่ 5. 2 ค่าวิเคราะห์สีของเคลือบบนชิ้นทดสอบ Series B

Series B Exclude mode							
ID	L*	a*	b*	dL*	da*	db*	dE*
Control	90.3	-0.32	2.9	90.3	-0.32	2.9	
B 0.5	95.22	1.21	3.58	4.92	1.53	0.68	5.2
B 1	95.38	1.11	3.29	5.08	1.43	0.39	5.29
B 3	95.65	0.91	3.63	5.35	1.23	0.74	5.54

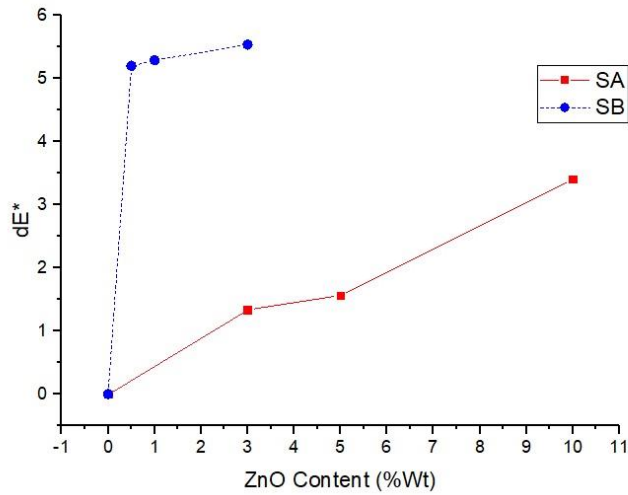
หมายเหตุ ค่า dE* สามารถคำนวณได้จาก $dE^* = \sqrt{dL^{*2} + da^{*2} + db^{*2}}$

จากตารางที่ 5. 2 และตารางที่ 5. 3 คือค่าที่แสดงจากเครื่องวัดสี Hunter Lab (รุ่น Ultra-scan XE) ในโหมด Exclude mode แสดงค่า L* เป็นค่าใช้แทนสี ขาว-ดำ ที่ระดับสูงสุดของ ค่า L* เป็นสีขาว่าที่ระดับต่ำสุดของค่านี้จะเป็นสีดำ ค่า a* ที่ระดับสูงสุดของ แทนสีแดง ที่ระดับต่ำสุดแทนสีเขียว และค่า b* ที่ระดับสูงสุดของ แทนสีเหลือง และ b* ที่ระดับต่ำสุดแทนสีน้ำเงิน

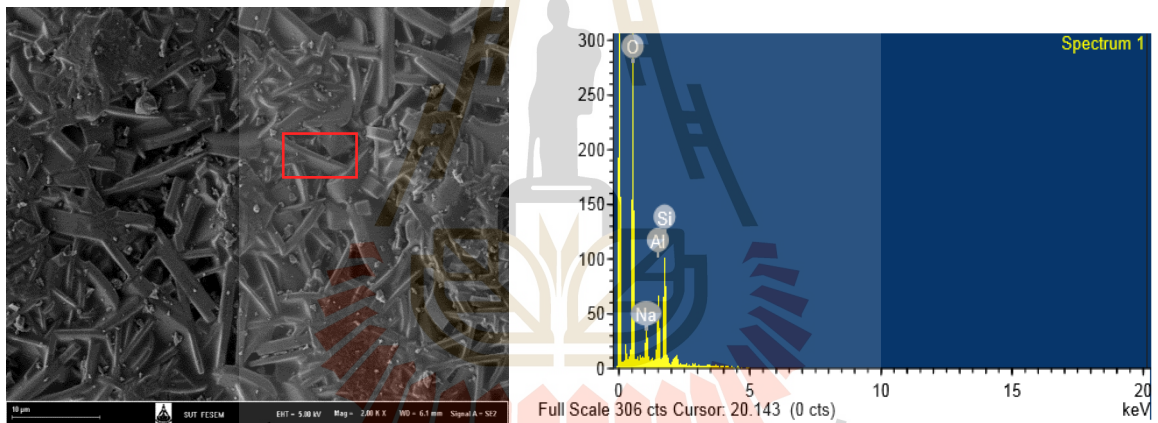
จากผลการวิเคราะห์สีบนเคลือบ พบว่า เคลือบกระเบื้อง Series A มีความแตกต่างของสีเคลือบเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่า 3% พบว่าเคลือบมีสีขาวสว่างมากขึ้น ในขณะที่เคลือบกระเบื้อง Series B จะมีค่าความขาวสว่างขึ้นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเคลือบกระเบื้องมาตรฐาน ดังนั้นหากนำมาเคลือบบนกระเบื้องเซรามิก จะทำให้สีเคลือบมีความผิดเพี้ยนไป ไม่ตรงตามสเปคของสีกระเบื้องตามที่โรงงานต้องการ



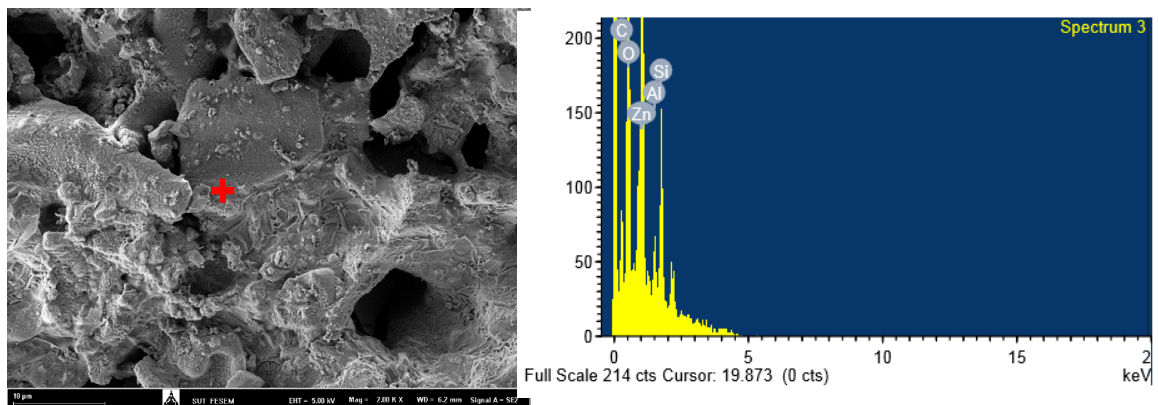
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าความแตกต่างด้านความสว่าง (dL*) ของเคลือบบนชิ้นทดสอบ Series A และ B กับเคลือบมาตรฐาน เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ



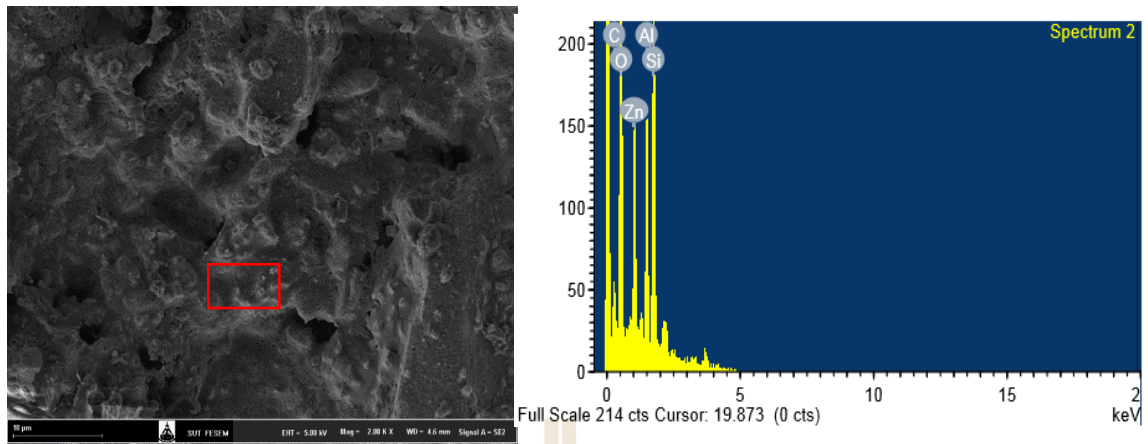
รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าผลรวมความแตกต่างสี (dE^*) ของเคลือบบนชิ้นทดสอบ Series A และ B เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค SEM และ EDS



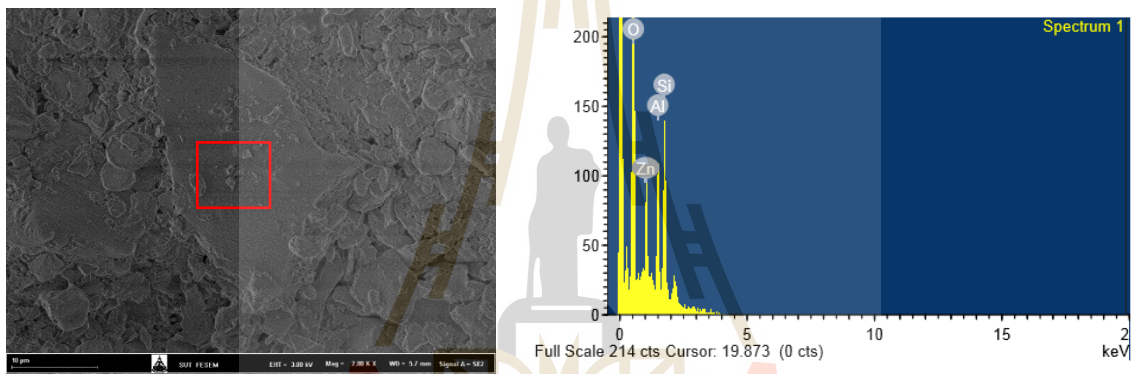
รูปที่ 5.6 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (A0)



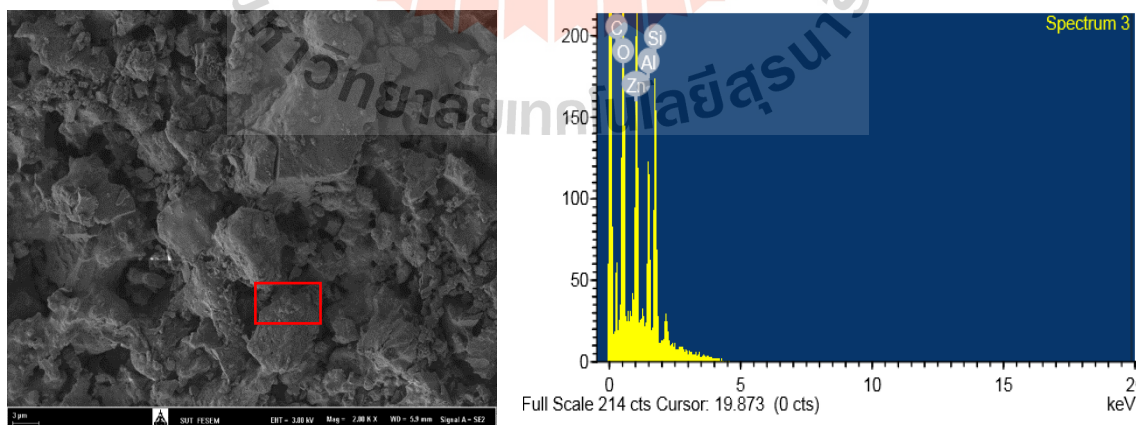
รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (A10)



รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (B0.5)



รูปที่ 5.9 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (B1)



รูปที่ 5.10 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (B3)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค และหาซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวเคลือบ จากการส่องกล้อง SEM-EDS รุ่น Auriga ที่กำลังขยาย 2000 เท่าพบผงอนุภาคเม็ดเล็กๆ เมื่อยิง EDS ลงบริเวณพื้นที่ในกรอบสีแดง ปรากฏพีคธาตุ ซิงค์ (Zn) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น

5.4.1 ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของกระเบื้องเคลือบ ภายใต้สภาวะที่มีแสง

ตารางที่ 5.3 แสดงจำนวนโคโลนีที่นับได้ในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบที่มีซิงค์ออกไซด์ Series A

ตัวอย่าง	เวลา(นาท)	จำนวนโคโลนี			เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
		นับครั้งที่1	นับครั้งที่2	นับครั้งที่3		
Control	0	258	254	230	247.33	12.36
	15	284	280	242	268.67	18.93
	30	300	300	298	299.33	0.94
	45	300	292	280	290.67	8.22
	60	274	278	267	273	4.55
A3	0	232	169	186	195.67	26.61
	15	176	152	153	160.33	11.09
	30	101	133	124	119.33	13.47
	45	76	84	92	84	6.53
	60	53	74	63	63.33	8.58
A5	0	220	196	193	203	12.08
	15	166	165	158	163	3.56
	30	96	124	114	111.33	11.59
	45	73	65	69	69	3.27
	60	56	52	47	51.67	3.68
A10	0	245	221	178	214.67	27.72
	15	178	138	145	153.67	17.44
	30	123	94	78	98.33	18.62
	45	95	64	35	64.67	24.5
	60	43	38	21	34	9.42

ตารางที่ 5. 4 แสดงจำนวนโคลนที่นับได้ในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบที่มีซิงค์ออกไซด์ Series B

ตัวอย่าง	เวลา(นาที)	จำนวนโคลน			เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
		นับครั้งที่1	นับครั้งที่2	นับครั้งที่3		
Control	0	258	254	230	247.33	12.36
	15	284	280	242	268.67	18.93
	30	300	300	298	299.33	0.94
	45	300	292	280	290.67	8.22
	60	274	278	267	273.00	4.55
B0.5	0	190	215	177	194.00	15.77
	15	150	178	162	163.33	11.47
	30	123	135	122	126.67	5.91
	45	95	104	105	101.33	4.50
	60	75	87	95	85.67	8.22
B1	0	137	162	134	144.33	12.55
	15	98	120	123	113.67	11.15
	30	86	75	87	82.67	5.44
	45	45	65	56	55.33	8.18
	60	39	55	44	46.00	6.68
B3	0	141	180	150	157.00	16.67
	15	102	115	96	104.33	7.93
	30	84	86	74	81.33	5.25
	45	85	65	46	65.33	15.92
	60	46	43	33	40.67	5.56

ตารางที่ 5. 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การยู่รอดของแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบ Series A

ตัวอย่าง	เวลา(นาที)	เปอร์เซ็นต์การยู่รอดของแบคทีเรีย			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
Control	0	100	100	100	100	0
	15	110.08	110.24	105.22	108.51	2.33
	30	116.28	118.11	129.57	121.32	5.88
	45	116.28	114.96	121.74	117.66	2.93
	60	106.2	109.45	116.09	110.58	4.11
A3	0	100	100	100	100	0
	15	75.86	89.94	82.26	82.69	5.76
	30	43.53	78.7	66.67	62.97	14.59
	45	32.76	49.7	49.46	43.98	7.93
	60	22.84	43.79	33.87	33.5	8.55
A5	0	100	100	100	100	0
	15	75.45	84.18	81.87	80.5	3.69
	30	43.64	63.27	59.07	55.32	8.44
	45	33.18	33.16	35.75	34.03	1.22
	60	25.45	26.53	24.35	25.45	0.89
A10	0	100	100	100	100	0
	15	72.65	62.44	81.46	72.19	7.77
	30	50.2	42.53	43.82	45.52	3.35
	45	38.78	28.96	19.66	29.13	7.8
	60	17.55	17.19	11.8	15.51	2.63

ตารางที่ 5. 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ ของเคลือบ Series B

ตัวอย่าง	เวลา(นาที)	เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่ 3		
Control	0	100	100	100	100	0
	15	110.08	110.24	105.22	108.51	2.33
	30	116.28	118.11	129.57	121.32	5.88
	45	116.28	114.96	121.74	117.66	2.93
	60	106.2	109.45	116.09	110.58	4.11
B1	0	100	100	100	100	0
	15	78.95	82.79	91.53	84.42	5.26
	30	64.74	62.79	68.93	65.48	2.56
	45	50	48.37	59.32	52.56	4.82
	60	39.47	40.47	53.67	44.54	6.47
B1.5	0	100	100	100	100	0
	15	71.53	74.07	91.79	79.13	9.01
	30	62.77	46.3	64.93	58	8.32
	45	60.28	36.11	30.67	42.35	12.87
	60	28.47	33.95	32.84	31.75	2.37
B3	0	100	100	100	100	0
	15	72.34	63.89	64	66.74	3.96
	30	59.57	47.78	49.33	52.23	5.23
	45	60.28	36.11	30.67	42.35	12.87
	60	32.62	23.89	22	26.17	4.63

$$\text{เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย} = \frac{\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลาใดๆ}}{\text{จำนวนแบคทีเรียเริ่มต้น}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ A10

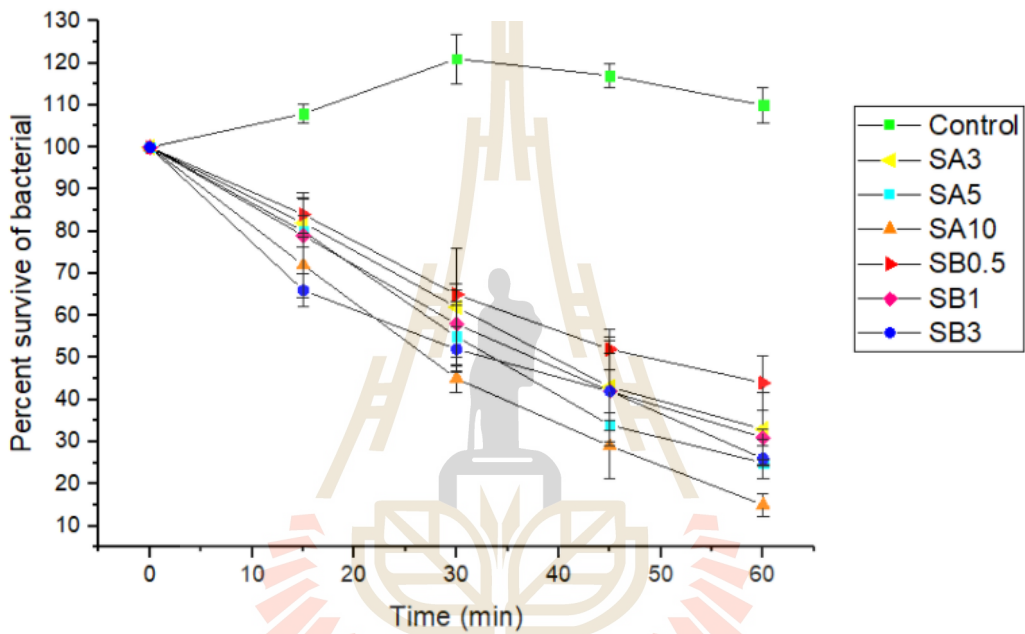
$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย ที่เวลา 0 นาที} &= \frac{153.67}{214.67} \times 100 \\ &= 71.58 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย ที่เวลา 15 นาที} &= \frac{153.67}{214.67} \times 100 \\ &= 71.58 \% \end{aligned}$$

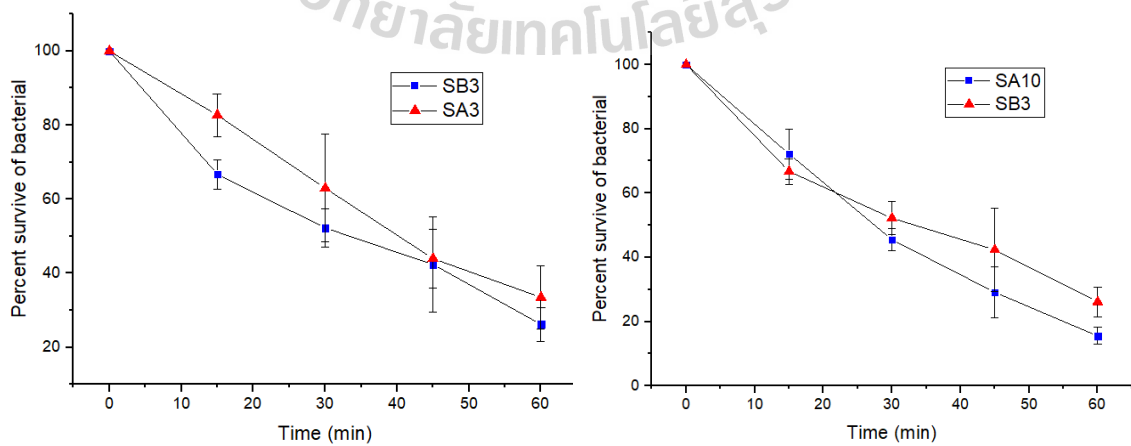
เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย ที่เวลา 30 นาที $= \frac{98.33}{214.67} \times 100$
 $= 45.81 \%$

เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย ที่เวลา 45 นาที $= \frac{64.67}{214.67} \times 100$
 $= 30.12 \%$

เปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรีย ที่เวลา 60 นาที $= \frac{34.00}{214.67} \times 100$
 $= 15.84 \%$



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การอยู่รอดของแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ ของ Series A,B

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทำกระเบื้องก้ำจัดแบคทีเรียโดยใช้ผงซิงค์ออกไซด์ทางการค้า ระบุขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 33 นาโนเมตร นำไปทดสอบหาขนาดอนุภาคจากเครื่อง Horiba Particle Size Analyzer โดยทำการวัดขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ น้ำ เป็นตัวกลางในการกระจายตัวของอนุภาคเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลได้ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 18.172 μM เมื่อทำการส่องดูโครงสร้างจุลภาค จากเครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด รูปที่ 7. พบว่าขนาดของอนุภาคมีความแตกต่างกันมากเพราะอนุภาคเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่ม (Agglomerate) ของซิงค์ออกไซด์

เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสใน Series A และ 1180 องศาเซลเซียสใน Series B คุณสมบัติของเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ เนื่องจากงานวิจัยของ Antibacterial Material in Ceramic Tiles. Procedia Chemistry [5] มีการเติมไททาเนียมออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดสีของกระเบื้องเหลืองขึ้นและรานตัว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของเคลือบจากเครื่อง Hunter Lab เพื่อเปรียบเทียบค่าความเปลี่ยนแปลงของสีในส่วนที่ไม่ทำการเติมซิงค์ออกไซด์และส่วนที่ทำการเติมทั้งชนิด A และ B โดยเคลือบที่ทำการทดลองมีสีขาวยิ่งทำการเปรียบเทียบค่าความสว่าง (different of lightness; dL^*) และ ค่าของสีที่เปลี่ยนแปลงไป (Total different of color; dE^*) จากตารางที่ 2. Series A (SA) ที่ SA3 (3 คือ เปอร์เซ็นต์ในการเติมซิงค์ออกไซด์) มีค่าความแตกต่างของความสว่างและค่าความแตกต่างของสีอยู่ 0.47, 1.34 ส่วน SA5 มีค่าความแตกต่างของความสว่างและค่าความแตกต่างของสีอยู่ 1.53, 1.56 และ SA10 มีค่าความแตกต่างของความสว่างและค่าความแตกต่างของสีอยู่ 3.33, 3.41 ของ จากตารางที่ 3. Series B (SB) ที่ SB0.5 มีค่าความแตกต่างของความสว่างและค่าความแตกต่างของสีอยู่ 4.92, 5.2 ส่วน SB1 มีค่าความแตกต่างของความสว่างและค่าความแตกต่างของสีอยู่ 5.08, 5.29 และ SB3 มีค่าความแตกต่างของความสว่างและค่าความแตกต่างของสีอยู่ 5.35, 5.54 จะเห็นได้ว่าปริมาณซิงค์ที่มากขึ้นส่งผลให้เคลือบมีความสว่างมากขึ้น เพราะซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติเพิ่มความสว่างแก่เคลือบ [6] ส่วนวิธีการทำเคลือบแบบ Series B จะมีความสว่างมากกว่า Series A

เมื่อทำการทดสอบดูโครงสร้างจุลภาคเพื่อดูการติดตัวของซิงค์ออกไซด์บนเคลือบ มีอนุภาคของซิงค์บางส่วนมีอยู่บริเวณพื้นผิวของกระเบื้อง (จากรูปที่ 8, 9, 10, 11, และ 12) และดูได้จากพิกที่ปรากฏซิงค์ออกไซด์ ใน EDS

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียที่เวลา 60 นาที พบว่า SA3 มีเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย 32.27 เปอร์เซ็นต์ SA5 มีเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย 25.45 เปอร์เซ็นต์ SA10 มีเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย 15.84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกระเบื้องชนิด Series B ที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ลงไปในซิลิกาเจล (Silica sol-gel) โดยปริมาณในการเติมที่แตกต่างกัน หาเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียที่เวลา 60 นาที พบว่า SB0.5 มีเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย 44.16 เปอร์เซ็นต์ SB1 มีเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย 31.87 เปอร์เซ็นต์ และ SB3 มีเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย 25.90 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ลงไปปริมาณที่เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ

แบคทีเรียจะเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเทียบในปริมาณที่เท่ากันของทั้งสองชนิด Series B จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า เนื่องจากชนิด Series A ซึ่งคือออกไซด์ที่เติมลงไปเป็นเคลือบอาจมีบางส่วนเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นเคลือบทำให้ไม่โดนแสงซึ่งเป็นปัจจัยการเกิดกระบวนการโฟโตแคตตาลิส จึงทำให้กำจัดเชื้อแบคทีเรียได้น้อยกว่าของชนิด Series B

5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทำกระเบื้องที่สามารถกำจัดแบคทีเรียได้ โดยผลของโฟโตแคตตาลิสติกที่ทำให้ปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์ สามารถใช้กับกระเบื้องที่เผาครั้งเดียวได้ ทั้งที่ผ่านการเตรียมเคลือบโดยการเติมซิงค์ออกไซด์ลงไปในน้ำเคลือบ (Series A) และชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยซิลิกาโซลเจลที่เติมซิงค์ออกไซด์ (Series B) ใช้ซิงค์ออกไซด์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 18.172 ไมโครเมตร ถึงแม้ว่าขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์จะเป็นอนุภาคไมโครแต่ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิสติกได้ โดยดูผลการทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM-EDS มีการเกาะของซิงค์ออกไซด์กระจายบนผิวเคลือบ และจากการทดสอบดูการลดลงของแบคทีเรียที่เวลาต่างๆ มีการลดลงของแบคทีเรีย โดยที่ปริมาณของซิงค์ออกไซด์จะมีผลต่อการกำจัดแบคทีเรีย กล่าวคือปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมมากขึ้นจะส่งผลให้มีการอยู่รอดของแบคทีเรียน้อยกว่าที่เติมปริมาณซิงค์ออกไซด์น้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบที่วิธีการชุบเคลือบโดยมีปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์เท่ากัน การเคลือบด้วยซิลิกาโซลเจลที่เติมซิงค์ออกไซด์ จะมีการอยู่รอดของแบคทีเรียน้อยกว่าการเตรียมเคลือบแบบเติมซิงค์ออกไซด์ลงไปในน้ำเคลือบ

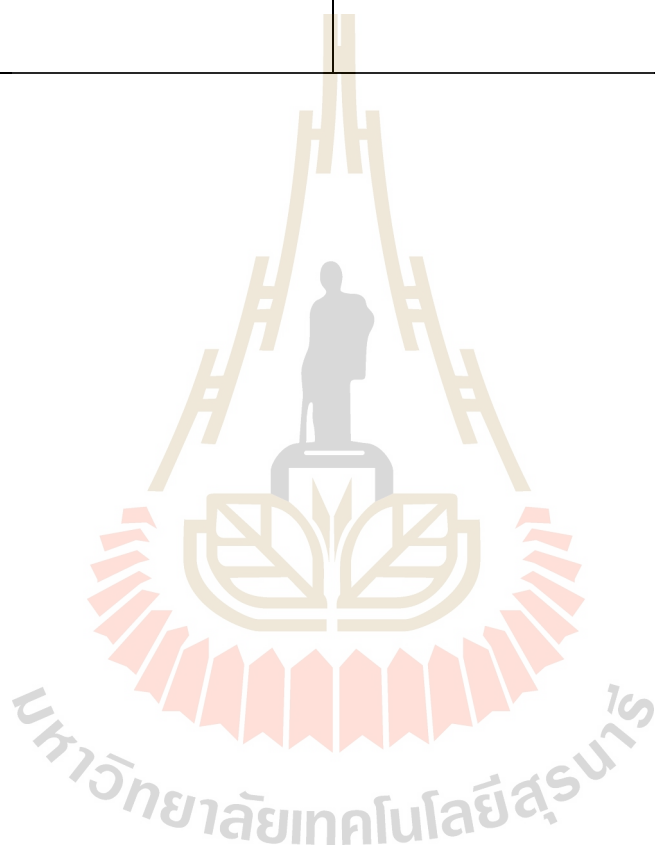
ปริมาณของซิงค์ออกไซด์มีผลต่อสีของเคลือบ กล่าวคือปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่มากขึ้นทำให้เคลือบมีความสว่างมากขึ้น ส่วนการเคลือบด้วยซิลิกาโซลเจลที่เติมซิงค์ออกไซด์จะมีความสว่างมากกว่าการเตรียมเคลือบแบบเติมซิงค์ออกไซด์ลงไปในน้ำเคลือบ

ตารางที่ 5. 7 แสดงการเปรียบเทียบของผลการทดลองทำกระเบื้องกำจัดแบคทีเรียทั้ง Series A และ Series B

ผลการทดลอง	SA	SB	SA เทียบ SB
การเปลี่ยนแปลงของสี	สีสว่างมากขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมมากขึ้น	สีสว่างมากขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมมากขึ้น	SB สว่างกว่า SA

ตารางที่ 5. 7 แสดงการเปรียบเทียบของผลการทดลองทำกระเบื้องก้ำจัดแบบที่เรียทั้ง Series A และ Series B (ต่อ)

ผลการทดลอง	SA	SB	SA เทียบ SB
การก้ำจัดแบบที่เรีย	การอยู่รอดของแบบที่เรียลดลงเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เติมมากขึ้น	การอยู่รอดของแบบที่เรียลดลงเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เติมมากขึ้น	การอยู่รอดของแบบที่เรีย ที่ปริมาณการเติม ซิงค์ออกไซด์เท่ากัน SB มีค่าน้อยกว่า SA



บรรณานุกรม

- Baruah, S., S. K. Pal and J. Dutta (2012). "Nanostructured zinc oxide for water treatment." Nanoscience & Nanotechnology-Asia **2**(2): 90-102.
- Fujishima, A. and K. Honda (1972). "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode." Natural **238**: 37-38.
- Ibănescu, M., V. Muşat, T. Textor, V. Badilita and B. Mahltig (2014). "Photocatalytic and antimicrobial Ag/ZnO nanocomposites for functionalization of textile fabrics." Journal of Alloys and Compounds **610**: 244-249.
- Khan, R., M. S. Hassan, L.-M. Jang, J. H. Yun, H.-K. Ahn, M.-S. Khil and I.-H. Lee (2014). "Low-temperature synthesis of ZnO quantum dots for photocatalytic degradation of methyl orange dye under UV irradiation." Ceramics International **40**: 14827-14831.
- Li, D., J.-F. Huang, L.-Y. Cao, J.-Y. Li, H.-B. O. Yang and C.-Y. Yao (2014). "Microwave hydrothermal synthesis of Sr²⁺ doped ZnO crystallites with enhanced photocatalytic properties." Ceramics International **40**: 2647–2653.
- Matthews, R. W. (1988). "Kinetics of photocatalytic oxidation of organic solutes over titanium dioxide." Journal of Catalysis **111**: 264-272.
- Mekasuwandumrong, O., S. Phothakwanpracha, B. Jongsomjit, A. Shotipruk and J. Panpranot (2010). "Liquid-Phase Selective Hydrogenation of 1-Heptyne over Pd/TiO₂ Catalyst Synthesized by One-Step Flame Spray Pyrolysis." Catalysis Letters **136**: 164-170.
- Meng, Z. and Z. Juan (2008). "Wastewater treatment by photocatalytic oxidation of Nano-ZnO." Global Environmental Policy in Japan **12**: 1-9.
- Saif, M., S. A. El-Molla, S. M. K. Aboul-Fotouh, H. Hafez, M. M. Ibrahim and M. S. A. Abdel-Mottaleb (2013). "Synthesis of highly active thin film based on TiO₂ nanomaterial for self-cleaning application." Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy **112**: 46-51.
- Saleh, R. and N. F. Djaja (2014). "Transition-metal-doped ZnO nanoparticles: Synthesis, characterization and photocatalytic activity under UV light." Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy **130**: 581–590.
- Saleh, R. and N. F. Djaja (2014). "UV light photocatalytic degradation of organic dyes with Fe-doped ZnO nanoparticles." Superlattices and Microstructures **74**: 217–233.

- Selvam, N. C. S., S. Narayanan, L. J. Kennedy and J. J. Vijaya (2013). "Pure and Mg-doped self-assembled ZnO nano-particles for the enhanced photocatalytic degradation of 4-chlorophenol." Journal of Environmental Sciences **25**(10): 2157-2167.
- WHO (2000). Environmental health criteria for disinfectants and disinfectant by products, World Health Organization, Geneva.
- Yang, S., J. Wang, X. Li, H. Zhai, D. Han, B. Wei, D. Wang and J. Yang (2014). "One-step synthesis of bird cage-like ZnO and other controlled morphologies: Structural, growth mechanism and photocatalytic properties." Applied Surface Science **319**: 211-215.
- Yousef, A. R. M., H. S. Emam and D. M. M. Ahmed (2012). "Storage and Hot Water Treatments on Poststorage Quality of Mango Fruit (*Mangifera indica* L.) Variety Copania." Australian Journal of Basic and Applied Sciences **6**(13): 490-496.
- ไชยวงศ์, ก. (2547). การใช้กระบวนการ แสงอาทิตย์-โฟโตแคตตาไลติก สำหรับปฏิกรณ์แบบชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย. มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.





ภาคผนวก

บทความตีพิมพ์เผยแพร่

Antibacterial Activity of ZnO Nanoparticles Coated on Ceramic Tiles Prepared by Sol-Gel Method

**Sumalee CHANRAWANGYOT¹, Sirirat T .RATTANACHAN^{1,*},
Apichon WATCHARENWONG², and Thipwan FANGSUWANNARAK³**

¹*School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

²*School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

³*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

Abstract

Zinc oxide nanoparticles on silica matrix thin films were prepared by the sol-gel method and dip coating on ceramic tiles. In this study, EC (ethyl cellulose) and TP (alpha-terpineol) used as a binder and a solvent in sol-gel method, respectively, were studied on the characteristics of thin films. The thin films were dried and calcined at the temperature of 500°C and 600°C soaking 30 min with the heating rate of 1°C/min. The result of glancing X-ray diffraction showed that thin films were ZnO phase on the amorphous phase of silica matrix. Scanning electron microscope showed the ZnO nanoparticles dispersed on thin films and depended on the concentration of EC and TP. The antibacterial activity test on Gram positive (*Escherichia coli*) and Gram negative (*Staphylococcus aureus*) bacteria were evaluated that films have good photocatalytic under UV irradiation, and also exhibited high antibacterial activity under repeating for 3 times. As mentioned above, ZnO nanoparticles on thin film can be applied on ceramic tiles for antibacterial activity by using photocatalytic process for eco-friendly, low cost and easy for preparation.

Keywords: ZnO thin film; ZnO nanoparticle; Antibacterial activity; Photocatalytic process; Sol-gel method

Introduction

Zinc oxide exhibits many properties such as semiconducting, antibacterial, antifungal and UV filtering properties^(1-4,10). The antibacterial activity of ZnO thin film has been studied in many researches. The antibacterial properties is given to bactericidal and bacteriostatic mechanisms with focus on generation of reactive oxygen species (ROS)⁽⁵⁾. ROS has been a major factor for several mechanisms including cell wall damage due to ZnO-localized interaction, enhancing membrane permeability, internalization of nanoparticle due to loss of proton motive force and uptake of toxic dissolved zinc ions. These can lead to mitochondria weakness, intracellular outflow, and release in gene expression of oxidative stress, which caused eventual cell growth inhibition and cell death. Ceramic tiles are construction products, which is close to human life. ZnO thin film on ceramic

tiles may be a good choice to increase value with antibacterial activity⁽⁶⁾.

In the present study, Zinc oxide nanoparticles on silica matrix thin films were prepared by sol-gel method and coating on ceramic tiles. The effect of EC (Ethyl cellulose) and TP (Alpha-terpineol) contents for sol-gel coating, the annealing temperature from 500-600°C were determined on morphology, chemical structure and their antibacterial activity in water.

Materials and Experimental Procedures

Materials

Chemical precursors were synthesized from alpha-terpineol (TP, C₁₀H₁₈O, Acros, 97%, ethyl cellulose (EC, CH₂CH₃, Acros, 48%), tetraethyl orthosilicate (TEOS, Si(OC₂H₅)₄, Acros, 98%, absolute ethanol (C₂H₅OH, Carlo Erba, 99%) as

* Corresponding author Email: sirirat.b@g.sut.ac.th

starting agents of silica sol-gel. Zinc oxide nano powders, (ZnO, Nanoscience Technology Co., Ltd, 95.5%) used as photocatalytic materials on thin films.

Thin film preparation and testing

The TP and EC concentrations in the sol-gel preparation were varied as shown in Table 1. The concentration of TEOS was prepared by dissolving 5 mL TEOS into 1.5 mL of absolute ethanol. All precursors were mixed all together and stirred at 60°C for 30 min. Then, 0.5 wt% of zinc oxide nano powders were dispersed in solution under stirring at 60°C for 1 h and then aging at room temperature for 24 h to obtain the coating sol. ZnO dispersion gel was deposited on the cleaned ceramic tiles of 1 × 1 in² by dip-coating method for 5 s. After coating, the films were dried at 60°C for 24 h and annealed at 500°C and 600°C for 30 min in air.

Table 1. The variations of sol-gel compositions.

Code	Ethyl cellulose (wt%)	Alpha-terpineol (wt%)	Annealing Temp. (°C)
EC1-TP3-T500	1		500
EC1-TP3-T600			600
EC2-TP3-T500	2	37.5	500
EC2-TP3-T600			600
EC3-TP3-T500	3		500
EC3-TP3-T600			600
EC1-TP5-T500	1		500
EC1-TP5-T600			600
EC2-TP5-T500	2	56.2	500
EC2-TP5-T600			600
EC3-TP5-T500	3		500
EC3-TP5-T600			600

The structural identification of the thin films was carried out using a Glancing X-ray diffractometer (XRD, BRUKER, D8) with Cu K α radiation at a wavelength of 1.5406 Å⁽⁷⁾. The morphology of the thin films surface was determined by a scanning electron microscope (SEM, Zeiss AURIGA). Bacterial gram positive (*Staphylococcus aureus*) and gram negative (*Escherichia coli*) were streaked onto nutrient broth (NB) and incubated overnight at 37°C. Bacterial of 2.9 × 10⁸ CFU/mL were pipetted in 100 mL water. The ZnO coated tiles were put

into the water under UV light. After irradiating every 15 min (15, 30, 45 and 60 min), 1 mL of water was collected and diluted to spread on the NB agar plate⁽⁸⁾. Plates were incubated at 35°C for 24 h. The result was compared to the control without any thin films. The survival bacterial colonies were counted and the antibacterial activity was calculated by equation 1⁽⁹⁾.

$$\text{Antibacterial activity} = (N/N_0) \times 100 \quad (1)$$

Where N and N₀ are the number of survival bacteria and the number of the bacteria before irradiations.

Results and Discussion

Viscosity of the silica gels

The viscosity of the silica gels was determined by using Brookfield method (Brookfield AMETEK, LV spindle set) as shown in Figure 1. The gel of EC3TP3 and EC3TP5 showed the high viscosity as compared to the others. The viscosity was controlled by the EC concentration. However, the gel viscosity could be adjusted by increasing of the TP concentration for diluting the solution of the sol-gel method.

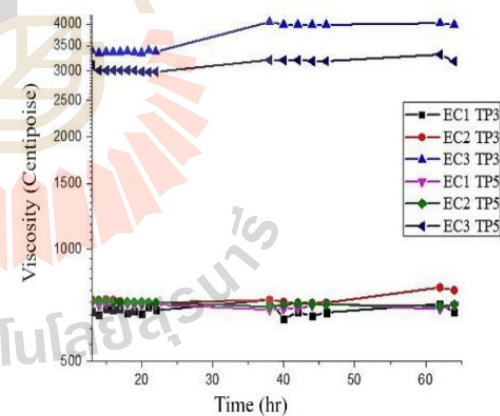


Figure 1. The relationship between the viscosity of the different gels during the aging time.

Structure and morphology

Figure 2. Shows XRD patterns of the ZnO nanoparticles on silica thin films with different concentrations of EC and TP as well as annealing temperatures.

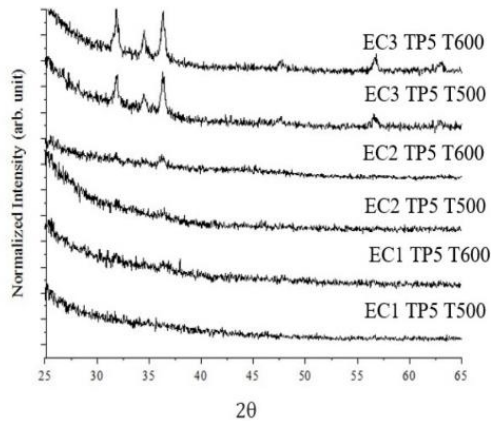


Figure 2. XRD patterns of the ZnO nanoparticles on silica thin film with different EC and TP concentrations annealed at 500 and 600°C.

Antibacterial activity

It indicated that the thin films were amorphous silica and the characteristic diffraction peaks ZnO with hexagonal wurtzite phase (JCPDS No. 36-1451)⁽¹⁾ appeared in EC3TP5 annealed at 500°C and 600°C. SEM images in Figure 3 shows that surface coating with variation of EC and TP concentrations. It can be seen clearly that ZnO nanoparticles dispersed on surface of EC3TP5 coating. The ZnO nanoparticles appeared on the coating with increasing the EC concentration as a binder enhancing the adhesive while ZnO nanoparticles disappeared with increasing of TC concentration as a solvent encouraging the

dispersion of ZnO nanoparticles. Moreover, the adhesive of ZnO nanoparticles could be improved with the higher annealing temperature from 500°C to 600°C. Therefore, the dispersion of ZnO nanoparticles on thin film depended on EC and TP concentration ratio and annealing temperature.

EC3TP5 thin film was selected for the antibacterial activity testing because of appearance of ZnO nanoparticles on surface. The percentage of *S.aureus* and *E.coli* survival in the water with EC3TP5 thin film at different annealing temperatures were demonstrated in Figures 4-5. It indicated that the percentage of bacterial survival decreased continuously with the irradiation time. The annealing temperature of the thin film at 600°C showed the higher effective of antibacterial activity than that of 500°C for both gram-positive and gram-negative bacterial.

Figure 6 shows the antibacterial activity of EC3 TP5 annealed at 600°C against Gram-negative (*Escherichia coli*) and Gram-positive (*Staphylococcus aureus*) bacteria after repeated testing until 3 times. The results also demonstrated that the bacterial inhibition trended to decrease when repeated testing to 3 times.

The antibacterial activity of EC3TP5 annealed at 600°C showed higher effective against gram-positive bacteria than gram-negative. Moreover, the durability of EC3TP5 annealed at 600°C showed better than that of annealed at 500°C due to the strong adhesive of ZnO nanoparticles.

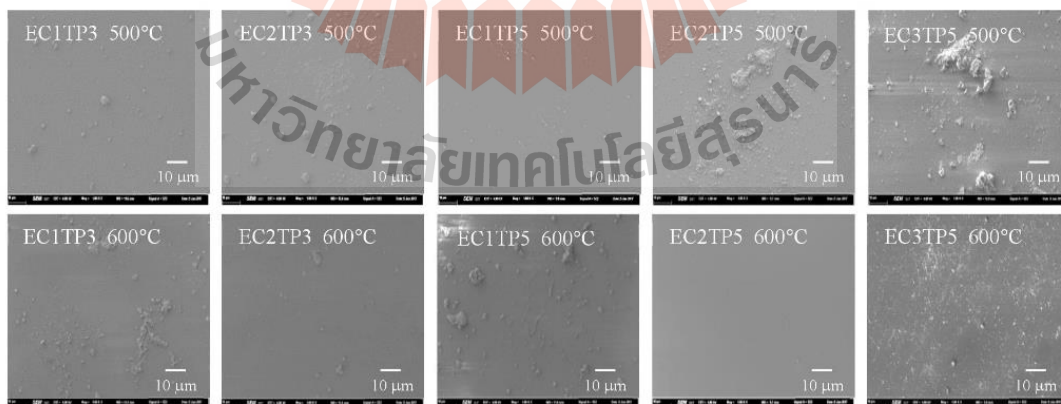


Figure 3. SEM images of the thin films prepared from the different EC and TP concentrations (×1000).

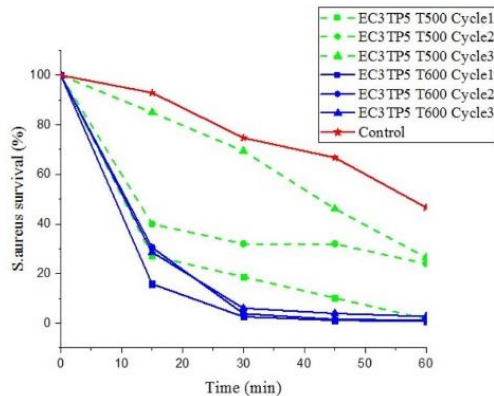


Figure 4. Gram-positive (*Staphylococcus aureus*) bacteria survival for EC3TP5 film annealed at 500°C and 600°C under repeated testing.

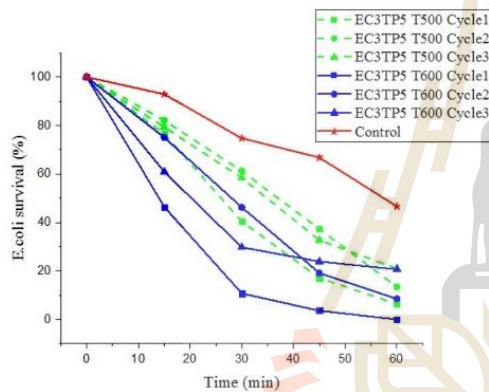


Figure 5. Gram-negative (*Escherichia coli*) bacteria survival for EC3TP5 film annealed at 500°C and 600°C under repeated testing.

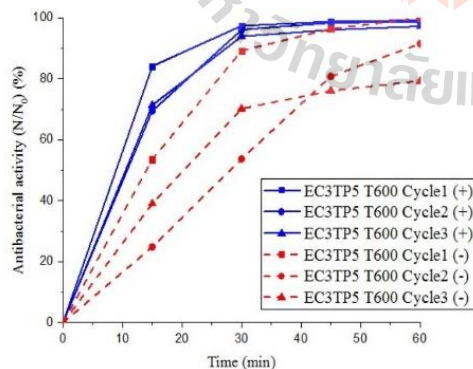


Figure 6. The antibacterial activity test on Gram-negative (*Escherichia coli*) and Gram-positive (*Staphylococcus aureus*) bacteria under repeated testing.

Conclusions

In this study, 0.5 wt% ZnO nanoparticle dispersed on silica thin films were prepared by the sol-gel dip coating method. EC (Ethyl cellulose) and TP (Alpha-terpinol) were used as a binder and a solvent in sol-gel method. The increasing of EC concentration in the silica gel was related to high viscosity and good adhesive on substrate surface. On the other hand, the high TP concentration decreased the viscosity and improve dispersion of ZnO nanoparticles on surface coating. ZnO nanoparticles on silica thin film showed the antibacterial activity against both on Gram negative (*Escherichia coli*) and Gram positive (*Staphylococcus aureus*) bacteria. Therefore, the antibacterial activity is related to the amount of ZnO nanoparticles adhered on the film surface. ZnO nanoparticle dispersed on thin film prepared by sol-gel method can be coated on ceramic tiles and annealed at 600°C presented the effective antibacterial activity and durability.

Acknowledgments

This work was financial support from National Research Council of Thailand. The authors would like to acknowledge to the biology laboratory at Suranaree University of Technology for helping during the antibacterial testing.

References

1. Wang, C., et al, (2012). Antibacterial effects of zinc oxide nanoparticles on *Escherichia coli* K88, *African Journal of Biotechnology*. **11**: 10248-10254
2. Thomas, D., Abraham, J., et al, (2014) Antibacterial activity of pure and cadmium doped ZnO thin film, *Journal home*. Page. 1612.
3. Shi qian, L, et al. (2014). Effective photocatalytic decolorization of methylene blue utilizing ZnO/ rectorite nanocomposite under simulated solar irradiation, *Journal of Alloys and Compounds*. **616**: 227-234.
4. Bensouici, F. et al., (2016). Al doping effect on the morphological, structural and photocatalytic properties of TiO₂ thin layers, *Thin Solid Films*. **616**: 655-661.

5. Sirelkhatim, A., et al., (2015). Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism, *Nano-Micro Letters*. **7(3)**: 219-242.
6. Kääriäinen, M.L., et al., (2013). Zinc release from atomic layer deposited zinc oxide thin films and its antibacterial effect on *Escherichia coli*, *Applied Surface Science*. **278**: 375-380.
7. Krongarrom, P., Rattanachan, S. T. and Fangsuwannarak, T. (2012). ZnO Doped with Bismuth in case of In-Phase Behavior for Solar Cell Application, *Engineering Journal*. **16(3)**: 59-70.
8. Kavanagh, F. (1975). Antibiotic assays—principles and precautions, *Methods in Enzymology*. **43**: 55-69.
9. Ferrari, A, Lombardi, S. and Signoroni, A. (2017). Bacterial colony counting with Convolutional Neural Networks in Digital Microbiology Imaging, *Pattern Recognition*. **61**: 629-640.
10. Fangsuwannarak, T., Krongarrom, P., Kaewphoka, J. and Rattanachan, S.T. (2013). Bismuth Doped ZnO films as anti-reflection coating for solar cells. *IEEE journal*.





หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) : รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตน์จันทร์
(ภาษาอังกฤษ) : Assoc. Prof. Dr. Sirirat Tubsubgnoen Rattanachan
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ที่อยู่ติดต่อ : สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมืองนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 22-4475 โทรสาร (044) 22-4612
E-mail : sirirat.b@sut.ac.th
4. Qualification:

พ.ศ. 2546	D.Eng. (Materials Science and Engineering) Nagaoka University of Technology, Japan
พ.ศ. 2540	M.Sc. (Materials Science) Chulalongkorn University, Thailand
พ.ศ. 2538	B.Sc. (Industrial Chemistry) Chiang Mai University, Thailand
5. Research Fields:

<u>Biomaterials:</u>	synthesis, preparation methods, properties and characterization of materials, bone cement
<u>Composite and Smart materials:</u>	piezoelectric, ferroelectric
<u>Mechanical properties of Ceramic Materials:</u>	Failure and fatigue
6. Thesis works:

<u>BSc. Degree</u>	The Study of Ceramic Enamel on Copper
<u>MSc. Degree</u>	Preparation of Tetracalcium Phosphate from Cattle Bone
<u>PhD. Degree</u>	Mechanical Behavior of Oxide Ceramic-Based Smart Composites with Piezoelectric Phase

9. Rattanchan, S., Lorpayoon, C, Bunphyun, P., Chitosan-crystallized apatite composites for bone cements: Mechanical strength and setting behavior, Key Engineering Materials, Vol. 330-332 II (2007), 839-842
10. Sirirat Rattanachan, Charussri Lorprayoon and Piyanan Bunpayun, Synthesis of Chitosan/brushite Powders for Bone Cement Composites, Journal of Ceramic Society of Japan, 116[1] 2008, p.36-41
11. Borrisutthekul, R., Mitsomwang, P., Rattanachan, S., Mutoh, Y., TIG welding of dissimilar metals between steel/aluminum alloy, Welding in the World, Vol. 53, Special Issue (2009), 585-588
12. Rattana Borrisutthekul, Pusit Mitsomwang, Sirirat Rattanachan and Yoshiharu Mutoh, Feasibility of Using TIG Welding in Dissimilar Metals between Steel/Aluminum Alloy, Energy Research Journal 1 (2), 2010, 82-86
13. Sirirat Rattanachan, Piyanan Boonphayak and Charussri Lorprayoon, Development of chitosan/nanosized apatite composites for bone cements, Asian Biomedicine, Vol. 5, No. 4 (2011), 499-506
14. N. Srakaew and S. T. Rattanchan, Effect of Apatite Wollastonite Glass Ceramic Addition on Brushite Bone Cement Containing Chitosan, Advanced Materials Research Vol. 506 (2012), p.106-109
15. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T. Rattanachan and Thipwan Fangsuwannarak, ZnO doped with Bismuth in case of in-phase behavior for Solar Cell application, Engineering Journal, Vol. 16, no.3 (2012) Special issue: Green Nanotechnology for the future, pp. 59-70.
16. Sirirat T. Rattanachan, Phanuwat Krongarrom, and Thipwan Fangsuwannarak, Boron Doping Effects on the Structural and Optical Properties of Sol-gel Transparent ZnO Films, Key Engineering Materials (2013), Vol. 547, p. 145-151.
17. Sirirat T. Rattanachan, Nuan La-ong Srakaew, Ratiya Pethnin and Nitinat Suppakarn, Effect of Zn Addition on Sol-gel Derived Apatite/Wollastonite Glass-Ceramics Scaffolds, J. Metals, Materials and Minerals (2012), Vol. 22(2), pp. 61-65.
18. Sirirat T. Rattanachan, Phanuwat Krongarrom and Thipwan Fangsuwannarak, Influence of annealing temperature on characteristics of Bismuth doped Zinc Oxide films, American Journal of Applied Sciences (2013), Vol. 10(11), p. 1427-1438.

19. Nuan La-ong Srakaew and Sirirat Tubsungnoen Rattanachan, The pH-dependent properties of the Biphasic Calcium Phosphate for Bone Cements, *Journal of Biomimetrics, Biomaterials and Biomedical Engineering* (2014), V. 21, pp. 3-16
20. Ratiya Phetnin and Sirirat Tubsungnoen Rattanachan, Bio-hybrid composite scaffold from silk fibroin/chitosan/mesoporous bioactive glass microspheres for tissue engineering applications, *Advanced Materials Research* (2014) Vol. 1131, pp 79-83 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1131.79.
21. Ratiya Phetnin and Sirirat T. Rattanachan, Preparation and antibacterial property on silver incorporated mesoporous bioactive glass microspheres, *J. sol-gel Science and Technology* (2015), DOI 10.1007/s10971-015-3697-1.
22. Sumalee CHANRAWANGYOT, Sirirat T. RATTANACHAN, Apichon WATCHARENWONG and Thipwan FANGSUWANNARAK, Antibacterial Activity of ZnO Nanoparticles Coated on Ceramic Tiles Prepared by Sol-Gel Method, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 27 No. 2 pp. 1-5, 2017.
23. Paritat Thaitalay, Nuan La-ong Srakaew and Sirirat Tubsungnoen Rattanachan*, Comparison Among Alpha-tricalcium Phosphate Synthesized by Solid State Reaction and Wet Chemical Reaction for Calcium Phosphate Cements, *Chiang Mai J. Sci.* 2018; 45(x) : 1-9
24. Sirirat Tubsungnoen Rattanachan*, Sanong Suksaweang, Ting-Xin Jiang, Randall B. Widelitz, Cheng-Ming Chuong and Nuan La-ong Srakaew, Self-setting Calcium Phosphate Enhanced with Osteoconduction and Bioactivity for Bone Cement, *Chiang Mai J. Sci.* 2018; 45(x) : 1-8

9. Conferences and Symposiums:

1. Sirirat Rattanachan, , Al₂O₃-based Composite with BaTiO₃ Sintered by Spark Plasma Sintering, JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2002, The 10th JSME Materials and Processing Conference, October 15-18, 2002, 270-275
2. Sirirat Rattanachan, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Effect of Polarization on the Fracture Toughness of BaTiO₃-Al₂O₃ Composites, National Metal and Materials Conference, National Metal and Materials Technology Center, Thailand, August, 2002.

3. Sirirat Rattanachan, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Fracture toughness of BaTiO₃-MgO Composites Sintered by Spark Plasma Sintering, 8th International Symposium on Fracture Mechanics of Ceramics, February 25 - 28, 2003, Houston, TX, USA.
4. Sirirat Rattanachan, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Fracture toughness of BaTiO₃ and BaTiO₃-Al₂O₃ Composite under applied electric field, 8th International Symposium on Fracture Mechanics of Ceramics, February 25 - 28, 2003, Houston, TX, USA
5. Sirirat Rattanachan , 長谷川寛, 宮下幸雄, 武藤 睦治, Fatigue behavior of BaTiO₃/Al₂O₃ Ceramic Composites, JSME Materials Science and Ceramics Conference, Japan, May 2003.
6. Sirirat Rattanachan, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Effect of Electric Field on Fracture Toughness of BaTiO₃-Al₂O₃ Composites, International Symposium on Advanced Materials in Nagoya 2003, October 2-3, 2003, 69-70
7. Sirirat Rattanachan, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Piezoelectric Laminates for Smart Materials Sintered By Spark Plasma Sintering, The 5th International Symposium on the 21st Century COE Program of Nagaoka University of Technology, Miracle Grand Convention Hotel, Bangkok, August 10-11, 2004
8. Sirirat Rattanachan, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Fatigue Behavior of Al₂O₃-based Composite with BaTiO₃ Piezoelectric Phase, Third International Conference on Fatigue of Composites, Doshisha University, Kyoto, Japan, September 13-15, 2004.
9. Yoshiharu Mutoh, Sirirat Rattanachan and Yukio Miyashita, Fracture Toughness of BaTiO₃-Al₂O₃ Composite Under Applied Electric Fields, The 8th 21st Century COE international Symposium on Creation of Hybridized Materials with Super-Functions and Formation of International Research and Education Center, Park Royal Hotel, Batu Feringghi, Penang, Malaysia, August 7-10,2005
10. Yoshiharu Mutoh, Sirirat Rattanachan and Yukio Miyashita, Fracture Toughness and Crack sensing of MgO-Based Smart Composites with Piezoelectric Phase, International Symposium on Frontiers in Design of Materials 2005, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, November 12-13,2005.

11. Piyanan Bunpayun and Sirirat Rattanachan, Low temperature synthesis of crystallized apatite nanoparticles, Asia Bioceramic Symposium 2006, November 7-10, 2006
12. Sirirat Rattanachan, Charussri Lorprayoon and Piyanan Bunpayun, Chitosan-crystallized Apatite Composites for Bone Cements: Mechanical Strength and Setting Behavior, Bioceramics 19, China, Oct. 10-13, 2006.
13. Sirirat Rattanachan, Charussri Lorprayoon and Piyanan Bunpayun, Chitosan-calcium phosphate cement composites for bone substitutes, Asian symposium on materials and processing 2006, Bangkok November 9-10, 2006.
14. Sirirat Rattanachan, Charussri Lorprayoon and Piyanan Bunpayun, Synthesis of Chitosan/brushite powders for Bone Cement Composites, 7th Asian BioCeramics Symposium 2007, September 25-28, 2007, Osaka, Japan
15. Sirirat Rattanachan, Charussri Lorprayoon and Piyanan Bunpayun, Preparation of Chitosan/apatite nanocomposite by co-precipitation with potential bone cement, Second International Conference on Mechanics of Biomaterials & Tissue, December 9-13, 2007, Lihue, Hawaii, USA
16. Sirirat Rattanachan, Charussri Lorprayoon and Piyanan Bunpayun, Development of Apatite Composite for Bone Cement, The Joint Symposium Between National Science and Technology Center and Nagaoka University of Technology, 22 May 2009, NSTDA Thailand
17. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T. Rattanachan and Thipwan Fangsuwannarak, Structural and optical characterizations of n-type doped ZnO by Sol-gel method for photovoltaic, The 8th Electrical Engineering/ Electronic, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2011), Thailand, 17-19 May 2011.
18. N. Srakaew and S.T. Rattanachan, Effect of apatite-wollastonite glass ceramic addition on brushite bone cement containing chitosan, Chiang Mai International Conference on Biomaterials & Applications 2011, Chiang Mai, Thailand, 9-10 August 2011
19. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T. Rattanachan and Thipwan Fangsuwannarak, ZnO doped with Bismuth in case of in-phase behavior for Solar Cell application, Green Nanotechnology for the future (German-Thai Symposium on nanoscience

- and nanotechnology), Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, Thailand, September 13-16, 2011.
20. Sirirat T. Rattanachan, Phanuwat Krongarrom, and Thipwan Fangsuwannarak, Boron Doping Effects on the Structural and Optical Properties of Sol-gel Transparent ZnO Films, International Conference on Electroceramics, 12-16 Dec. 2011, Sydney, Australia
 21. S. Rattanachan, N. Srakaew, R. Pethnin and N. Suppakarn, Effect of Zn addition on Sol-gel derived Apatite/Wollastonite Glass-Ceramics Scaffolds, 7th International Conference on Materials Science and Technology, June 7-8, 2012, Swisotel Le Concorde, Bangkok, Thailand
 22. Sirirat T. Rattanachan and Nuan La-ong Srakaew, Effect of pH on the properties of biphasic calcium phosphate for bone cement, European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, September 8-13, 2013, Sevilla, Spain.
 23. Kaewphoka, J., Fangsuwannarak T. and Rattanachan S.T. (2014). Synthesis of Surfactant-assisted nanostructured Bi-doped Zinc oxide for photo-sensing application. 11th International conference on Electrical Engineering/ Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2014, 14-17 May 2014 Nakhon Ratchasima, Thailand
 24. T.Rattanachan, S., Kaewphoka, J. and Fangsuwannarak T. (2014). Annealing atmosphere of bismuth doped Zinc oxide thin films prepared by CTAB-assisted sol-gel method. In the Grand Renewable Energy 2014 (GRE2014) International Conference. 27 July – 1 August 2014, Tokyo, Japan (Published in Advanced Materials Research Submitted: 2014-12-07, ISSN: 1662-8985, Vol. 1131, pp 79-83)
 25. Ratiya Phetnin and Sirirat T. Rattanachan, Bio-hybrid Composite Scaffold from silk fibroin/chitosan/mesoporous bioactive glass microspheres for tissue engineering applications, Nano Thailand 2014 the 4th Thailand International Nanotechnology Conference 2014, 26-28 Nov., 2014, Bangkok Thailand.
 26. S. Chanrawangyot, A. Watcharenwong, T. Fangsuwannarak and S.T.Rattanachan, Antibacterial activity of ZnO Nanoparticles on Silica Thin Film for Wastewater treatment, 3rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017), 31 May-2 June 2017, Pattaya Thailand.

27. Sirirat Tubsungnoen Rattanachan, Sanong Suksaweang, Ting-Xin Jiang, Randall B. Widelitz, Cheng-Ming Chuong and Nuan La-ong Srakaew, Self-setting calcium phosphate enhanced with osteoconduction and bioactivity for bone cement, The First Materials Research Society of Thailand International Conference, Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand, October 31st - November 3rd, 2017.
28. Oranich Thongsri and Sirirat Tubsungnoen Rattanachan, Synthesis of glass ionomer dental cement by sol-gel method, The First Materials Research Society of Thailand International Conference, Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand, October 31st - November 3rd, 2017.
29. Paritat Thaitalay, Nuan La-ong Srakaew and Sirirat Tubsungnoen Rattanachan, Comparison among Alpha-tricalcium phosphate synthesized by solid state reaction and wet chemical reaction for calcium phosphate cements, The First Materials Research Society of Thailand International Conference, Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand, October 31st - November 3rd, 2017.
30. Paritat Thaitalay, and Sirirat Tubsungnoen Rattanachan, Poly (acrylic acid) modified calcium phosphate cements: the effect of the mixing ratios and the setting reaction, The 8th International Congress on Engineering and Information, 1-4 May, 2018, Hokkaido, Japan

10. Research experiences:

<i>Topics</i>	<i>Supporting Institutes</i>	<i>Duration</i>
Characterization of Nakhon-Ratchasima Clay for Ceramic Application	Suranaree University of Technology (Head of project)	1999-2000
The Preliminary Study of Preparation of Lightweight Concrete Aggregates Produced from Local Clay	Suranaree University of Technology (Head of project)	1999-2000
The Development of mechanical properties for Electrical Insulator body	SUT-Power Insulator Ltd. (Head of project)	2005-2006

The Development of the Self-setting Calcium Phosphate Composite used as Bone Cement for Surgical Application	The Thailand Research Fund (Head of project) 360,000 Baht	2005-2007
Development of an injectable hydroxyapatite bone cement for reconstruction of bone fractures and bone substitutes	MTEC (Head of project)	2007-2008 (2 years)
Research and Development of Low Temperature Bodies and Glazes for Stoneware Industries	MTEC (Head of project)	2008-2009 (2 years)
Development of synthesizing and forming biphasic calcium phosphate	MTEC (co-researcher)	2009 (15 months)
Doped ZnO nanoparticles thin film by sol-gel spin coating for solar cell applications	NANOTEC (Head of project)	2010-2012 (3 years)
Development of Bi-doped ZnO thin film by spin coating for solar cell applications, Mr. Phanuwat Krongarom	National Research Council of Thailand (Advisor of master thesis)	2011
SELF-SETTING BIODEGRADABLE POLYMER/CALCIUM PHOSPHATE COMPOSITE SCAFFOLDS FOR BONE TISSUE ENGINEERING	The Royal Golden Jubilee Ph.D project	2009-2014
DEVELOPEMENT OF POROUS POLYMER/BIOACTIVE GLASS COMPOSITE SCAFFOLD FOR BONE TISSUE ENGINEERING	The Royal Golden Jubilee Ph.D project	2010-2015

Bioactive glass scaffolds through the sol-gel route for bone tissue engineering (384,000 Baht)	National Research Council of Thailand (Head of project)	2011-2012 (2 years)
Improvement of the characteristics of Bi-doped Zinc Oxide thin films with using additional surfactant for solar cell and optoelectronic applications (284,000 Baht)	National Research Council of Thailand (Head of Project)	2015

11. Current researches:

<i>Topics</i>	<i>Supporting Institutes</i>	<i>Duration</i>
Composite of Chitosan/Biphasic Calcium Phosphate for Self-setting Bone Cement (734,000 Baht)	National Research Council of Thailand (Head of Project)	2014-2015 (2 years)
ทุน คปก ของนายปาริทัสน์ ไทยทะเล	The Royal Golden Jubilee Ph.D project	ก.พ. 2558- ม.ค. 2563
ทุน คปก.ของนางสาว อรณิชา ทองศรี	The Royal Golden Jubilee Ph.D project	2559-2564
ปฏิบัติการออกซิเดชันจากการกระตุ้นด้วยแสงของฟิล์มผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเชื่อมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย (350,000 บาท)	National Research Council of Thailand (Head of Project)	2559
ซีเมนต์กระดูกแบบฉีดสำหรับทดแทนกระดูกและสภาวะกระดูกพรุน (900,000)	มหาวิทยาลัยมหิดล	2560 (6 เดือน)

12. Thai Patents:

1. สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เรื่อง สารตั้งต้นสำหรับเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดเซ็ตตัวได้เอง

วันที่ยื่นคำขอ 24 เมษายน 2551

เลขที่คำขอ 0801002232

2. สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เรื่อง “ส่วนผสมของซีเมนต์เชื่อมกระดูกไฮดรอกซีอะปาไทต์ชนิดเซ็ตตัวได้เอง” วันที่ยื่นคำขอ 24 เมษายน 2551 เลขที่คำขอ 0801002233
3. สิทธิบัตรเรื่อง “เนื้อดินผลิตภัณฑส์โตนแวร์พร้อมเคลือบปราศจากตะกั่วเผาที่อุณหภูมิต่ำและกระบวนการผลิตดังกล่าว” เลขที่คำขอ 1001000487 ยื่นคำขอวันที่ 25 มีนาคม 2553
4. สิทธิบัตรเรื่อง “ซีเมนต์เชื่อมกระดูกชนิดไบฟาซิกแบบฉีดยาเพื่อใช้ในการทดแทนกระดูก” เลขที่คำขอ 1401006891 ยื่นคำขอเมื่อวันที่ 18 พ.ย. 2557
5. สิทธิบัตรเรื่อง “อนุภาคพรุณทรงกลมระดับไมครอนชนิดแก้วทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย” เลขที่คำขอ 1401007506 ยื่นคำขอเมื่อวันที่ 16 ธ.ค. 2557
6. สิทธิบัตรเรื่อง “โครงสร้างเซลล์เชิงประกอบจากส่วนผสมไฟโพรอินจากไหม-โคโตซานกับแก้วชีวภาพต้านเชื้อแบคทีเรียที่มีอนุภาคทรงกลมสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก” เลขที่คำขอ 1401006890 ยื่นคำขอเมื่อวันที่ 18 พ.ย. 2557
7. สิทธิบัตรเรื่อง เซลล์นำไฟฟ้าพลังแสงด้วยผลิตนาโนทรงกลมซิงค์ออกไซด์เจือด้วยสารบิสมีทและวิธีการผลิต ยื่นคำขอเมื่อ 24 ธ.ค. 2558
8. สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เรื่อง แผ่นพื้นอัจฉริยะสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงเฉื่อยเชิงกล ยื่นคำขอเมื่อ 25 ก.ค. 2558 รับคำขอ 28 เม.ย. 2559

13. รางวัล และการฝึกอบรม

1. รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 1 การประกวด NESP Innovation Awards 2015 ประเภทนวัตกรรมเชิงพาณิชย์ ผลิตภัณฑ์นวัตกรรม โดยสำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการส่งเสริมกิจการอุทยานวิทยาศาสตร์ (สอว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ได้รับทุน Leaders in Innovation Fellowships จาก Newton fund และ สกว. 2560 ไปอบรมที่ กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ระหว่างวันที่ 15-28 มกราคม 2560

นักวิจัยร่วม

1. ชื่อ (ภาษาไทย) : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์
(ภาษาอังกฤษ) : Assistant Professor Dr. Thipwan Fangsuwannarak
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำและนักวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ที่อยู่ติดต่อ : สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมืองนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 22-4582 โทรสาร (044) 22-4601
E-mail : thipwan@sut.ac.th
4. Qualification:
 - พ.ศ. 2551 Ph.D. (Photovoltaic Engineering) Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Australia
 - พ.ศ. 2540 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (Electrical Engineering, Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
 - พ.ศ. 2536 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 (B.Eng (2nd Honor in Electronic Engineering) มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จ. นครราชสีมา
5. ประวัติการทำงาน :
 - พ.ศ. 2540-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ และนักวิจัย วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จ.นครราชสีมา
 - พ.ศ. 2557-ปัจจุบัน ผู้ทรงคุณวุฒิ ให้ข้อคิดเห็นและประเมินโครงการทุนพัฒนาศักยภาพในการ
ทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ และทุนพัฒนานักวิจัย (รุ่นกลาง) ของฝ่าย
วิชาการ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 - พ.ศ. 2555 ที่ปรึกษา R&D group, Innovative Harvesting Energy, China
 - พ.ศ. 2554 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินข้อเสนอโครงการวิจัย ให้แก่วิทยาลัยนวัตกรรมการ
จัดการข้อมูล HDD สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 - พ.ศ. 2552-2554 วิทยากรผู้เชี่ยวชาญฝึกอบรมการผลิตและวิเคราะห์ฟิล์มบาง อุตสาหกรรมฮาร์ด
ดิสไดฟ์ ให้แก่บริษัทซีเกด บริษัทเวสเทินท์ดีจิตอล บริษัทอิตาชิฮาร์ดดิสไดฟ์

- พ.ศ. 2553 ออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการเรียนรู้ และจัดบรรยาย อบรมภาคสนาม ให้แก่ชุมชน อ. ครบุรี จ. นครราชสีมา
- พ.ศ. 2548-2550 นักวิจัยในกลุ่มโครงการ Global Climate and Energy Project (GCEP) แหล่งทุนจาก Stanford University, USA
- พ.ศ. 2539-2540 นักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
- พ.ศ. 2536-2537 อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน กรุงเทพฯ

6. สาขาวิชาการที่มีความเชี่ยวชาญ :

- การผลิตวัสดุผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่จาก nc-Si ink และ ZnO:Bi film การวิเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำชั้นสูง และวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน
- การผลิตเซลล์อาทิตย์และพัฒนาประสิทธิภาพด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ
- ออกแบบระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบระบบอิสระและระบบที่เชื่อมต่อบริเวณสายส่ง
- ออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนจากระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

7. ผลงานและรางวัล :

1. บทความยอดเยี่ยม (Best paper) สาขาวัสดุพลังงาน จากการประชุมวิชาการ 15th Conference on Energy Network of Thailand, พ.ศ. 2562 “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแสงของฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนชั้นซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสมีท สำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์”
2. รางวัล Best Runner-up Paper สาขาวัสดุพลังงาน จากการประชุมวิชาการ 15th Conference on Energy Network of Thailand, พ.ศ. 2562 “ผลของอุณหภูมิและเวลาการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์”
3. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (25 ก.ค. 2558) การประดิษฐ์ “แผ่นพื้นอัจฉริยะสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงเฉื่อยเชิงกล” เลขที่คำขอ 1601002468
4. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (16 ธ.ค. 2558) การประดิษฐ์ “เซลล์นำไฟฟ้าพลังแสงด้วยผลึกนาโนทรงกลมซิงค์ ออกไซด์เจือสารบิสมีท และวิธีการผลิต” เลขที่คำขอ 1501007762
5. ลิขสิทธิ์ ลักษณะงานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ “โปรแกรมที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอชของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด” เลขที่327427 (2558)
6. อนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์ (3 ก.พ.2555) “การใช้วัสดุเทฟลอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์” เลขที่อนุสิทธิบัตร 6976
7. บทความยอดเยี่ยม Energy Materials paper award for 7th Conference on Energy

Network of Thailand, 2011 “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้น”

8. Research Group Scholarship: Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
9. Ph.D. Scholarship สำนักงานแผนนโยบายพลังงานแห่งชาติ ประเทศไทย ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับ Third-generation of Silicon Solar cells ศึกษาที่ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, UNSW, Australia

8. ภาระงานสอนและที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์ :

สอนในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ในรายวิชาดังนี้

- อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม
- วิศวกรรมไฟฟ้า
- สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
- เซลล์แสงอาทิตย์ประยุกต์
- เซลล์แสงอาทิตย์และระบบ
- เทคโนโลยีวงจรรวม
- วงจรรวมดิจิทัล
- วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า

ที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์

- ฟิล์มบาง ZnO:Bi สำหรับป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
- หมึกฟอสฟอรัสสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงแบบ Selective Emitter Cell
- เครื่องฉีดสารสำหรับสร้างชั้นพาสซีเวชันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีต้นทุนต่ำ
- สังเคราะห์ฟิล์มบางผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ Third Generation

9. การบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ :

9.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. งานวิจัยเรื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยเทคโนโลยี Selective Emitter ที่ใช้วิธี Screen Printing
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2559
2. งานวิจัยเรื่อง การสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำจากการประทับลาย
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2558
3. งานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2557 เสร็จสมบูรณ์

4. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงค่าความนำไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงของ
ผลึกนาโนซิลิคอนควอนตัมดอทสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2556 เสร็จสมบูรณ์
5. งานวิจัยเรื่อง การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย
การใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2555 เสร็จสมบูรณ์
6. งานวิจัยเรื่อง เทคนิคต้นทุนต่ำด้วยการฉีดยาละลายเพื่อสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเว
ชั้นคุณภาพสูงที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2554-2555 เสร็จสมบูรณ์
7. งานวิจัยเรื่อง การเตรียมผลึกนาโนซิลิคอนและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์
แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2553-2554 เสร็จสมบูรณ์
8. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณภาพของผิวพาสซีเวชั้นด้านหลัง ต้นทุนต่ำ สำหรับเซลล์
แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน สกว. 2552 เสร็จสมบูรณ์
9. งานวิจัยเรื่อง การลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์ด้วย ANISOTROPIC TEXTURE
ETCHING เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์
แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2552 เสร็จสมบูรณ์
10. งานวิจัยเรื่อง Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007,
Stanford University, USA
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุน Stanford University, USA
11. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาเครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์และการประยุกต์ใช้งาน : ออกแบบ
ทรานสดิวเซอร์ในภาค tuning line
สถานภาพ หัวหน้าโครงการ ใช้ระยะเวลา 1 ปี (2545)
แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เสร็จสมบูรณ์

9.2 งานวิจัยที่กำลังทำ

1. งานวิจัยเรื่อง โครงการเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหมึกซิลิคอนควอนตัมดอทจากการใช้
แผ่นเซลล์ที่เสื่อมสภาพเสียหายมาผลิตใหม่
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายอนุรักษ์
พลังงานและพลังงานทดแทน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน
ประจำปีงบประมาณ 2561 ล่วงไปแล้ว 70%

2. งานวิจัยเรื่อง Integration, performance studies, and applications of energy harvesting and storage systems
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการย่อย 4 ระยะเวลา 3 ปี ของโครงการเข้าร่วม/จัดตั้งโครงการศูนย์เครือข่ายการวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยี ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
- แหล่งทุน ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ 2561

10. ผลงานเผยแพร่ :

1. ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตนะวิชัย กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹมศิริ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัทที่มีผลึกนาโนสำหรับเป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0005
2. พีรวุฒิ รัตนะวิชัย ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹมศิริ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ และ รุ่งเรือง พัฒนากุล “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแสงของฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนชั้นซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0010
3. กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹมศิริ ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตนะวิชัย และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0011
4. Peerawoot Rattanawichai, **Thipwan Fangsuwannarak***, Rungrueang Phatthanakun and Sirirat T. Rattanachan, “High Photocurrent Gain of Spherical Nano-crystalline ZnO:Bi Film for Advanced Solar Cells Application” Chiang Mai Journal of Science 45 : 1995-2004 (2018)
5. Supanut Laohawiroj, Apirak Mangkornkaew, Atthaphon Maneedaeng, **Thipwan Fangsuwannarak**, “Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique” Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology, Volume 13 No.2 (2018)
6. กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹมศิริ และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 791-794
7. พีรวุฒิ รัตนะวิชัย ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “การศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 879-885
8. ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตนะวิชัย รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “

การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้บิสมัทจากหมึกคอมโพสิท

ซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดตัวสดู
ชั้นสูง” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน
2561 จ.ระยอง หน้า 899-905

9. กมลชนก เมฆหมอก ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ และ ญัฐพล ช่วงสุนิช “ผลของการเคลือบชั้น
ป้องกันการสะท้อนแสงแบบ Gradient-Index ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของการผลิต
แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สีดำ” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
31 พฤษภาคม-2 มิถุนายน 2560 จ. เชียงใหม่ หน้า 458-463
10. S. Chanrawangyot, S.T. Rattanachan, A. Watcharenwong, **T. Fangsuwannarak**,
Antibacterial activity of ZnO nanoparticles coated on ceramic tiles prepared by
sol-gel method, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Volume 27, Issue 2,
p. 1-5 (2017)
11. A. Mangkornkaew and T. Fangsuwannarak, Characterization of patterns of
Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell
Structure, *Materials Science and Engineering* 241, 012042 (2017)
12. Karoon Fangsuwannarak, Ponrawee Wanriko, Thipwan Fangsuwannarak, “Effect
of Bio-polymer Additive on the Fuel Properties of Palm Biodiesel and on Engine
Performance Analysis and Exhaust Emission” *Energy Procedia*, Volume 100, p.
227-236 (2016)
13. อภิรักษ์ มังกรแก้ว ชิตพงษ์ เกตุถนอม อธิษฐ์ เลหาวิโรจน์ และ **ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์** “การ
สร้างชั้นอิมิตเตอร์และชั้นไดโอดเล็กทรอนิกส์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการ
พิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 18-20 มิถุนายน 2559 จ.
พิษณุโลก หน้า 458-463
14. W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimnirun, W. Klysubun, **T. Fangsuwannarak**, S.T.
Rattanachan, N. Pisitpipathsin, M. Promsawat, and S. Pojprapa, “Polarization
Switching of PZT under Electrical Field via in-situ Synchrotron X-ray Absorption
Spectroscopy” *Ferroelectrics*, 492: p.35–42 (2016)
15. อภิรักษ์ มังกรแก้ว และ **ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์** “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟ
อิมิตเตอร์ด้วยเทคนิคพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38
(EECON38) 18-20 พฤศจิกายน 2558 จ.พระนครศรีอยุธยา
16. **T. Fangsuwannarak** “IPA Free Texturization Process for Monocrystalline Silicon
Solar Cells by PTFE Mask”, *The Asian Conference on Sustainability, Energy and
the Environment 2015*, Kobe Japan, Proceeding p.363-369, 11-14 June (2015)
17. **T. Fangsuwannarak**, A. Mankornkaew, N. Phiwpha and S. Sopitpan, “Preparation
of Different Phosphorus Concentration for N⁺ Selective Emitter Solar cell by Spin

- on doping”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
18. S. T. Rattanachan, J. Kaewphoka and **T. Fangsuwannarak**, “Annealing Atmosphere of Bismuth Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by CTAB-Assisted Sol-gel Method”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
 19. J. Kaewphoka, **T. Fangsuwannarak** and S.T. Rattanachan, “Synthesis of surfactant-assisted nanostructured Bidoped Zinc oxide for photo-sensing application”, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference ID paper 1396, 15-17 May (2014)
 20. N. Phiwpha, **T. Fangsuwannarak** and S. Sopitpan, “Locally contacted rear surface passivated solar cells by inkjet printing”, Proc. of SPIE Vol. 9234 92341B-1 (2014)
 21. N. Phiwpha and **T. Fangsuwannarak**, “Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing” *Integrated Ferroelectrics*, 149: pp.102-106, (2013)
 22. S.T. Rattanachan, P. Krongarrom and **T. Fangsuwannarak**, “Influence of annealing temperature on characteristics of bismuth doped zinc oxide films” *American Journal of Applied Sciences* Volume 10, Issue 11, 1 October 2013, Pages 1427-1438 (2013)
 23. **T. Fangsuwannarak** and K. Kunchana, “Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process” *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*, No. 43: pp.106-110 (2013)
 24. **T. Fangsuwannarak**, K. Amonsurintawong and S. Sopitpan, “Aluminum-induced crystallization of p⁺silicon pinholes for the formation of rear passivation contact in solar cell” *Key Engineering Materials* Vol. 547 (2013) pp. 31-40 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.547.31
 25. **T. Fangsuwannarak**, K. Khunchana and S.T. Rattanachan “Optical Band Gaps and Electrical Conductance of Si nanocrystals in SiO₂ Matrix for Optoelectronic Applications” *Key Engineering Materials* Vol. 545 (2013) pp 134-140 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.545.134
 26. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, J. kaewphoka and S. T. Rattanachan, “Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells” *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 978-1-4799-0545-4/13 ©2013 IEEE
 27. K. Kunchana and **T. Fangsuwannarak**, “Thin Film preparation of silicon nanocrystals embedded in silicon oxide by sol-gel method” *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information*

Technology (ECTI-CON), 978-1-4673-2025-2/12/ ©2012 IEEE

28. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T Rattanachan, **Thipwan Fangsuwannarak**, “ZnO Doped with Bismuth in Case of In-Phase Behavior for Solar Cell Application” *Engineering Journal*, Vol 16, No 3 p. 59-70 (2012)
29. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, and S. T. Rattanachan, “Synthesis and characterizations of bismuth doped zinc oxide via sol-gel technique for solar cells applications” 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 Sep. (2011)
30. P. Krongarrom, S.T. Rattanachan and **T. Fangsuwannarak**, "Structural and optical characterizations of n-type doped ZnO by sol-gel method for photovoltaic", *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2011 8th International Conference on, On page(s): 50 - 53, Volume: Issue: , 17-19 May (2011)
31. **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียมและการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมกับชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 จ.ภูเก็ต 5 - 7 พฤษภาคม 2554 CEN12-562 (*บทความยอดเยี่ยมประเภทวัสดุพลังงาน*)
32. กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5 - 7 พฤษภาคม 2553 ENETT6-1193
33. **T. Fangsuwannarak** and K. Amonsurintawong, “Texturisation of monocrystalline Si wafer by wet chemical etchants without surfactant additive through PTFE masks”, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and 5th World Photovoltaics Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 Sep. (2010)
34. **T. Fangsuwannarak** and G. Scardera, “Effect of Annealing Temperature on Dark Current Density of Silicon nanocrystals embedded in a Nitride Matrix for Photovoltaic Application,” *Proc. the 5th International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology*, On page(s): 797 - 800, Volume: Issue: , 14-17 May (2008)
35. **T. Fangsuwannarak**, E.C. Cho, G. Conibeer, Y. Huang, T. Trupke and M.A. Green, “Analysis of The Effect of Silicon Quantum Dot Density on The Photoluminescence Spectra of Silicon Dot/Silicon Dioxide Superlattices,” *Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Dresden, Germany*, (2006)
36. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, G. Scardera, G. Conibeer, M. A. Green, “Effects of Silicon Nanocrystallite Density on The Raman-Scattering Spectra of Silicon Quantum Dot Superlattices,” *Proc. SPIE 6415-07* (2006)

37. G. Conibeer, M. A. Green, R. Corkish, Y. Cho, E-C. Cho, C-W Jiang, T. **Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, "Silicon Nanostructures for Third Generation Photovoltaic Solar Cells," *Thin Solid Film*, **511-512**, 654 (2006).
38. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, T. **Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, "All-Silicon Tandem Cells Based on "Artificial" Semiconductor Synthesised Using Silicon Quantum Dots in Dielectric Matrix," *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden* (2006)
39. Scardera, T. Puzzer, D. McGrouther, E. Pink, T. **Fangsuwannarak**, G. Conibeer, and M. A. Green, "Investigating Large Area Fabrication of Silicon Quantum dots in a Nitride Matrix for Photovoltaic Applications," *IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii*, **122** (2006)
40. T. **Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, Y. H. Cho, G. Conibeer, T. Puzzer, and M. A. Green, "Conductivity of Self-Organized Silicon Quantum Dots Embedded in Silicon Dioxide," *Proc. SPIE* **6037**, 60370T (2005)
41. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, T. **Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, "Artificial Semiconductor Synthesised Using Si Quantum Dots in a Dielectric Matrix," *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona* (2005)
42. D. Kruangam, T. **Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow, "Novel amorphous silicon alloy optoelectronic integrated circuits," *Journal of Non-Crystalline Solids* **227-330**, 1146-1150 (1998)
43. K. Chirakawikul, T. **Sujaridchai**, B. Ratwises, D. Kruangam, S. Panyakeow, W. Boonkosum, T. Sugino and J. Shirafuji, "Preparation of p-type polycrystalline diamond films and their applications to hole injection layers in amorphous SiC:H thin film light emitting diodes," *Journal of Non-Crystalline Solids*, **227-230**, 1156-1159 (1998)
44. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwises, T. **Sujaridchai**, S. Panyakeow, S. Fujikake and H. Sakai, "Amorphous SiO:H thin film visible light emitting diode," *Journal of Non-Crystalline Solids*, **198-200**, 1226-1229 (1998)
45. D. Kruangam, B. Ratwiset, T. **Sujaridchai**, S. Panyakeow, and W. Boonkosum, "Novel Application of Amorphous Silicon Flexible Solar Cells As Battery Charger for Personal Mobile Telephone," *Technical Digest of the International PVSEC-9, Japan* (1996)
46. D. Kruangam, T. **Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Application of Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition to the

- Fabrication of Si Alloy Optoelectronic Devices,” Proceeding of 8th ASIAN Conference on Electrical Discharge ACED, Siam Inter-Continental, Bangkok (1996)
47. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, “Basic Properties of Amorphous Silicon Alloys for Optoelectronic IC Applications,” Proceeding of Regional Symposium on Material Science, Fundamental and Applications on Semiconductor and Superconductors, Philippines (1996)
 48. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, “Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diod,” International Conference Amorphous Semiconductors Science&Technology (ICAS) (1995)
 49. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, “Fabrication of Amorphous Silicon Alloy Optical Devices for New Types of Thin Film Optoelectronic Integrated Circuits,” Australia Microelectronic Conference (MICRO), Adelaide, Australia (1995)
 50. W. Boonkosum, **T. Sujaridchai**, D. Kruangam, B. Ratwiset and S. Panyakeow, “Novel Matrix and Multi-Layer Amorphous Thin Film LED Flat Panel Display,” Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), Symposium V-Flat Panel Display San Francisco, USA, (1995)

นักวิจัยร่วม

1. ชื่อ (ภาษาไทย) : ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์
(ภาษาอังกฤษ) : Dr. Apichon Watcharenwong
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ที่อยู่ติดต่อ : สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมืองนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 22-4537 โทรสาร (044) 22-4611
E-mail : w.apichon@sut.ac.th
4. Qualification:

พ.ศ. 2551	Ph.D. (Environmental Management), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2546	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2544	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยขอนแก่น
5. ประวัติการทำงาน :

พ.ศ. 2546-2547	Research assistance of Assoc. Prof. Dr. Puangrat Kajitvichyanukul, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand
พ.ศ. 2549-2550	Research Assistance, Center for Renewable Energy Science and Technology (CREST), Department of Chemistry & Biochemistry, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA.
พ.ศ. 2551-ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2558-ปัจจุบัน	หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. ประสบการณ์การทำงาน :

- ผู้เชี่ยวชาญการจัดการมลพิษ โครงการเพิ่มศักยภาพการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมด้วยระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ลุ่มน้ำสายหลัก ประจำปีงบประมาณ 2562 กรมโรงงานอุตสาหกรรมอุตสาหกรรม (2562)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม โครงการศึกษาศักยภาพในการลดปริมาณน้ำภายในโรงงานอุตสาหกรรม ประจำปีงบประมาณ 2560 กรมโรงงานอุตสาหกรรมอุตสาหกรรม (2560)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม โครงการลดการใช้น้ำประจำปี 2560 ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับโรงงานจำนวน 8 แห่ง (ว่าจ้างโดยบริษัทซีดีเอ็นจำกัด) (2560)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสาธารณสุขปศุสัตว์ การจัดทำผังภาคกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (ว่าจ้างโดยบริษัท ออโรส จำกัด) (กำลังดำเนินการ)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสาธารณสุขปศุสัตว์ การจัดทำผังเมืองรวมบ้านค่าย-มาบข่า (ว่าจ้างโดย บริษัท ออโรส จำกัด)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสาธารณสุขปศุสัตว์ การจัดทำผังเมืองรวมจังหวัดตราด (ว่าจ้างโดย บริษัท ออโรส จำกัด)
- วิศวกรโครงการ โครงการบริหารจัดการและวางระบบธรรมชาติสิ่งแวดล้อมและการมีส่วนร่วมของประชาชน จังหวัดปราจีนบุรี – สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดปราจีนบุรี (ว่าจ้างโดยบริษัท อิกไนต์เอเชีย จำกัด) (2558)
- วิศวกรโครงการ โครงการศึกษาแผนหลักสำหรับระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม อุทยานมิตรผล บริษัทน้ำตาลมิตรผล จังหวัดชัยภูมิ (2558)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการขยะ การศึกษาแผนหลักระบบการจัดการมูลฝอยนครเวียงจันทน์และการศึกษาความเหมาะสมระบบการจัดการมูลฝอยเมืองศรีสัตนาคนครเวียงจันทน์ (2557)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสาธารณสุขปศุสัตว์ โครงการวางผังเมืองรองรับอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ จังหวัดปราจีนบุรี – สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดปราจีนบุรี (2557)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม โครงการจัดทำแผนบริหารจัดการและพัฒนาทรัพยากรน้ำแบบบูรณาการ จังหวัดตราด (2557)
- วิศวกรโครงการ การศึกษาความเหมาะสมการจัดการมูลฝอยชุมชน จังหวัดปทุมธานี (2557)
- คณะกรรมการตรวจประเมินสำนักงานสีเขียว (Green Office) ระดับภูมิภาค โดยคำสั่งกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม ที่ 289/2557 (2557)

- ผู้เชี่ยวชาญด้านสาธารณสุขปโคค งานจัดทำผังเมืองระบบสาธารณสุขปโคค การจัดทำผังเมืองรวมชุมชนสามโคก จังหวัดปทุมธานี กรมโยธาธิการและผังเมือง (ว่าจ้างโดย บริษัท เออร์เบินสเปซ ดีไซน์ จำกัด) (2556)
- วิศวกรโครงการ การวิจัยเพื่อศึกษาความเหมาะสมของโครงการศูนย์จัดการขยะอินทรีย์และการฟื้นฟูสภาพหนองหาร องค์การบริหารส่วนจังหวัดสกลนคร (2555)
- วิศวกรโครงการ ในการดำเนินการสาขาเทคโนโลยีสะอาด กิจกรรมการใช้เทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดกลาง ขนาดเล็ก ในส่วนภูมิภาคเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ภายใต้โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างครบวงจร โดยรับผิดชอบการให้คำปรึกษาในการดำเนินโครงการเทคโนโลยีสะอาดผู้ประกอบการ 5 ราย และประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ 2 รายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ (2554)
- วิศวกรโครงการ การวิจัยเรื่อง "การศึกษารูปแบบ การผลิตพลังงาน จากชีวมวลโดยระบบสหกรณ์" จังหวัดนครพนม และกรมส่งเสริมสหกรณ์ (2552)
- ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการมลพิษ ร่วมสำรวจและทบทวนระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ จำนวน 50 โรงงาน โครงการพัฒนาระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานในพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก (บางปะกง) กรมโรงงานอุตสาหกรรม (ว่าจ้างโดย บริษัทเอเอสเอเนจเม้นต์จำกัด) (2551)
- วิทยากร ในโครงการฝึกอบรมบุคลากรด้านสิ่งแวดล้อมประจำโรงงานตามหลักสูตรของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

7. ประสบการณ์ฝึกอบรมและสัมมนา :

- | | |
|-------------------------|---|
| 17-18 กันยายน พ.ศ. 2560 | การอบรมเชิงปฏิบัติการ “Design thinking for educator #1”, Nakhon Ratchasima, Thailand |
| 20-21 สิงหาคม พ.ศ. 2559 | การอบรมหลักสูตร “การประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพเบื้องต้น” โดย รศ.ดร.ไกรชาติ ตันตระการอาภา และคณะ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 9-11 กันยายน พ.ศ. 2558 | งานประชุมวิชาการ “The 1st symposium on Pesticide and Environment Research Network (PeRN-1) at Naresuan University, Phitsanulok, Thailand. |
| 19-20 สิงหาคม พ.ศ. 2558 | การอบรมหลักสูตร การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbonfoot print for Organization (14 Hrs)) เป็นหลักสูตรที่ได้รับ การรับรองจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) จัดอบรมโดย สวทช. |

- 18-20 กันยายน พ.ศ. 2556 การอบรมเชิงปฏิบัติการ “ทักษะการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อการวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม” โดย รศ.ดร.ชฎา ฌรงค์ฤทธิ์ สถานภูมิภาคเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ภาคเหนือตอนล่าง มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 5-9 สิงหาคม พ.ศ. 2556 การอบรมเชิงปฏิบัติการ “Nanostructured Materials – Synthesis, Characterization and Properties” by Prof. Dr. Johann Plank from Department Chemie Technische Universität München, Germany, cooperation with Kasetsart University, Bangkok, Thailand
- 2-3 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 การอบรมเชิงปฏิบัติการ Train the Trainer on “Water Footprint” organized by Organized by Energy and Environment Cluster, National Metal and Materials Technology Center, NSTDA in cooperation with United Nations Environment Programme
- 21 สิงหาคม – 19 กันยายน พ.ศ. 2554 รั้บทุน Invitation Program for East Asian Young Researchers (2011) of Yamagata University supported by The Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), in Yonezawa, Yamagata, Japan.
- 14-18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 รั้บทุนฝึกอบรม Chemical Safety and Security Officer Training supported by Sandia National Laboratories (USA), in Bangkok, Thailand.
- 18-29 ตุลาคม พ.ศ. 2553 รั้บทุนเข้าร่วม The International Scientific Instrument Technology Workshop (ISITW), in Hsinchu, Taiwan

8. วิชาชีพ :

- ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมโยธาควบคุม (ก.ว.) เลขที่ กย.33563
- ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (ก.ว.) เลขที่ กส.446

9. รางวัลที่เคยได้รับ:

- ผลงานวิจัยเด่นด้านสาธารณะ จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2557 งานวิจัยเรื่อง “ความปลอดภัยในการใช้วัสดุนาโน”
Distinguished Research Award, Nanotechnology and Nanomaterial Safety Management, Thailand Research Fund (TRF), Thailand, 2014

10. ผลงานวิชาการ:

10.1 A CHAPTER IN BOOK

- Puangrat Kajitvichyanukul , Jirapat Ananpattarachai, Apichon Watcharenwong, “Green Products: Production”, Encyclopedia of Environmental Management, Taylor and Francis: New York, Published online: 01 May 2013; 1253-1261.

10.2 INTERNATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Chanrawangyot, S., Rattanachan, S.T., **Watcharenwong, A.** & Fangsuwannarak, T. Antibacterial Activity to ZnO Nanoparticles Coated on Ceramic Tiles Prepared by Sol-Gel Method. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 27(2), 1-5. (2017)
- **Watcharenwong, A.**, Noguchi, S., Kawai, T., Ogata, T., Unuma, H., “Self-organized TiO₂ nanotubes and their photocatalytic performance measured using spin-trap ESR spectroscopy”, *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, Issue 43, 2013, Pages 91-97
- **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Anodic growth of nanoporous WO₃ films: morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120, 2008
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Formation and Characterization of Self-Organized TiO₂ Nanotube Arrays by Pulse Anodization” *Journal of American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 965-974, 2008 (impact factor = 9.907)
- **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Self-organized TiO₂ nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response”, *Journal of Materials Research*, Vol. 22, pp. 3186-3195, 2007
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Titania nanotubes from

pulse anodization of titanium foils”, *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 2145–2149, 2007 (*impact factor* = 3.388)

- N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeewaran, **A. Watcharenwong**, R. S. de Zoysa, N. A. Basit and K. Rajeshwar, “Nanoporous TiO₂ and WO₃ Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response”, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp. 25347-25355, 2006

10.3 BOOK SERIES

1. Narudon Saijaioup, Puangrat Kajitvichyanukul, **Apichon Watcharenwong**, "Preparation of Visible Light Responsive Photocatalyst from Titanium Dioxide Nanotubes Modified with Antimony Trisulfide", *Key Engineering Materials*, Vol. 792, pp. 98-103, 2018
2. **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 367-372, 2017
3. **Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 373-378, 2017
4. **Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Nanoporous Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 174-178, 2017

10.4 CONFERENCE SERIES

1. **A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammaroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from melamine scraps” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 78 (2017) 012012 doi :10.1088/1755-1315/78/1/012012

10.5 NATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

1. Apichon Watcharenwong, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, "Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae", *Thai environmental engineering journal*, Vol. 31 No. 1, 2017
2. P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, "Role of pH, Organic and Inorganic Anions on Photocatalytic Reduction Of Chromium(VI) using TiO₂ and Ultraviolet Light", *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 169-179, 2005
3. P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong**, "Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface" *Songkhlanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 47-53, 2005
4. P. Kajitvichyanukul, P. Amornchat, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, "Structure and Photocatalytic characteristics of TiO₂ Thin Film coated on Stainless Steel for Chromium(VI) Removal Application, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp.79-86, 2005
5. P. Kajitvichyanukul, S. Pongpom, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, "Effects of Acetyl Acetone on Property of TiO₂ Thin Film for Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) from Aqueous Solution, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp. 87-93, 2005
6. P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, "Contradiction Effect of pH on the Photocatalytic Reduction of Chromium(VI) and Thallium(I)". *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 21, No.4, pp. 269-280, 2004
7. P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, "Adsorption Behavior of Chromium (VI) on Titanium Dioxide Surface" *Thai Environmental Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-95, 2004

10.6 INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS

1. Kawintra Kongka, Wuttiwat Chawkorash, Budsakorn katkaew, Wut Dankittikul, and **Apichon Watcharenwong**, "Atrazine Removal using Nano-zero Valence Iron and Granular Activated Carbon Mixture.", 5th International Conference on Food and Environmental Sciences (ICFES 2019), Ho Chi Minh City, Vietnam, 25-28 February, 2019.

2. N. Saijaioup, W. Dankittikul, and **A. Watcharenwong**, “Antimony Trisulfide Modified Titanium Dioxide Nanotubes for Water Disinfection of Fecal Streptococcus by the Photocatalytic Process.”, 3rd Reginal IWA Diffuse Pollution Conference “Innovation and Frontier Technology for Water Security and Scarcity, Chiang Mai, Thailand, 19-22 Nov, 2018.
3. A. Kaeokan*, P. Upama*, R. Rammaroeng* and **A. Watcharenwong**, “Paraquat dichloride removal by photocatalytic process using modified melamine scraps.”, 3rd Reginal IWA Diffuse Pollution Conference “Innovation and Frontier Technology for Water Security and Scarcity, Chiang Mai, Thailand, 19-22 Nov, 2018.
4. Narudon Saijaioup, Puangrat Kajitvichyanukul and **Apichon Watcharenwong**, “Preparation of Visible Light Responsive Photocatalyst from Titanium Dioxide Nanotubes Modified with Antimony Trisulfide”, 7th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM2018), Kitakyoshu, Japan, 10-12 September, 2018.
5. A Rittirat¹, C Chokejaroenrat² and **A Watcharenwong^{1*}**, “Atrazine adsorption potential of Leonardite from Mae Moh power plant”, 2nd International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development (CEESD 2017), Phuket, Thailand, 8-11 Dec, 2017.
6. **A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammaroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from melamine scraps” 8th International conference on Environmental Science and Technology, Madrid, Spain, 12 – 14 June, 2017
7. **Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
8. **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016

9. **Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
10. **Apichon Watcharenwong**, Pimchanok Leuasongnoen, “Synthesis of rhombic ZnO rods using anodization technique and their properties”, GTSNN 2014 International Conference on “Safe and Sustainable Nanotechnology” (in conjunction with 4th German-Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology), Phitsanulok, Thailand, October 14th-17th, 2014
11. **Apichon Watcharenwong**, Shun Noguchi, Takahiro Kawai, Tateaki Ogata, and Hidero Unuma, “Self-Organized TiO₂ Nanotubes and Their Photocatalytic Performance Measured Using Spin-Trap ESR Spectroscopy”, Proceeding of 5th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development, MECAHITECH’13, Bucharest, Romania, September 12th-13th, 2013
12. N. Bussabong, **A. Watcharenwong**, and S. Dararat, “Biogas Production from Ruzi grass in the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)”, Proceedings of 2nd International Conference on Agriculture and Environment Systems (ICAES’13), Pattaya (Thailand), April 23-24, 2013
13. Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Preparation of TiO₂ Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International conference on NanoThailand 2012: Nanotechnology for the benefits of mankind, Khon Kaen, Thailand, April 9-11, 2012
14. Amanpapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “Photocatalytic Performance of Nanoporous WO₃ for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS’2012) Penang, Malaysia, February 11-12, 2012
15. **Apichon Watcharenwong**, Wilaiwan Chanmanee , Norma R. de Tacconi, C. Ramannair Chenthamarakshan , Puangrat Kajitvichyanukul, Krishnan Rajeshwar, “Effect of pulsing voltage and electrolyte composition on photoelectrochemical response of composite TiO₂-WO₃ nanotubes obtained

from pulse anodization using Ti foil”, Proceedings of the 1st international conference on NanoThailand Symposium 2008 (NTS 2008) November 6 – 8, 2008, Bangkok, Thailand, 2008

16. **Watcharenwong Apichon**, Chanmanee Wilaiwan, Kajitvichyanukul Puangrat, Chenthamarakshan C. R., de Tacconi N. R., Rajeshwar Krishnan, “Anodic Growth of Nanoporous TiO₂ and WO₃ films: Influence of Process Variables on Morphology, Photoelectrochemical response and Photocatalysis applications”, Proceedings of the 2nd international conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007) June 25 – 28, 2007, Bangkok, Thailand, 2007
17. Krishnan Rajeshwar, Wilaiwan Chanmanee, **Apichon Watcharenwong**, C. Ramannair
18. Chenthamarakshan, Puangrat Kajitvichyanukul, and Norma R. de Tacconi, “Titania Nanotubes from Pulse Anodization of Titanium foils”, Proceedings of the Twenty-Ninth DOE Solar Photochemistry Research Conference, Airlie Conference Center Warrenton, Virginia, USA, June 10-13, 2007
19. P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Role of pH, organic and inorganic ions on the photocatalytic reduction of Chromium (VI) using TiO₂ and ultraviolet light”, Proceedings of ASIAN WATERQUAL2003, IWA Asia-Pacific conference, Thailand, 2003
20. P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Effect of pH On Dark Adsorption And Photocatalysis Of Chromium(VI) And Thallium(I) In Aqueous Titanium Dioxide Suspension”, Proceedings of An International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, Thailand, July 22-25, 2003

10.7 NATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS

1. **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “**Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae**” Proceedings of the 15th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Bangkok, Thailand, 11-13 May, 2016

2. Arnanpapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “Treatment of CO in Photocatalysis process using WO_3 ” Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
3. Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of Carbon monoxide” Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
4. P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong** “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface”, Proceedings of the 3rd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, January 28-30, 2004
5. P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “A Study of Adsorption Behavior of Chromium(VI) on Titanium Dioxide Surface”, Proceedings of the 2nd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Khon Kaen, Thailand, January, 2003

