

การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการฟอกอากาศ
และการสร้างออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิด

DEVELOPMENT OF PHOTOELECTROCATALYTIC CELLS
PROTOTYPE FOR AIR PURIFICATION AND OXYGEN GENERATION
IN ENCLOSED SPACES SYSTEM

โชติกา สังข์ทอง

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการฟอกอากาศ
และการสร้างออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิด

โชติกา สังข์ทอง

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการฟอกอากาศและการสร้างออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิด Development of Photoelectrocatalytic Cells Prototype for Air Purification and Oxygen Generation in Enclosed Spaces System
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวโชติกา สังข์ทอง
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชื้อว, D.Eng.
ปีการศึกษา	2566

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ฉัตรชัย เมืองนาโพธิ์, Ph.D.)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์, Ph.D.)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชื้อว, D.Eng.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพัทธ์ จงสวัสดิ์, ประ.ด.)

วันที่ 8 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการฟอกอากาศและการสร้างออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิด
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวโชติกา สังข์ทอง
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

การกำจัดมลพิษทางอากาศ เช่น สารระเหยอินทรีย์และเชื้อโรคในพื้นที่ปิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการปรับปรุงคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาวิธีเคมีไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดสารระเหยอินทรีย์และจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศ และผลิตออกซิเจนไปพร้อม ๆ กันเพื่อสร้างระบบฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

ขอบเขตการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ การพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าบิสมัททั้งสเททโดยใช้เทคนิคโซลเจลิกโวลแทมเมตรีเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิการเผา และศึกษาคุณสมบัติทางแสง สัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ส่วนที่สองคือเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกได้รับการพัฒนาโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสเททนอกไซด์/บิสมัทวานาเดตเป็นขั้วไฟฟ้าโฟโตแอโนดและสเทนเลสสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ได้ออกแบบระบบโดยใช้สะพานเกลือเพื่อให้ระบบครบวงจรและควบคุมการไหลของอากาศไปยังพื้นผิวหน้าสัมผัสขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุดภายใต้การเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า และได้พัฒนาเซลล์ต้นแบบอิเล็กโทรคะตะไลติกโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดเป็นสเทนเลส สตีลในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.3 โมลาร์ ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5 โวลต์

เซลล์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายและเชื้อจุลินทรีย์ได้มากถึง 100% และเพิ่มออกซิเจนได้ในเวลาเดียวกัน งานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการพัฒนาต่อยอดเป็นระบบฟอกอากาศในระบบพื้นที่ปิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก เซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก บิสมัททั้งสเทท ระบบฟอกอากาศ

Thesis Title	Development of Photoelectrocatalytic Cells Prototype for Air Purification and Oxygen Generation in Enclosed Spaces System
Name – Surname	Miss Chotika Sangthong
Program	Applied Chemistry
Thesis Advisor	Associate Professor Chatchai Ponchio, D.Eng.
Academic Year	2023

ABSTRACT

Eliminating air pollution including volatile organic compounds and pathogens in enclosed spaces is particularly necessary for improving residents' quality of life. Therefore, this research aimed to develop electrochemical methods which efficiently eliminated volatile organic compounds and microorganisms contaminated in the air while simultaneously produced oxygen. This would result in further establishing a high-efficiency air purification system.

The scope of this research was divided into two parts: The first part of the study aimed to develop the preparation of bismuth tungstate (Bi_2WO_6) electrodes using the cyclic voltammetry deposition technique to achieve high efficiency of removing organic substances and microorganisms. The optimum conditions of Bi_2WO_6 electrode preparation including the optimal sintering temperature, the optical properties, the morphology, the crystal structure, and the electrochemical properties concerning photoelectrocatalytic (PEC) properties. The second part of PEC prototype cell was developed using $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ as the photoanode and stainless steel as the cathode electrode. A salt bridge was used in the system to complete the circuit and to feasibly maximize the airflow to the electrode surfaces under the light irradiation and a bias potential. In addition, an EC prototype cell was developed using stainless steel cathode and anode electrodes in a 1.3 M sodium hydroxide solution with a bias potential of 5 volts.

The developed prototype cell was able to remove up to 100% of volatile organic compounds and microorganisms and increase oxygen at the same time. This research could lead to further development of an air purification system in various enclosed space systems.

Keywords: Photoelectrocatalytic cell, Electrocatalytic cell, Bismuth tungstate, Air purification

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย พลเชี่ยว ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.ธัญกร เมืองนาโพธิ์ ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่อง ต่างๆเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย พลเชี่ยว ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาและให้ คำแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ช่วยแก้ไขปัญหา พัฒนาศักยภาพของ ผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการนวัตกรรมเซลล์โฟโตอิเล็กโตรเคตะไลซิส ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความ อนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสมาชิกกลุ่มห้องปฏิบัติการนวัตกรรมเซลล์โฟโตอิเล็กโตรเคตะไลซิส ที่คอยให้ความสนับสนุนในด้านต่างๆ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.คัตสึยูกิ ทาคาฮาชิ ที่รองรับ นักวิจัยในการเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยนที่ มหาวิทยาลัยอิวาเตะ เมืองโมริโอกะ จังหวัดอิวาเตะ ประเทศ ญี่ปุ่น ทำให้ผู้วิจัยเพิ่มพูนประสบการณ์ในการทำวิจัยของตนเอง ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาการดำเนินงานวิจัย และวิทยานิพนธ์ และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับบริษัท อีเกิ้ล ตรีม จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุน พัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท ในครั้งนี้ ทำให้งานวิจัยและ วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกท่านที่เกี่ยวข้อง ที่ให้กำลังใจตลอดจนส่งเสริม การศึกษาด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัย ในการดำเนินงานวิจัยตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้

โชติกา สังข์ทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	4
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญ.....	6
สารบัญตาราง.....	14
สารบัญภาพ	15
บทที่ 1 บทนำ	22
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	22
1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงอุตสาหกรรม.....	22
1.1.2 ที่มาของการศึกษาเชิงลึก	23
1.1.3 ผลเสียอันเกิดจากปัญหาและมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น	24
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	25
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	25
1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	25
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	28
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds).....	29
2.1.1 ประเภทของสาร VOCs.....	29
2.1.2 ผลกระทบของสาร VOCs ต่อสุขภาพมนุษย์.....	29
2.2 เครื่องฟอกอากาศ (Air Purifier)	32
2.2.1 ระบบการทำงานของเครื่องฟอกอากาศ.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1.1	แผ่นกรองอากาศ (Air filters).....	32
2.2.1.2	Electrostatic Precipitator (ESP).....	33
2.2.1.3	Gas-Phase air filters.....	34
2.2.1.4	Ozone generator	35
2.2.1.5	UV Light	36
2.2.2	ประเภทของเครื่องฟอกอากาศ	37
2.2.2.1	เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองเป็นหลัก Filtration Air Purifier.....	37
2.2.2.2	เครื่องฟอกอากาศแบบพกพา Portable Air Purifier	38
2.2.2.3	เครื่องฟอกอากาศแบบผสมผสาน Integrated Air Purifier.....	38
2.2.3	ประโยชน์ของเครื่องฟอกอากาศ	38
2.3	เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก.....	39
2.4	การพัฒนาชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ	40
2.4.1	การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	40
2.4.2	การพัฒนาการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้า.....	42
2.4.3	การพัฒนาลักษณะผิวหน้าชีวไฟฟ้า.....	43
2.5	เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ.....	43
2.5.1	เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis Technique).....	43
2.5.2	เทคนิคโซลเจล (Sol gel Technique).....	44
2.5.3	เทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Technique).....	46
2.5.4	เทคนิคการเตรียมฟิล์มทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition Technique)	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 เทคนิคสเปตเตอร์ริง (Sputtering Technique).....	47
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	50
3.1.1 สารเคมี	50
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	52
3.2 การทดลอง	53
3.2.1 การเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแอโนด.....	53
3.2.1.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped Tin Oxide: FTO).....	53
3.2.1.2 การเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/Bi ₂ WO ₆ ด้วยวิธีการตรึงชั้นไฟฟ้าเทคนิค Cyclic voltammetry Deposition.....	54
3.2.1.3 การเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ	56
3.2.2 การศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic properties) ของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi ₂ WO ₆	57
3.2.3 การศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก.....	57
3.2.3.1 การศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกจากการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันของชั้นไฟฟ้า	57
3.2.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นกับ การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์.....	58
3.2.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi ₂ WO ₆ และชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ	58
3.2.4.1 การศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์	59
3.2.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์	59
3.2.4.3 การศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้า	59
3.2.4.4 การศึกษาผลชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	60
3.2.4.5 การศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	60
3.2.4.6 การศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด	60
3.2.5 การศึกษาและพัฒนาเซลล์เคมีไฟฟ้าต้นแบบกับการกำจัดสารอินทรีย์สำหรับ ประยุกต์ใช้ในระบบฟอกอากาศ.....	60
3.2.5.1 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	61
3.2.5.2 การศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้า	62
3.2.5.3 การศึกษาตำแหน่งและจำนวนของสะพานเกลือ	62
3.2.5.4 การศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของแคโทด	63
3.2.5.5 การศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือ	63
3.2.5.6 การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	63
3.2.5.7 การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์โพโตอิเล็กโทรคะตะไลติกกับ การจัดเชื้อจุลินทรีย์	63
3.2.6 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศและ เพิ่มออกซิเจน	64
3.2.6.1 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศ แบบที่ 1	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.6.2 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศ และเพิ่มออกซิเจนแบบที่ 2	65
3.2.6.3 ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์ต้นแบบที่ 2	66
3.2.6.4 ศึกษาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศด้วยเซลล์ต้นแบบที่ 2	66
3.2.6.5 ศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างระบบฟอกอากาศและการเพิ่ม ออกซิเจนในเวลาเดียวกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าชั้นสูงแบบที่ 2	67
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	68
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition	68
4.1.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาของชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6 หลังการตรึง ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition	68
4.1.1.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ของชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6	68
4.1.1.2 สมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในสารละลายน้ำ	69
4.1.1.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง	70
4.1.1.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า	71
4.1.1.5 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า	73
4.1.1.6 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า	74
4.1.2 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำของชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6	75
4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 และชั้นไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4	76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง.....	77
4.2.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของโพลิเมอร์สำหรับการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในสารละลายน้ำ.....	78
4.2.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า.....	79
4.2.4 ผลการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีส้ม Orange red	79
4.3 การศึกษาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ	80
4.3.1 ผลการศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับระบบเพิ่มออกซิเจน ในอากาศ.....	81
4.3.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับ ระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ	82
4.3.3 ผลการศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ	83
4.3.4 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจน ในอากาศ.....	84
4.3.5 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจน ในอากาศ.....	86
4.3.6 ผลของขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ	87
4.3.7 ผลการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจน ในอากาศ.....	88
4.3.8 ผลการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ.....	89
4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าสำหรับ ระบบฟอกอากาศ.....	91
4.4.1 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีส้มเมทิลีนบลู.....	91

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	93
4.4.3 ผลการศึกษาผลของจำนวนของสะพานเกลือของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	94
4.4.4 ผลการศึกษาผลของขนาดพื้นที่ผิวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่สัมผัส ขั้วไฟฟ้าแคโทด	95
4.4.5 ผลการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือ.....	96
4.4.6 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด.....	97
4.4.6 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด.....	97
4.4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกกับการกำจัด เชื้อจุลินทรีย์	98
4.5 ผลการศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับ ระบบฟอกอากาศ.....	99
4.5.1 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ระเหยง่าย ด้วยเซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 1.....	99
4.5.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วย เซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 2.....	100
4.5.3 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วย เซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 2.....	102
4.5.4 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วย เซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 2.....	103
4.5.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยเซลล์ต้นแบบ ฟอกอากาศแบบที่ 2	100
4.5.3 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์ ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 2.....	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

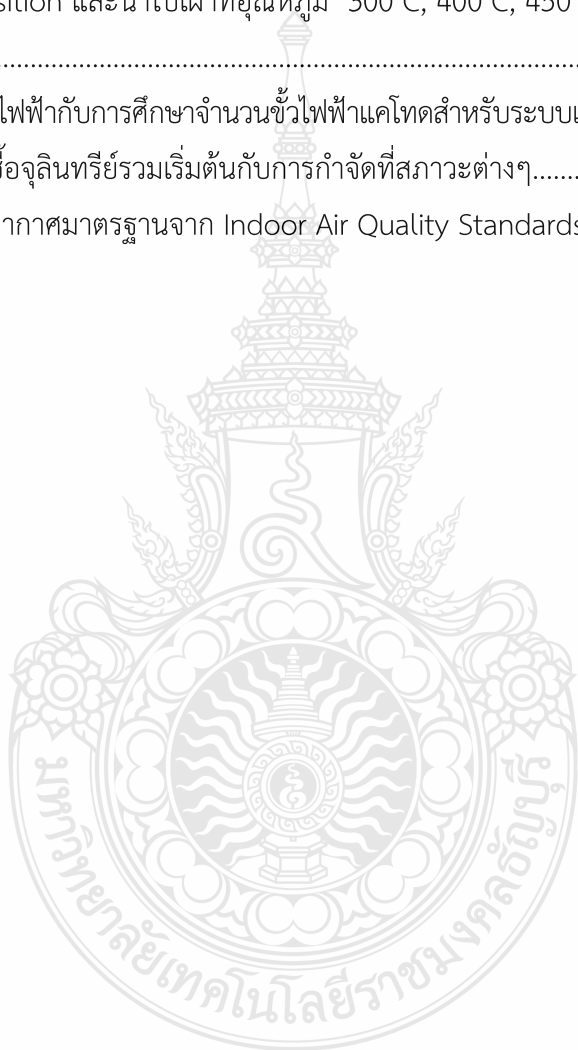
4.5.4 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์	
ต้นแบบฟอตกาทาคแบบที่ 2.....	103
บทที่ 5	108
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	108
บรรณานุกรม.....	110
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก การเผยแพร่ผลงาน.....	119
ประวัติผู้เขียน	133



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi ₂ WO ₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 450°C, 500°C และ 600°C.....	72
ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสไฟฟ้ากับการศึกษาจำนวนชั้นไฟฟ้าแคโทดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ....	88
ตารางที่ 4.3 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์รวมเริ่มต้นกับการกำจัดที่สภาวะต่างๆ.....	98
ตารางที่ 4.4 คุณภาพอากาศมาตรฐานจาก Indoor Air Quality Standards.....	101



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 (A) กระบวนการกำจัดเชื้อโรคและสารอินทรีย์อันตรายในอากาศ (Air pollutants) ด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC cell) และ (B) การผลิตออกซิเจนจากกระบวนการแยกน้ำด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (EC cell).....	26
ภาพที่ 1.2 เซลล์ต้นแบบระบบฟอกอากาศด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและเพิ่มออกซิเจนในอากาศด้วยเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก.....	27
ภาพที่ 2.1 แผ่นกรองอากาศ HEPA สำหรับเครื่องฟอกอากาศ.....	33
ภาพที่ 2.2 กระบวนการ Electrostatic precipitator (ESP) สำหรับระบบฟอกอากาศ	34
ภาพที่ 2.3 แผ่นกรองคาร์บอนสำหรับใช้คู่กับเครื่องฟอกอากาศเพื่อกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์	35
ภาพที่ 2.4 กลไกการกำจัดเชื้อโรคด้วยระบบโอโซน.....	36
ภาพที่ 2.5 หลอดไฟแสงยูวีสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศ	37
ภาพที่ 2.6 ปริมาณความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์.....	40
ภาพที่ 2.7 แลปพลังงานของสารกึ่งตัวนำและค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันและออกซิเดชันของน้ำ	41
ภาพที่ 2.8 แสดงการเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ (A) การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) (B)การเร่งการส่งผ่านช่องว่าง (h^+).....	42
ภาพที่ 2.9 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis Technique).....	44
ภาพที่ 2.10 การเตรียมฟิล์มบางด้วยเคลือบแบบหมุน (Spin coating).....	45
ภาพที่ 2.11 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating).....	45
ภาพที่ 2.12 การเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Technique).....	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.14 การเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering Technique).....	48
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า FTO	54
ภาพที่ 3.2 การเตรียมสารละลายตั้งต้นบิสมาททังสเตท (Bi_2WO_6) สำหรับการตรึงข้อไฟฟ้าเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition	55
ภาพที่ 3.3 การตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition.....	56
ภาพที่ 3.4 เซลล์ต้นแบบอิเล็กโทรคะตะไลติก (EC cell) สำหรับระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจน.....	59
ภาพที่ 3.5 การศึกษาการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำกับการกำจัดสารอินทรีย์สำหรับใช้ใน ระบบฟอกอากาศด้วยเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก	61
ภาพที่ 3.6 รูปแบบการจัดวางตำแหน่งและจำนวนของสะพานเกลือของเซลล์โฟโตอิเล็กโทร คะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์.....	62
ภาพที่ 3.7 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศแบบที่ 1 (PEC cell model 1).....	64
ภาพที่ 3.8 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ (PEC cell) และเซลล์ อิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจน (EC cell model 2) แบบที่ 2	65
ภาพที่ 4.1 Cyclic voltammograms ของข้อไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ที่อัตราการสแกน 50 mV/s.....	69
ภาพที่ 4.2 Amperograms ของข้อไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (a) 25°C, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 450°C, (e) 500°C, และ (f) 600°C	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของกระจก (a) FTO และการเตรียมชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และเผาที่อุณหภูมิ (b) 25°C, (c) 300°C, (d) 400°C, (e) 450°C, (f) 500°C, และ (g) 600°C	71
ภาพที่ 4.4 กราฟ Nyquist plots ของชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่ (a) 300°C, (b) 400°C, (c) 450°C, (d) 500°C, และ (e) 600°C.....	72
ภาพที่ 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และถูกเผาที่อุณหภูมิ (a) 25°C, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 450°C, (e) 500°C และ (f) 600°C.....	73
ภาพที่ 4.6 XRD pattern ของ (a) กระจก FTO และชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เปรียบเทียบที่สภาวะอุณหภูมิต่าง คือ (b) 25°C (ไม่ผ่านการเผา) และผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ, (c) 300°C, (d) 400°C, (e) 450°C, (f) 500°C, และ (g) 600°C	75
ภาพที่ 4.7 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์รวม (% Degradation) ของชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 (a) กลไกการเกิดปฏิกิริยา (b) การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยระบบ PEC ภายในระยะเวลา 15 นาที.....	76
ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า (a) ชั้นไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ และ (b) ชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6	77
ภาพที่ 4.9 Amperograms ของชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 และชั้นไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$	78
ภาพที่ 4.10 กราฟ Nyquist plots ของชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 และชั้นไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.11 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อม Orange red ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi ₂ WO ₆ และขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	80
ภาพที่ 4.12 แสดงชุดเซลล์ต้นแบบสำหรับศึกษาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนด้วยเทคนิค อิเล็กโทรคะตะไลติก	81
ภาพที่ 4.13 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศ ด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกโดยใช้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน (a) NaCl (b) Na ₂ SO ₄ (c) NaH ₂ PO ₄ (d) NaOH (e) KOH และ (f) Ca(OH) ₂	82
ภาพที่ 4.14 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศ ด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกโดยใช้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คือ (a) 0.5 M (b) 0.7 M (c) 0.8 M (d) 0.9 M (e) 1.0 M (f) 1.3 M และ (g) 1.5 M.....	83
ภาพที่ 4.15 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกโดยใช้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน (a) 3 V (b) 4 V (c) 5 V (d) 6 V และ (e) 7 V.....	84
ภาพที่ 4.16 ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทดในเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกต่อประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้น ของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศ (a) ทองแดง (b) สเตนเลสสตีล (c) สังกะสี (d) ทองเหลือง และ (e) กระจกนำไฟฟ้า FTO.....	85
ภาพที่ 4.17 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกโดย ศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยระบบ EC (a) กระจกนำไฟฟ้า FTO (b) แผ่นแกรไฟต์ และระบบ PEC (c) FTO/WO ₃ /BiVO ₄	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.18 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกที่อัตราส่วนของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดต่อปริมาตรสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (a) 0.04 cm ² /ml (b) 0.08 cm ² /ml (c) 0.12 cm ² /ml (d) 0.16 cm ² /ml (e) 0.20 cm ² /ml และ (f) 0.24 cm ² /ml.....	87
ภาพที่ 4.19 ผลการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (A) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนในอากาศ (B) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ	89
ภาพที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนดแกรไฟต์กับสแตนเลสสตีลด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (A) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนในอากาศ (B) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ	90
ภาพที่ 4.21 ผลการศึกษาผลของจำนวนของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (a) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนในอากาศ (b) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ.....	91
ภาพที่ 4.22 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลินบลู (A) ภาพการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที	92
ภาพที่ 4.23 ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู (A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที	93
ภาพที่ 4.24 (A) รูปแบบลักษณะการจัดวางสะพานเกลือและจำนวนของสะพานเกลือ (B) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (C) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

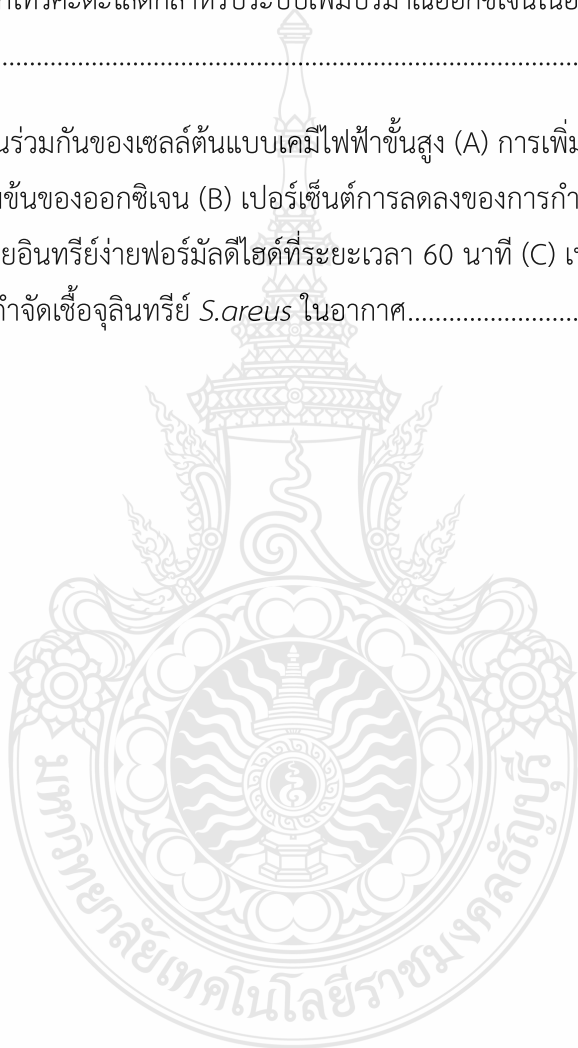
หน้า

ภาพที่ 4.25 ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	
(A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม	
(B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที	95
ภาพที่ 4.26 ผลการศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	
(A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม	
(B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที	96
ภาพที่ 4.27 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	
(A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม	
(B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที	97
ภาพที่ 4.28 การกำจัดสารระเหยอินทรีย์ง่ายอะซิโตนด้วยกลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบต่างๆของเซลล์	
ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 1	100
ภาพที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันภายใน	
เวลา 5 นาที.....	100
ภาพที่ 4.30 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกัน	
ภายในเวลา 15 นาที	102
ภาพที่ 4.31 กลไกการเร่งปฏิกิริยากับการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ฟอร์มัลดีไฮด์ (A) การลดลงของ	
สารระเหยอินทรีย์ฟอร์มัลดีไฮด์กับระยะเวลาในการกำจัดที่ระยะเวลา 15 นาที	104
ภาพที่ 4.32 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ <i>S.aureus</i> ของเซลล์โฟโตอิเล็ก	
โทรคะตะไลติกที่ระยะเวลา 10 นาที.....	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.33 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ (PEC cell) และ เซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ (EC cell) แบบที่ 2.....	105
ภาพที่ 4.34 การทำงานร่วมกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูง (A) การเพิ่มขึ้นของปริมาณ ความเข้มข้นของออกซิเจน (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของการกำจัด สารระเหยอินทรีย์ง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ระยะเวลา 60 นาที (C) เปอร์เซ็นต์การลดลง ของการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ <i>S. aureus</i> ในอากาศ.....	107



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงอุตสาหกรรม

สภาพอากาศในห้องระบบปิด จะมีการถ่ายเทอากาศน้อยมาก ทำให้เป็นที่สะสมและการแพร่กระจายของเชื้อโรค และสิ่งสกปรกที่เป็นมลภาวะต่อผู้อยู่อาศัยในห้องนั้น เช่น ฝุ่น แบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส เชื้อโรคต่างๆ และรวมถึงสารมลพิษทางอากาศที่อาจเกิดได้จากวัสดุที่ใช้ประกอบห้องหรือกิจกรรมต่างๆของคนในห้องนั้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอสฟอรัสไดออกไซด์ และเบนซีน เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อสุขภาพและความสดชื่นของคนที่อยู่อาศัยในห้องที่เป็นระบบปิดดังกล่าว ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องติดตั้งระบบฟอกอากาศ เพื่อกำจัดมลภาวะทางอากาศที่เกิดขึ้นและเพิ่มปริมาณออกซิเจนในห้อง เพื่อดูแลสุขภาพของผู้อยู่อาศัยและป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อโรคต่างๆ ซึ่งปัจจุบันเครื่องฟอกอากาศที่วางขายตามท้องตลาดยังมีราคาค่อนข้างแพง ส่วนที่มีราคาถูกก็ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศได้ไม่ดี และยังไม่พบว่ามีการเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศในเวลาเดียวกัน ดังนั้น การพัฒนานวัตกรรมสำหรับฟอกอากาศและระบบเพิ่มออกซิเจน ที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาประหยัด และสามารถประยุกต์ใช้กับห้องพักที่ผู้อยู่อาศัยต่างๆ ทั้งที่บ้าน สำนักงาน โรงพยาบาล โดยเฉพาะห้องที่เป็นระบบปิดที่มีผู้อยู่อาศัยจำนวนมากหรือหลากหลายซึ่งจะเป็นแหล่งในการแพร่กระจายเชื้อโรคได้เป็นอย่างดี จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องติดตั้งระบบฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค และเพิ่มคุณภาพอากาศด้วยการเติมก๊าซออกซิเจนในระบบที่จะช่วยยกระดับมาตรฐานคุณภาพชีวิตของคนที่อยู่อาศัยในห้องดังกล่าวได้เป็นอย่างดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนานวัตกรรมเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบฟอกอากาศ โดยใช้หลักการเร่งเชิงแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalysis; PEC) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพด้านการกำจัดสารมลภาวะต่างๆ และการแยกน้ำให้เป็นก๊าซออกซิเจนด้วยศักย์ไฟฟ้า และที่สำคัญสามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ในต้นทุนราคาที่ประหยัด เหมาะกับการนำไปใช้กับห้องที่มีผู้อยู่อาศัยในที่ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีด้าน Photoelectrocatalytic เป็นการศึกษาทั้งการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมให้สามารถดูดกลืนแสงและมีการส่งผ่านประจุในการเกิดปฏิกิริยาให้ได้มากที่สุดและอีกส่วนหนึ่งคือกระบวนการเตรียมฟิล์มบางสาร

กึ่งตัวนำบิสตอร์องรับที่สามารถนำไฟฟ้าและแสงผ่านได้ดี โดยต้องเป็นเทคนิคที่ง่าย ประหยัด และสามารถขยายขนาดได้ดีเพื่อการประยุกต์ใช้กับระบบที่ใหญ่ขึ้นได้ ซึ่งงานวิจัยนี้พัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบิสตอร์องรับ (Bismuth tungstate; Bi_2WO_6) ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าและการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบิสตอร์องรับ (Bismuth vanadate; BiVO_4) และทังสเตนออกไซด์ (Tungsten oxide; WO_3) ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถตอบโจทย์ของการพัฒนาเทคนิค Photoelectrocatalytic ดังกล่าวมาข้างต้นได้เป็นอย่างดี โดยงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาศักยภาพของผู้วิจัย ในการผลิตผลงานวิจัยทั้งการตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยระดับนานาชาติ และการยื่นจดทรัพย์สินทางปัญญา องค์ความรู้ที่ได้จากการพัฒนากระบวนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ และการพัฒนาเซลล์ต้นแบบระบบฟอกอากาศและเติมออกซิเจนในอากาศด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่จะมีประโยชน์ต่อนักวิจัย นักศึกษา อาจารย์ และผู้สนใจในงานวิจัยดังกล่าวนี้ นอกจากนี้ผลงานผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นจะมีประโยชน์ต่อสถานประกอบการที่สนใจพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยีจากงานวิจัยเพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อสร้างรายได้ให้กับสถานประกอบการและประเทศต่อไปได้เป็นอย่างดี

1.1.2 ที่มาของการศึกษาเชิงลึก

เทคโนโลยีโฟโตอิเล็กโทรเคตะไลติก ได้รับการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานต่ำ กระบวนการไม่ยุ่งยาก และยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ และการผลิตก๊าซออกซิเจนจากกระบวนการแยกน้ำ แต่ปัญหาหลักของเทคโนโลยีดังกล่าวคือ การพัฒนาเพื่อการใช้งานจริงในระดับสเกลที่มีขนาดใหญ่ให้สามารถใช้งานได้จริง ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มสารกึ่งตัวนำบิสตอร์องรับให้มีความสามารถในการขยายสเกลได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูงเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในระดับสเกลที่มีขนาดใหญ่ และพัฒนาเซลล์ต้นแบบให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาการตรึงฟิล์มด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า และเทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย และสามารถขยายสเกลได้ดี เพื่อตรึงสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็น และมีศักยภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายน้ำ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางเคมีไฟฟ้าและเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ที่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะ และความสม่ำเสมอของคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้ และที่สำคัญคือการพัฒนาและออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรเคตะไลติกให้ประสิทธิภาพสูง มีความสะดวกในกระบวนการทำงานเพื่อการประยุกต์ใช้กับการฟอกอากาศและเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศในห้องที่เป็นระบบปิด นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังมีเครือข่ายความร่วมมือกับบริษัททีเกิ้ล ดรีม จำกัด ที่มีความเชี่ยวชาญด้านการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมเพื่อตอบโจทย์ความต้องการของชุมชน และสามารถ

ผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์ โดยผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากทีมงานดังกล่าวในการช่วยสนับสนุนทีมวิศวกรด้านการออกแบบเพื่อช่วยออกแบบระบบให้กับผู้วิจัย เพื่อพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกให้มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้กับการฟอกอากาศ และเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศในห้องที่เป็นระบบปิดได้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยดังกล่าวนี้สามารถตอบโจทย์ให้กับสถานประกอบการ และภาคอุตสาหกรรมในการผลิตเครื่องฟอกอากาศ และเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศในห้องระบบปิด งานวิจัยนี้จะสามารถผลิตนวัตกรรมที่เป็นทางเลือกใหม่ให้กับผู้บริโภค ในการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อการฟอกอากาศ และเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศในห้องระบบปิด และยังคงหวังว่าจะสามารถพัฒนาต้นแบบเครื่องฟอกอากาศและเติมออกซิเจนเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในการสร้างรายได้ให้กับสถานประกอบการ และประเทศชาติต่อไป

1.1.3 ผลเสียอันเกิดจากปัญหาและมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น

ปัจจุบันการแพร่ระบาดของเชื้อโรคที่อยู่ในอากาศ เป็นปัญหาหลักระดับประเทศและโลกที่ต้องมีแนวทางหรือมาตรการในการแก้ไขปัญหาหรือหาทางป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพและทันทั่วถึง เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากการแพร่ระบาดของเชื้อโรคที่อยู่ในอากาศมีความรุนแรงและแผ่ขยายกันอย่างต่อเนื่อง เช่น เชื้อไวรัส Covid-19 ที่เป็นปัญหาระดับโลกในปัจจุบัน ดังนั้นหากยังไม่มีวิธีการแก้ไข และป้องกัน จะส่งผลกระทบกับทุกๆด้านโดยที่คิดประมาณการเป็นมูลค่าไม่ได้ ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และการดำรงชีวิตของคนในสังคม ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวนอกจากจะช่วยแก้ปัญหา และป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อโรคต่างๆ ได้แล้ว ยังช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ ซึ่งจะทำให้คนที่อยู่อาศัยในห้องดังกล่าวมีสุขภาพกาย และใจที่ดี และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้เกิดประสิทธิภาพด้านการผลิตทางอ้อมได้เป็นอย่างดี และยังรวมไปถึงการที่สถานประกอบการสามารถพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์ได้จะสามารถเพิ่มรายได้และลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทำให้ประเทศเรามีรายได้มากขึ้นและลดรายจ่ายจากการต้องสั่งซื้อเครื่องฟอกอากาศจากต่างประเทศได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ และผลิตออกซิเจน

1.2.2 เพื่อศึกษากลไกการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ และผลิตออกซิเจนจากการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

1.2.3 เพื่อพัฒนาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าชั้นสูงสำหรับการฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและเพิ่มปริมาณออกซิเจนจากระบบสารละลายด้วยเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก

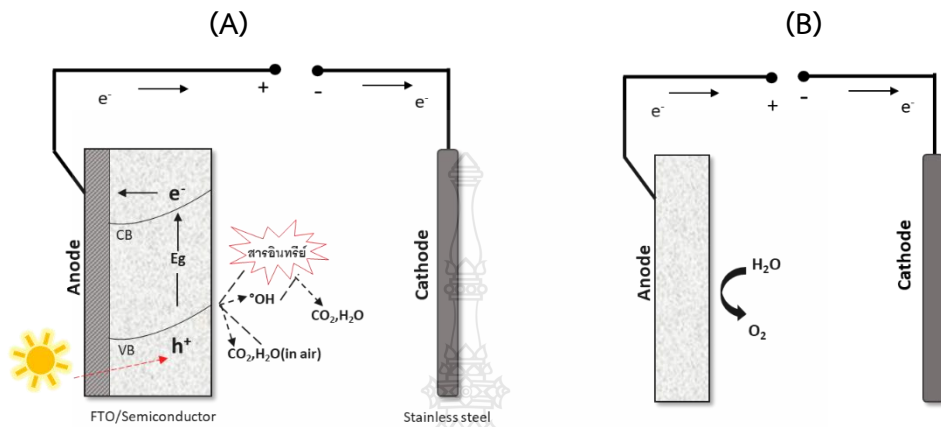
1.3.2 ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ชั้นไฟฟ้าและสมบัติทางเคมีไฟฟ้าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์และเพิ่มปริมาณออกซิเจน

1.3.3 การศึกษาและพัฒนาชุดต้นแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับการฟอกอากาศและเพิ่มปริมาณออกซิเจน รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพในระบบเพื่อการพัฒนาต่อยอดสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในการผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์

เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) เป็นเทคนิคที่ตรึงสารกึ่งตัวนำบนผิวชั้นไฟฟ้า ภายใต้สภาวะการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำที่ตรึงที่ชั้นไฟฟ้าด้วยแสงที่มีค่าพลังงานมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy; E_g) ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ทำให้เกิดการแยกของอิเล็กตรอน (Electron; e^-) ที่ชั้นการนำ (Conduction band; CB) และช่องว่างที่มีประจุบวก (Hole; h^+) ที่ชั้นวาเลนซ์ (Valence band; VB) ขณะเดียวกันจะเร่งปฏิกิริยาที่ชั้นไฟฟ้าแอโนดด้วยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าด้านบวกเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้ e^- ที่เกิดขึ้นที่วาเลนซ์ ไหลเข้าชั้นไฟฟ้าและเกิด h^+ จำนวนมากที่ชั้น VB ดังแสดงการเกิดปฏิกิริยาในภาพที่ 1.1 (A) ซึ่งเป็นระบบ PEC cell ที่อยู่ในอากาศ h^+ ที่ชั้น VB

ของสารกึ่งตัวนำ จะมีศักยภาพสูงในการออกซิไดส์สารที่เป็นมลภาวะทางอากาศ เป็นอนุมูล ไฮดรอกซิล (hydroxyl radical; $^{\circ}\text{OH}$) ซึ่งมีสมบัติที่เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมากสามารถกำจัดสารมลภาวะดังกล่าว ทำให้เกิดการกำจัดเชื้อโรคและสารอินทรีย์มลพิษที่อยู่ในอากาศได้เป็นอย่างดี

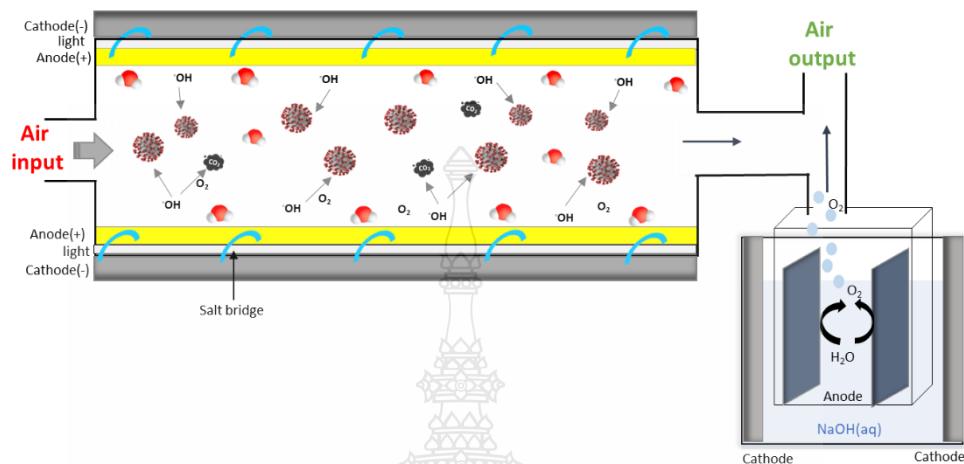


ภาพที่ 1.1 (A) กระบวนการกำจัดเชื้อโรคและสารอินทรีย์อันตรายในอากาศ (Air pollutants) ด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC cell) และ (B) การผลิตออกซิเจนจากกระบวนการแยกน้ำด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (EC cell)

นอกจากนี้งานวิจัยยังเพิ่มเซลล์เคมีไฟฟ้าชั้นสูง (Electrocatalytic cell; EC) ในระบบที่มีสารละลายน้ำดังแสดงในภาพที่ 1.1 (B) เป็นกระบวนการแยกน้ำโดยการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเคมี ภายใต้สภาวะการใช้ศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน (electron; e^-) จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังแคโทดในสารละลายน้ำที่มีสภาวะการนำไฟฟ้า ซึ่งบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดจะสามารถออกซิไดส์น้ำในสารละลายให้กลายเป็นออกซิเจนและลอยขึ้นไปในอากาศเหนือสารละลายเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศได้เป็นอย่างดี

แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนวัสดุรองรับที่โปร่งแสงและนำไฟฟ้าให้มีสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการจัดสรรมลภาวะทางอากาศ คือ เชื้อโรคและสารอินทรีย์มลพิษ และการศึกษาเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติกในการผลิตออกซิเจนในอากาศโดยจะเน้นพัฒนาสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงแสงธรรมชาติเพื่อความสะดวก ปลอดภัย และประหยัดในการใช้งานจริง พัฒนาระบบการเร่งการส่งผ่านประจุที่ชั้นสารกึ่งตัวนำด้วยการออกแบบรอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำต่างชนิดและเร่งการส่งผ่านด้วยการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าภายนอกเข้าไป โดยจะประยุกต์ฟิล์มบางที่ได้พัฒนาขึ้นกับระบบฟอกอากาศ ซึ่งได้ออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดเชื้อโรคและสารอินทรีย์ และศึกษาขั้วไฟฟ้าที่มีศักยภาพใน

การเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้ได้มากที่สุด ดังแสดงการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดมลภาวะทางอากาศและเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ



ภาพที่ 1.2 เซลล์ต้นแบบระบบฟอกอากาศด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก และเพิ่มออกซิเจนในอากาศด้วยเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก

ในภาพที่ 1.2 ภายใต้สมมุติฐาน คือ การพัฒนาฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารมลภาวะทางอากาศ และการศึกษาชีวไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการผลิตออกซิเจนจากกระบวนการแยกน้ำ ประกอบกับการออกแบบระบบที่ดีในการผสมผสาน PEC cell ในอากาศและ EC cell ในสารละลาย จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฟอกอากาศ และเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถใช้เครื่องฟอกอากาศและเติมออกซิเจนดังกล่าวเพื่อการติดตั้งไว้ในห้องที่เป็นระบบปิดในที่ต่างๆ ซึ่งจะสามารถช่วยกำจัดเชื้อโรค ลดมลพิษในอากาศและเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนทำให้ได้อากาศที่บริสุทธิ์และสดชื่น เป็นการเพิ่มคุณภาพชีวิตให้ปราศจากโรคและร่างกายสดชื่น สามารถทำงานและมีชีวิตได้อย่างมีประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ เพื่อใช้กับการฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิดด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก

1.5.2 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการสร้างชุดเซลล์ต้นแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าชั้นสูงสำหรับการฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิด

1.5.3 ได้บทความตีพิมพ์ระดับชาติหรือนานาชาติ สิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าและชุดต้นแบบการฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนในระบบพื้นที่ปิด



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds; VOCs) ที่อยู่ในชีวิตประจำวันเป็นสารเคมีที่มีอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักและอาจมีอะตอมของธาตุอื่นๆ เช่น ฟลูออไรด์ ไนโตรเจน คลอรีน ออกซิเจน หรือ ซัลเฟอร์ เป็นองค์ประกอบ สาร VOCs จะมีคุณสมบัติการระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย จึงทำให้สาร VOCs ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมเกิดเป็นมลพิษและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อีกด้วย

2.1.1 ประเภทของสาร VOCs

สาร VOCs สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดตามองค์ประกอบ ได้แก่

1) กลุ่ม Non-halogenated hydrocarbon หรือ Non-Chlorinated VOCs เป็นกลุ่มที่ไม่มีอะตอมของฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะปนเปื้อนมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น ตัวทำละลาย การเผาไหม้กองขยะ พลาสติก วัสดุ สีทาวัสดุต่างๆ เป็นต้น ส่งผลให้ผู้ประกอบอาชีพ นักดับเพลิง คนเผาถ่าน จึงมักป่วยด้วยโรคทางเดินหายใจ เนื่องจากได้รับสาร VOCs เป็นจำนวนมาก เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง โทลูอีน เฮกเซน ไซลีน ฟีนอล แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เบนซีน เอทิลเบนซีน เป็นต้น

2) กลุ่ม Halogenated hydrocarbon หรือ Chlorinated VOCs เป็นกลุ่มที่มีอะตอมของฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ที่มีความเป็นพิษและมีความเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มแรก ทำให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมและย่อยสลายได้ยาก

2.1.2 ผลกระทบของสาร VOCs ต่อสุขภาพมนุษย์

สาร VOCs สามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 3 ทางคือ ทางการหายใจการรับประทาน และการสัมผัสทางผิวหนัง เมื่อสาร VOCs เข้าสู่ร่างกายแล้วจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพแตกต่างกันตามชนิดของ VOCs ดังตัวอย่าง เช่น

- เบนซีน (Benzene) หากรับประทานหรือสูดดมโดยตรงจะก่อให้เกิดพิษต่อระบบประสาทส่วนกลาง ภาวะบกพร่อง ปวดศีรษะ มึนงง เหนื่อยง่าย การหายใจระคายเคือง หายใจลำบากและเร็ว เมื่อยล้า เบื่ออาหาร คลื่นไส้ เป็นลม หมดสติ และหลอดเลือดหัวใจล้มเหลว แต่ถ้าหากสูดดมติดต่อกันเป็น

เวลานานจะเกิดพิษต่อระบบเลือด ระบบภูมิคุ้มกันและเนื้องอกซึ่งสัมพันธ์กับโอกาสเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาวเพิ่มมากขึ้น

- คลอโรฟอร์ม (Chloroform) การสัมผัสที่ผิวหนังในปริมาณสูงทำให้เกิดอาการเจ็บปวดที่บริเวณสัมผัส หากรับโดยการหายใจ เป็นพิษต่อระบบประสาทส่วนกลาง ตับ และไต หากได้รับในปริมาณสูงทำให้อ่อนเพลีย เวียนศีรษะ และหากได้รับปริมาณต่ำติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำลายการทำงานของตับและไต

- เบนซิลคลอไรด์ (Benzyl Chloride) การสัมผัสสารเบนซิลคลอไรด์ทางการหายใจ ทำให้กล้ามเนื้อหดเกร็ง เกิดการอักเสบและเกิดอาการบวม น้ำของกล่องเสียง และหลอดลมใหญ่ เกิดอาการไอ หายใจถี่เร็ว ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน การสัมผัสถูกผิวหนังจะทำให้เกิดแผลไหม้ และสามารถทำลายเนื้อเยื่อผิวหนังทำให้เกิดผื่นแดงและปวด

- อะซีโตน (Acetone) การสูดดมหรือหายใจเข้าสู่ระบบหายใจจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเยื่อทางเดินหายใจ มีอาการไอ แสบหน้าอก เวียนศีรษะ ปวดหัว

- ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) ได้รับสารปริมาณมากจะทำให้หมดสติ หรือเสียชีวิตได้ เป็นพิษต่อตับและไต หากสัมผัสจะทำให้เกิดผื่นที่ผิวหนัง หากหายใจทำให้ปวดและเวียนศีรษะ และหากได้รับสะสมเป็นเวลานานส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งได้

- อะคริโลไนไตร (Acrylonitrile) การสูดดมสารอะคริโลไนไตรทำให้เกิดอาการเวียนศีรษะ ปวดศีรษะ น้ำตาไหล จาม เจ็บคอ คลื่นไส้ รู้สึกอ่อนเพลีย หมดสติ และอาจถึงตายได้ หากสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เกิดผื่นแดง

- ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride) หากสัมผัสผิวหนังจะทำให้ชาและบวมแดงได้ หากรับไอสารผ่านการสูดดมปริมาณน้อยติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำลายเส้นประสาทและโครงสร้างตับ ถ้ารับในปริมาณที่มาก ส่งผลให้เกิดพิษเฉียบพลันต่อตับ ปอด ไต หัวใจ และส่งผลให้เลือดไม่แข็งตัว ทำให้หมดสติและเสียชีวิตได้

- 1,2-ไดคลอโรโพรเพน (1,2-Dichloropropane) ส่งผลให้เกิดอาการเวียนศีรษะ คลื่นไส้ ทำลายตับ ไต และส่งผลให้เสียชีวิตได้ การได้รับปริมาณสูงแบบเฉียบพลันทำให้เกิดการระคายเคืองที่ตาและคอ หากสูดดมเป็นระยะเวลานานจะทำลายตับ ไต และระบบหายใจ

- เมทานอล (Methanol) เป็นพิษเมื่อสูดดม กลืนกินเข้าไป และเมื่อสัมผัสถูกผิวหนังไอของสารอาจทำให้เกิดระคายเคืองต่อดวงตาได้

- คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย การสูดดมก่อให้เกิดการระคายเคืองทางเดินหายใจ และอาจทำให้หมดสติได้ สารนี้มีพิษต่อตับ ไต ผิวหนัง ปอด ดวงตา ระบบประสาทส่วนกลางและอาจก่อให้เกิดมะเร็ง อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อระบบสืบพันธุ์อีกด้วย

- โบรโมมีเทน (Bromomethane) การสูดดมสารที่ปริมาณต่ำเข้าไปก่อให้เกิดอาการเวียนศีรษะ ง่วงนอน ปวดศีรษะ สายตาพร่ามัว สูญเสียการทรงตัวกล้ามเนื้อทำงานไม่ประสานงานกัน สับสน ทำลายปอดและไต

- 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane) เกิดพิษเฉียบพลันต่อระบบประสาท ตับ ไต หากรับในปริมาณมากพบว่าทำให้เกิดความผิดปกติของปอด และเสียชีวิตได้จากหัวใจวาย

- เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene) การหายใจปริมาณสูงก่อให้เกิดอาการเวียนศีรษะ ปวดศีรษะ ง่วงซึม สับสน คลื่นไส้ หมดสติและเสียชีวิต การสัมผัสที่ผิวหนังทำให้เกิดการระคายเคือง

- 1,3-บิวทาไดอิน (1,3-Butadiene) สัมผัสหรือสูดดมต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ก่อให้เกิดพิษต่อระบบเลือด ปอด และก่อให้เกิดมะเร็งได้ หากสัมผัสโดยตรงก่อให้เกิดการระคายเคือง หรือหากสัมผัสในปริมาณที่สูงมาก ก่อให้เกิดอาการมีลมพิษและเสียชีวิตได้

- คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) หากสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อยทำให้ผิวหนังแห้งเป็นโรคผิวหนังการสูดดมก่อให้เกิดการระคายเคืองทางเดินหายใจและส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลางและอาจทำให้หมดสติได้

- อะครอลีน (Acrolein) การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่ออย่างรุนแรง ก่อให้เกิดการระคายเคือง และเป็นแผลไหม้ หากหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ หายใจติดขัด หากรับปริมาณมากจะทำให้ปอดถูกทำลายและถึงแก่ชีวิตได้ หากกลืนเข้าไปจะเกิดพิษเฉียบพลันต่อระบบทางเดินอาหารและถึงแก่ชีวิต

- ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) หากได้รับปริมาณที่ความเข้มข้นต่ำ ส่งผลทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อตา จมูกและทางเดินหายใจ อาจมีอาการไอ เจ็บหน้าอก แต่ถ้าได้รับปริมาณเข้มข้น

สูงอาจทำให้หมดสติ และตายในที่สุด เนื่องจากสารฟอร์มิกจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดฟอร์มิก (Formic acid) ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายระบบการทำงานของเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย

- อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เวียนศีรษะ เมื่อยล้า เชื่องซึมและอาจทำให้หมดสติ

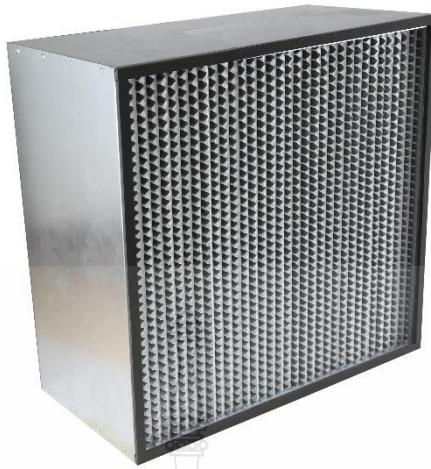
2.2 เครื่องฟอกอากาศ (Air Purifier)

เครื่องฟอกอากาศ (Air Purifier) เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สำคัญสำหรับพื้นที่ปิด เช่น ห้องนอน ห้องรับรอง สำนักงานต่างๆ จึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องฟอกอากาศเพื่อช่วยฟอกอากาศให้สะอาด บริสุทธิ์มากขึ้น โดยการดักจับสิ่งแปลกปลอมในอากาศ เชื้อโรค ฝุ่นควัน รวมไปถึงกลิ่นไม่พึงประสงค์ อย่างอื่น การทำงานจะใช้หลักการดูดอากาศเข้าไปในระบบ ภายในจะมีระบบดักจับสิ่งแปลกปลอมด้วย แผ่นกรอง ฆ่าเชื้อโรค กำจัดกลิ่นด้วยระบบอื่นๆ และจะปล่อยอากาศที่บริสุทธิ์มากขึ้นออกมา

2.2.1 ระบบการทำงานของเครื่องฟอกอากาศ

2.2.1.1 แผ่นกรองอากาศ (Air filters)

แผ่นกรองอากาศ จะทำหน้าที่ดักจับเชื้อโรค สิ่งสกปรก แบคทีเรีย ไวรัส ฝุ่นละอองในอากาศที่ทำให้เกิดภูมิแพ้ มีประเภทที่ทำมาจากกระดาษ เส้นใย ตาข่าย ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆต่อเนื่องกัน ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ คือแผ่นกรองอากาศแบบ HEPA หรือ High Efficiency Particulate Air เป็นแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง ลักษณะของแผ่นกรองอากาศจะสามารถให้อากาศผ่านไปได้แต่ออนุภาคจะไม่สามารถผ่านได้ ออกแบบมาเพื่อดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.3 ไมครอน และมีประสิทธิภาพดักจับฝุ่นละอองได้ไม่น้อยกว่า 99.97% แผ่นกรองอากาศ HEPA Filter มีจุดเด่นในการลดจำนวนสิ่งสกปรกและสารก่อภูมิแพ้ที่อยู่ในรูปอนุภาคได้เป็นอย่างดี จึงเป็นตัวช่วยในการสร้างอากาศบริสุทธิ์ในบริเวณที่มีการใช้งาน ส่งผลให้ผู้อยู่อาศัยมีสุขภาพที่ดีตามไปด้วย ในปัจจุบัน HEPA Filter มีการนำมาใช้กับอุปกรณ์อื่น นอกจากเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านแล้ว เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องบิน การแพทย์ ส่วนมากก็จะใช้เพื่อให้อากาศมีความบริสุทธิ์มากขึ้น



ภาพที่ 2.1 แผ่นกรองอากาศ HEPA สำหรับเครื่องฟอกอากาศ

ที่มา : <https://mazuma.co.th/th/product/carbon-hepa-filter-honeywell-a5>

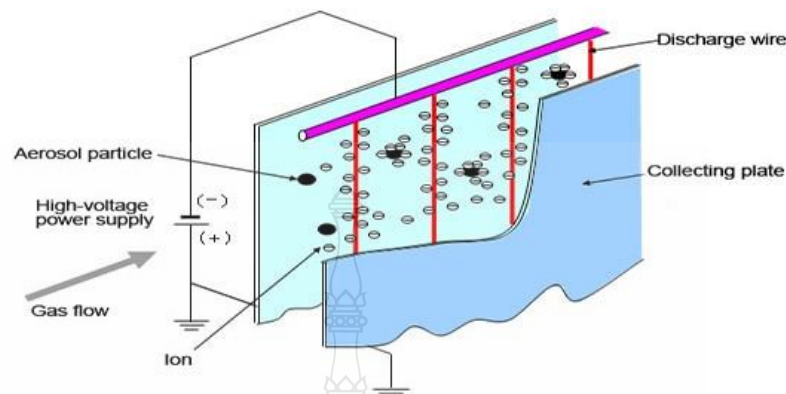
2.2.1.2 Electrostatic Precipitator (ESP)

Electrostatic Precipitator (ESP) เป็นระบบดักจับฝุ่นละอองที่ใช้แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic forces) ประกอบด้วยเส้นลวดประจุลบและแผ่นเพลตโลหะประจุบวก เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าแรงสูงจะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลตโลหะและเส้นลวดเกิดการแตกตัว (Ionization) เมื่ออากาศหรือแก๊สที่ประกอบด้วยละอองลอย ฝุ่นละออง เคลื่อนที่ผ่านอนุภาคจะแตกตัวเป็นไอออน อนุภาคที่แตกตัวจะถูกดักจับติดกับแผ่นเพลตโลหะด้วยแรงทางไฟฟ้า ที่เรียกว่า แรงคูลอมบ์ จึงทำให้อากาศที่ออกมาบริสุทธิ์ ซึ่งหลักการนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบดักจับฝุ่นละอองในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ รวมถึงกับเครื่องฟอกอากาศขนาดเล็กภายในบ้าน สำนักงาน หรือโรงพยาบาลต่าง ๆ

มีวิธีการทำความสะอาดฝุ่นละอองหรืออนุภาคที่ดักจับบริเวณแผ่นโลหะสามารถทำได้โดยการเคาะออก ขัดออกด้วยแปรง และล้างออกด้วยน้ำหรือน้ำยาทำความสะอาดแผ่นโลหะแต่ต้องระมัดระวังอันตรายจากศักย์ไฟฟ้าสูงควรให้ช่างเทคนิคในการดูแลรักษา

ระบบ Electrostatic precipitator เป็นระบบที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงและดักจับฝุ่นละอองด้วยแรงคูลอมบ์ ซึ่งประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองแต่ละขนาดก็จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มของศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตโลหะและเส้นลวด และเวลาของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่าน

สนามไฟฟ้า จึงมีการนำแผ่นกรองแบบ HEPA มาใช้ในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ได้ดีขึ้น



ภาพที่ 2.2 กระบวนการ Electrostatic precipitator (ESP) สำหรับระบบฟอกอากาศ

ที่มา: www.hitachi-infra.com.sg

2.2.1.3 Gas-Phase air filters

เป็นระบบที่มีไว้สำหรับกำจัดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ต่างๆ โดยการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดซับมลพิษเป็นตัวช่วยในการทำงานของระบบ เพื่อช่วยดูดซับกลิ่นไม่พึงประสงค์และก๊าซพิษต่างๆ โดยที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์ หรือ แอกทิเวเตด คาร์บอน (Activated Carbon) เป็นเทคโนโลยีการดูดซับถ่านกัมมันต์ใช้โครงสร้างที่มีรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพื่อให้พื้นที่ผิวขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพการดูดซับ ดังนั้นจึงเป็นข้อดีที่จะดูดซับสิ่งสกปรก

- แผ่นกรองคาร์บอนใช้คู่กับเครื่องฟอกอากาศ เพื่อใช้กรองสิ่งแปลกปลอมโดยสามารถใช้ภายในบ้านอาคารสำนักงาน และโรงงานอุตสาหกรรม

- แผ่นกรองคาร์บอนช่วยในการกำจัดกลิ่น ทั้งในบ้านเรือน อาคาร ที่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ ตัวแผ่นกรองคาร์บอนจะช่วยในการดูดซับกลิ่น เพื่อให้ได้อากาศที่บริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เป็ณภูมิแพ้หรือผู้ป่วยทางเดินระบบหายใจ

- การใช้แผ่นกรองคาร์บอนร่วมกับแผ่นกรอง HEPA จะช่วยทำให้ได้รับอากาศที่บริสุทธิ์มากขึ้น การใช้ตัวกรองหลายชั้นทำให้อากาศได้ผ่านตัวกรองแล้วตัวกรองคาร์บอนมีหน้าที่ในการดูดซับ

สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนทั้งฝุ่นควัน มลภาวะ เชื้อรา แบคทีเรียในอากาศ ส่งผลให้เกิดการดักจับมลพิษต่างๆ ได้ดีขึ้น ทำให้อากาศบริสุทธิ์

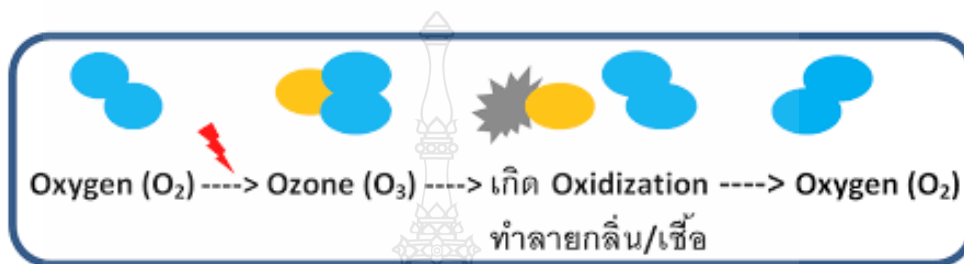


ภาพที่ 2.3 แผ่นกรองคาร์บอนสำหรับใช้คู่กับเครื่องฟอกอากาศเพื่อกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์
ที่มา : <https://hydrosilintl.com/air-filtration>

2.2.1.4 Ozone generator

โอโซน (Ozone หรือ O_3) คือ ก๊าซที่ประกอบไปด้วยออกซิเจน 3 อะตอม มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อไวรัสได้ดีกว่า UVC และคลอรีนมากถึง 3,125 เท่า โดยโอโซนจะแยกย่อยสลายของโมเลกุลในสารปนเปื้อนต่างๆ โอนโซนจะเป็นก๊าซที่มีโครงสร้างไม่เสถียร แต่เมื่อแปรสภาพกลับไปเป็นก๊าซออกซิเจนแล้วก็ไม่เป็นอันตรายใดๆ ซึ่งนำระบบโอโซนมาใช้กับระบบการฟอกอากาศโดยเชื่อว่าจะช่วยกำจัดอนุภาคก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารระเหยต่างๆ ที่ปนมากับอากาศได้ดี พร้อมทั้งสามารถกำจัดเชื้อโรคบางอย่างได้อีกด้วย ดังนั้นโอโซนจึงถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อฆ่าเชื้อในอากาศและน้ำ แต่ยังมีผลเสีย เนื่องจากการสูดโอโซนเข้าไปแม้จะในปริมาณเล็กน้อยก็อาจทำให้เกิดการระคายเคืองในลำคอ ไอ เจ็บหน้าอก และหายใจลำบากได้ สำนักงานความปลอดภัยและอาชีวอนามัย (OSHA) แนะนำให้ความเข้มข้นของโอโซนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.1 ppm หรือน้อยกว่า เป็นเวลา 8 ชั่วโมงในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร จึงมักจะใช้เครื่องฟอกอากาศประเภทนี้กับพื้นที่ที่ไม่แออัด ซึ่งเครื่องผลิตโอโซน Ozone Generator สามารถปล่อยโอโซนให้เข้าถึงทุกมุมของสภาพแวดล้อมทั้งห้องเดี่ยวหรือพื้นที่ขนาดใหญ่ ขึ้นอยู่กับเครื่องผลิตโอโซน Ozone Generator โดยไม่ทิ้งสารตกค้าง ซึ่งประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัดจุลินทรีย์โดยเฉพาะแบคทีเรียและไวรัสนั้นสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่

- ความเข้มข้นของโอโซน
- เวลาสัมผัสระหว่างโอโซนกับเชื้อจุลินทรีย์
- อุณหภูมิ-ความชื้นของสภาพแวดล้อม
- ความต้านทานโดยธรรมชาติของเชื้อจุลินทรีย์เป้าหมาย



ภาพที่ 2.4 กลไกการกำจัดเชื้อโรคด้วยระบบโอโซน

ที่มา : <http://www.protechsci.com>

2.2.1.5 UV Light

เป็นการใช้หลอดไฟ UV สำหรับการฆ่าเชื้อโรค (UV Sterilizing Lamp) โดยการทำงานผสมผสานกับรูปแบบการกรองอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดและยับยั้งเชื้อโรค แบคทีเรีย สูงถึง 99.9% UV Light เป็นระบบที่นำรังสีอัลตราไวโอเลตมาใช้ในการกำจัดและฆ่าเชื้อโรคต่าง เช่น แบคทีเรีย ไวรัส เชื้อรา รวมถึงมลพิษอื่นๆ ในอากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

แสง UVC คือรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 100-280 นาโนเมตร เป็นรังสีที่โดยธรรมชาติจะไม่สามารถเดินทางผ่านชั้นโอโซนลงมายังโลกได้ เนื่องจากมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า UVA และ UVB แต่ในขณะเดียวกัน UVC มีพลังงานมากกว่า และมีความสามารถในการทำลาย DNA และ RNA ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กและเชื้อโรคต่างๆ ทำให้แบคทีเรีย ไวรัส และเชื้อโรคชนิดต่างๆ ไม่สามารถขยายตัวต่อไปได้ แต่ยังมีข้อเสียต่อการใช้งานสำหรับระบบฟอกอากาศ

- ผิวหนัง ทำให้ผิวหนังไหม้และก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้
- ดวงตา อาจทำให้กระจกตาอักเสบ แสบตาหรือเป็นต้อกระจก

- ระบบทางเดินหายใจ หากแสง UVC ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 240 นาโนเมตรสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะทำให้เกิดก๊าซโอโซน (O_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษออกมา ส่งผลให้เป็นอันตรายต่อผู้อยู่อาศัยได้



ภาพที่ 2.5 หลอดไฟแสงยูวีสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศ

ที่มา: <https://www.thehealthy.com/allergies/uv-air-purifier>

2.2.2 ประเภทของเครื่องฟอกอากาศ

โดยทั่วไปเราสามารถจำแนกประเภทของเครื่องฟอกอากาศได้จากการใช้งาน ทั้งเรื่องระบบการกรอง ชนิดของแผ่นกรอง คุณสมบัติ และลักษณะการใช้งาน เช่น เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรอง เครื่องฟอกด้วยประจุลบ หรือเครื่องฟอกแบบพวกา แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.2.2.1 เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองเป็นหลัก Filtration Air Purifier

เครื่องฟอกอากาศชนิดนี้ จะอาศัยการดูดอากาศโดยรอบเข้ามาผ่าน แผ่นกรองอากาศ หลายชนิด เช่น แผ่นกรอง Activated Carbon ที่มีคุณสมบัติดักจับและดูดซับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ ทำงานร่วมกับแผ่นกรอง HEPA ซึ่งจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกรองฝุ่นได้ค่อนข้างดีและกำจัดกลิ่นอีกด้วย

2.2.2.2 เครื่องฟอกอากาศแบบพกพา Portable Air Purifier

เครื่องฟอกอากาศขนาดเล็ก สามารถพกพาไปใช้นอกบ้านได้ เหมาะสมกับพื้นที่ ๆ ไม่กว้างมาก เช่น เครื่องฟอกอากาศพกพาในรถยนต์ที่ต่อไฟจากอะแดปเตอร์ภายในรถยนต์ เครื่องฟอกอากาศในรถยนต์ถูกออกแบบมาให้ใช้งานในรถยนต์โดยเฉพาะ มีคุณสมบัติฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดจะสามารถฟอกอากาศในพื้นที่ขนาดประมาณ 4-10 เมตร ซึ่งเป็นระบบฟอกอากาศที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ราคาค่อนข้างต่ำ

2.2.2.3 เครื่องฟอกอากาศแบบผสมผสาน Integrated Air Purifier

เทคโนโลยีในปัจจุบัน มีเครื่องฟอกอากาศที่สามารถใช้ระบบการกรองอากาศได้หลายระบบ ซึ่งเครื่องฟอกอากาศแบบผสมผสาน เป็นการประยุกต์เอาเทคโนโลยีการฟอกอากาศแบบอื่น ๆ มาผสมผสานกับการใช้แผ่นกรองเพื่อช่วยให้ฟอกอากาศมีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม เช่น การใช้ Negative Ionization คือ เทคโนโลยีที่อาศัยหลักไฟฟ้าสถิต ในการปล่อยประจุไอออนลบออกไปในอากาศ แล้วให้ไปจับตัวกับประจุบวกของพวกอนุภาคต่างๆ ที่เป็นอันตรายจำพวก ฝุ่น สารก่อภูมิแพ้ เชื้อรา เป็นต้น

2.2.3 ประโยชน์ของเครื่องฟอกอากาศ

- ช่วยป้องกันโรคภัยไข้เจ็บและโรคทางเดินหายใจที่เกิดจากฝุ่น เชื้อแบคทีเรีย เช่น โรคภูมิแพ้ เพราะในอากาศเต็มไปด้วยฝุ่นละอองและสิ่งแปลกปลอมที่มีอนุภาคเล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ ภูมิแพ้ต่างๆ เครื่องฟอกอากาศจะช่วยกรองมลพิษต่างๆ ในอากาศได้ดี
- ช่วยลดอาการกำเริบของภูมิแพ้ เครื่องฟอกอากาศเป็นตัวช่วยทำให้อาการภูมิแพ้ทุเลาลง และส่วนใหญ่มักได้ผลเป็นอย่างดี รวมไปถึงอาการเป็นไข้หวัดคัดจมูกด้วย
- ช่วยแก้ปัญหาเรื่องการนอนไม่หลับหรือหลับยาก จากอาการนอนหลับไม่สนิท หรือหลับๆ ตื่นๆ อ่อนเพลีย พักผ่อนไม่เพียงพอ เนื่องจากสภาวะอากาศและฝุ่นละออง เครื่องฟอกอากาศจะทำให้ปัญหาเหล่านี้จะค่อยๆ ลดลงไปและทำให้นอนหลับสนิทได้ในบรรยากาศของอากาศบริสุทธิ์
- เครื่องฟอกอากาศช่วยให้ปอดทำงานได้ดีขึ้น เพราะอากาศที่บริสุทธิ์ย่อมมีผลให้ร่างกายได้รับแต่สิ่งที่ดีและลดการทำงานของหนักของปอดลงได้ ส่งผลไปถึงสุขภาพที่แข็งแรงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

- เครื่องฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง นอกจากจะทำให้อากาศสดชื่น สามารถทำให้
อากาศปลอดมลพิษ ขจัดกลิ่น และฆ่าเชื้อโรค ยับยั้งเชื้อโรคในอากาศไม่ให้แพร่และขยายจำนวน ทำลาย
กลิ่นสารเคมี ก๊าซพิษ ไม่ให้มีสารพิษตกค้าง

- กำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ทำให้ลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ภายในบ้านได้ หรือกลิ่นที่เกิด
จากสาร VOCs เช่น ยาย้อมผม ผสมอยู่กับสีทาบ้าน น้ำยาล้างห้องน้ำ น้ำยาทาเล็บ ซึ่งเป็นสารระเหย
ต่างๆที่ส่งผลอันตรายต่อสุขภาพได้

2.3 เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก

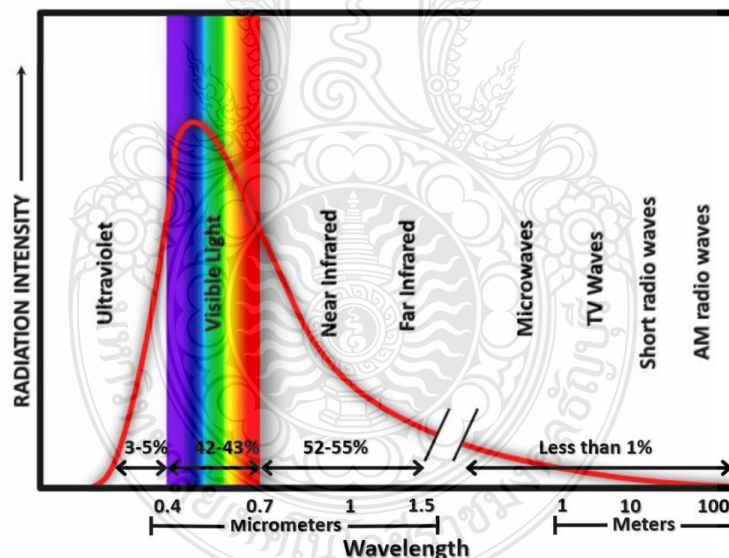
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic technique; PEC) เป็น
เทคนิคที่ตรึงสารกึ่งตัวนำบนผิวขั้วไฟฟ้า โดยการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำที่ตรึงที่ขั้วไฟฟ้าด้วยแสงที่มีค่า
พลังงานมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy; Eg) ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ทำให้เกิดการ
แยกของอิเล็กตรอน (electron; e^-) ที่ชั้นการนำ (Conduction band; CB) และช่องว่างที่มีประจุบวก
(hole; h^+) ที่ชั้นวาเลนซ์ (Valence band; VB) ขณะเดียวกันจะเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยการ
ควบคุมศักย์ไฟฟ้าด้านบวกเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ชั้นการนำไหลเข้าขั้วไฟฟ้าและ
เกิด h^+ จำนวนมากที่ชั้นการนำ ส่งผลให้มีศักยภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นมลภาวะทางอากาศ
(Air pollutant) ทั้งเชื้อโรค และสารอินทรีย์มลพิษ และที่สำคัญ คือสามารถออกซิไดซ์ไอน้ำในอากาศ
ให้เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $^{\bullet}OH$) ซึ่งมีสมบัติที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถ
กำจัดสารมลภาวะดังกล่าว ทำให้เกิดการกำจัดเชื้อโรคและสารอินทรีย์มลพิษที่อยู่ในอากาศได้เป็นอย่างดี
นอกจากนี้งานวิจัยยังเพิ่มเซลล์เคมีไฟฟ้าชั้นสูง (Electrocatalytic cell; EC) ในระบบที่มีสารละลาย
น้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการแยกน้ำโดยการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเคมี ภายใต้สภาวะการใช้
ศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน (electron; e^-) จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังแคโทดในสารละลายน้ำที่มี
สภาวะการนำไฟฟ้า ซึ่งบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดจะสามารถออกซิไดซ์น้ำในสารละลายให้กลายเป็น
ออกซิเจนและลอยขึ้นไปในอากาศเหนือสารละลายเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศ แต่
อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดของเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก คือการพัฒนาขั้วไฟฟ้าให้มี
ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม ส่งผลทำให้เทคนิค
ดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.4 การพัฒนาข้อไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ

การพัฒนาข้อไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตอิเล็กทรอนิกส์ใด ๆ ก็มีวิธีดังนี้

2.4.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง

การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดกลืนแสงธรรมชาติ สารกึ่งตัวนำต้องมีความสามารถในการดูดกลืนในช่วงแสงวิสิเบิล (Visible light) สิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาว่าสารกึ่งตัวนำจะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นใด ช่วงหนึ่งในแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งค่าที่เหมาะสม สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วง วิสิเบิลได้จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 nm มีความเข้มของแสง (Radiation intensity) มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแสงอื่นๆ เช่น แสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นการเลือกใช้สารกึ่งตัวนำควรมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของข้อไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้ดีในช่วงแสงธรรมชาติ



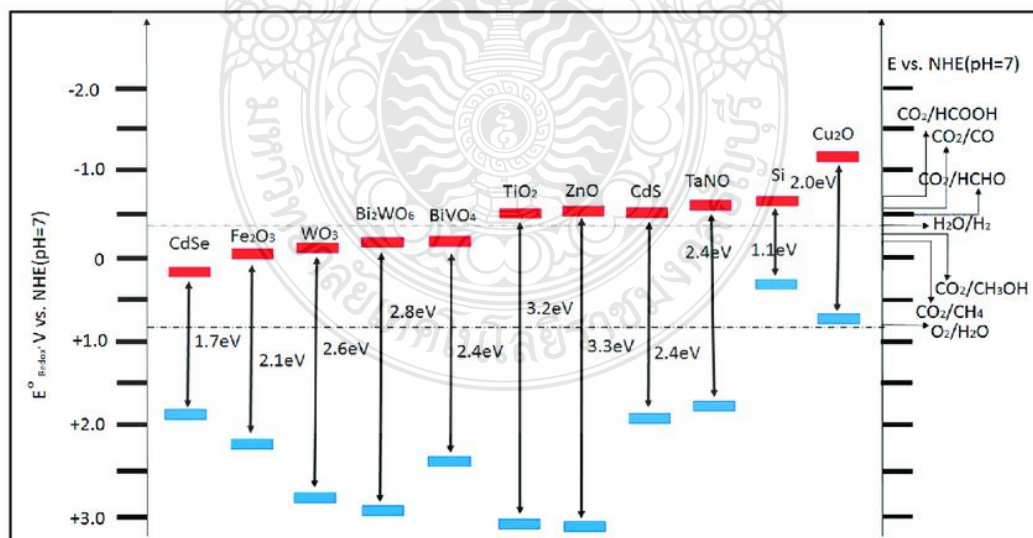
ภาพที่ 2.6 ปริมาณความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์

ที่มา : <https://geoengineering.global>

การเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงวิสิเบิล จะมีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy; E_g) ซึ่งเป็นค่าความต่างของชั้นพลังงานของแถบการนำ (Conduction band; CB) กับแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) เมื่อได้รับพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานงานของสารกึ่งตัวนำจะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำและเกิดการนำไฟฟ้าหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปในการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง ซึ่งการเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลควรมีค่าแถบพลังงานน้อยกว่า 3.1 eV สามารถคำนวณความสัมพันธ์ของค่าพลังงานแสงได้จากตัวแปรค่าความยาวคลื่น (λ ในหน่วย นาโนเมตร) กับ ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (E_g ในหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์, eV) ดังสมการต่อไปนี้

$$E \text{ (eV)} = 1240 / \lambda \text{ (nm)}$$

ระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์กับแถบการนำก็มีความสำคัญในการพิจารณาเลือกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจากความสามารถในการออกซิเดชันน้ำ ดังภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำและค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันและออกซิเดชันของน้ำ หลักการคือสารกึ่งตัวนำควรมีระดับแถบการนำที่สูงกว่าหรือไปทางด้านลบมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (0.00 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน SHE) และระดับแถบวาเลนซ์ควรมีระดับต่ำกว่าหรือไปทางด้านลบมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (1.23 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน SHE)



ภาพที่ 2.7 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันและออกซิเดชันของน้ำ

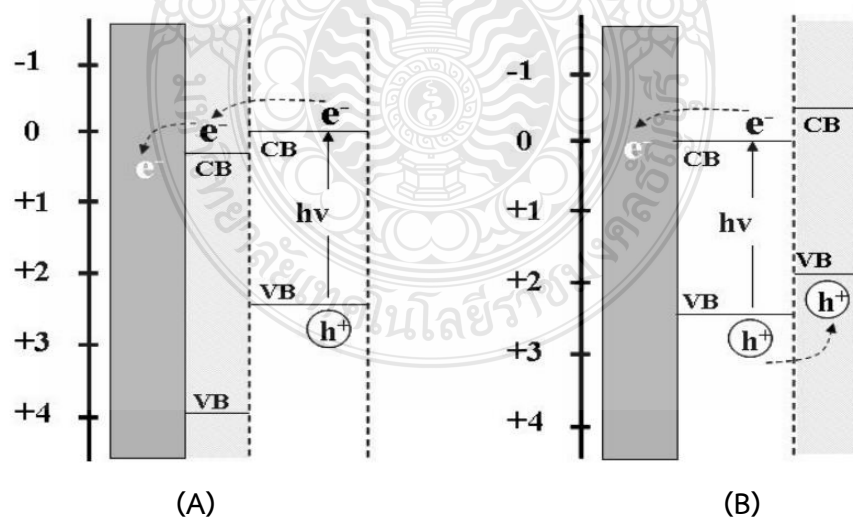
ที่มา : <https://www.researchgate.net>

2.4.2 การพัฒนาการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานแสงจนสามารถทำให้เกิดการแยกกันของประจุ คือ อิเล็กตรอน (e^-) ไปที่แถบการนำและ โฮล (h^+) ที่แถบวาเลนซ์ ตามลำดับ หากไม่มีการถ่ายโอนประจุที่เกิดขึ้นไปที่อื่น ประจุทั้งสองจะกลับมารวมกันอีกครั้ง เราเรียกระบวนการดังกล่าวว่า recombination effect ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าลดลง ดังนั้นการพัฒนาระบบการส่งผ่านประจุที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าถือว่ามีความสำคัญยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2.8 แสดงการเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ

- การเร่งการส่งผ่าน e^- : สามารถพัฒนาระบบการส่งผ่านประจุดังกล่าวได้โดยการเพิ่มสารกึ่งตัวนำที่มีค่าพลังงานที่แถบการนำและแถบวาเลนซ์ที่เหมาะสมควบคู่กับสารกึ่งตัวนำที่มีอยู่เดิมในกระบวนการเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนสามารถกระทำได้โดยการเพิ่มสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานที่แถบการนำต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำเดิม

- การเร่งการส่งผ่าน h^+ : เมื่อสารกึ่งตัวนำเดิมได้รับพลังงานแสงกระตุ้นอิเล็กตรอนขึ้นไปยังแถบการนำแล้ว อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนไปยังแถบการนำของสารกึ่งตัวนำที่ได้เติมเข้าไปทำให้เกิดการแยกระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลได้ดียิ่งขึ้นสำหรับการเร่งการส่งผ่านโฮล (h^+) จะสามารถทำได้โดยการตรึงสารกึ่งตัวนำที่มีค่าระดับพลังงานที่แถบวาเลนซ์สูงกว่าแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำเดิม



ภาพที่ 2.8 แสดงการเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ (A) การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) (B) การเร่งการส่งผ่านช่องว่าง (h^+)

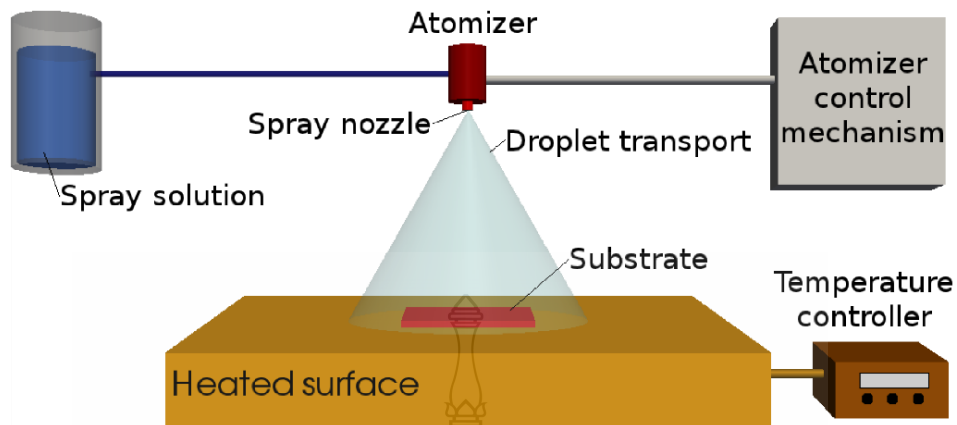
2.4.3 การพัฒนาลักษณะผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

การลักษณะของพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นบริเวณที่สารรีดอกซ์เป้าหมายจะมาเกาะติด และเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้า ลักษณะผิวหน้าที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดของสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถพัฒนาได้โดยการเตรียมสารกึ่งตัวนำให้มีลักษณะโครงสร้างยึดเกาะ หรือการพัฒนาวิธีทำความสะอาดพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการยึดติดของฟิล์มได้ดีมากขึ้น

2.5 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

2.5.1 เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis Technique)

เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส เป็นอีกเทคนิคที่นิยมใช้สารละลายในการเตรียมฟิล์มบาง โดยนำสารละลายที่เตรียมได้ฉีดพ่นด้วยหัวสเปรย์เป็นละอองฝอยไปยังวัสดุรองรับ (Substrate) และให้ความร้อนกับวัสดุรองรับ มีพารามิเตอร์ที่หลากหลายสำหรับการเตรียมการฟิล์มบาง ในเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ ระยะห่างของหัวฉีดถึงพื้นผิว ขนาดหยด ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และปริมาตรของสารละลายฉีดพ่น การเตรียมของสารละลายสารตั้งต้น กระบวนการกระจายของละอองลอย การทำให้เป็นละอองและการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกลไกกระบวนการไพโรไลซิสแบบสเปรย์ [1-3] ดังแสดงในภาพที่ 2.9 นอกจากนี้ยังมีข้อดีหลายประการ เช่น (1) สามารถเตรียมฟิล์มบางเป็นชั้น มีรูพรุน และองค์ประกอบที่ต่างกัน (2) ความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้ง่ายโดยการปรับพารามิเตอร์เตรียมการให้เหมาะสม (3) เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสมีค่าบำรุงรักษาต่ำและใช้พลังงานต่ำ แม้ว่าเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสจะมีข้อดีหลายประการ แต่ยังมีข้อเสีย เช่น (1) การขยายขนาดสเกลทำได้ยาก (2) ใช้อุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างฟิล์มบาง



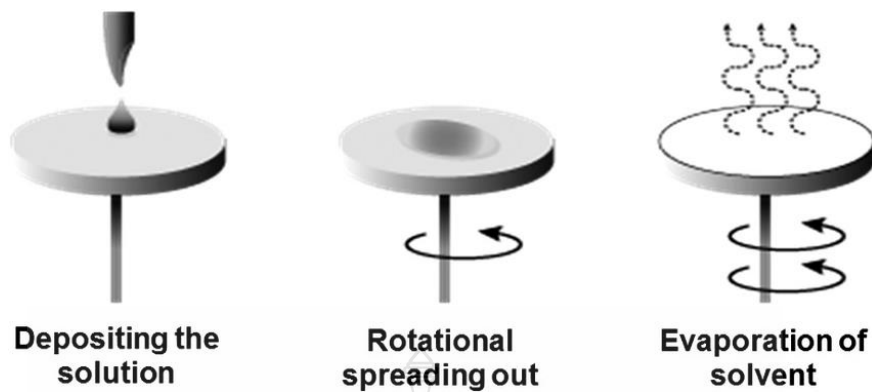
ภาพที่ 2.9 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis Technique)

ที่มา : <https://www.iue.tuwien.ac.at>

2.5.2 เทคนิคโซลเจล (Sol gel Technique)

เป็นเทคนิคที่มีความง่ายในการเตรียมฟิล์มบางบนพื้นผิวโลหะหรือแก้ว การสร้างตัวของฟิล์มบางโดยโซลเจลมีสามขั้นตอน คือ (ก) การเตรียมสารละลายตั้งต้น (ข) การสะสมโซลบนสารตั้งต้นโดยใช้วิธีการที่เหมาะสม (ค) การใช้ความร้อนเพื่อเตรียมฟิล์ม เทคนิคโซลเจลสามารถแยกย่อยตามวิธีการในการทำให้เกิดฟิล์มจากเจลหรือกระบวนการเคลือบได้เป็นสองวิธีดังนี้:

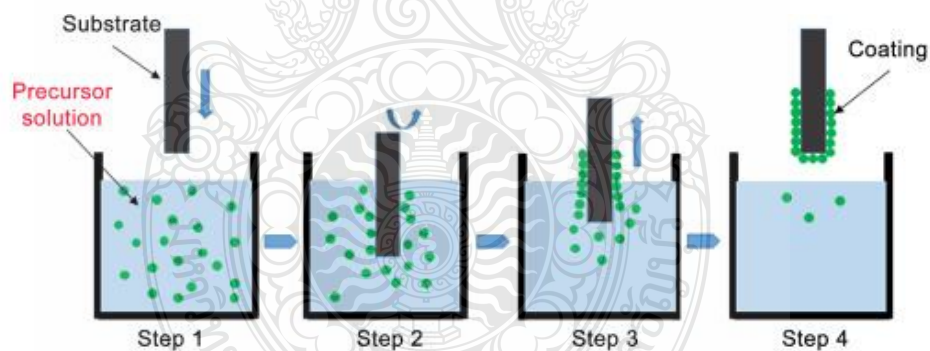
1) การเคลือบแบบหมุน (Spin coating) วิธีนี้ โซลจะถูกวางบนจานหมุนแนวนอนที่หมุนสม่ำเสมอเพื่อการกระจายตัวที่เหมาะสมกับการเคลือบที่สม่ำเสมอโดยใช้กาวยึดพื้นผิวที่ต้องการเคลือบและแรงเหวี่ยง ซึ่งความหนาของฟิล์มควบคุมโดยความเร็วเชิงมุม ความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายตั้งต้น [4-6] ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การเตรียมฟิล์มบางด้วยเคลือบแบบหมุน (Spin coating)

ที่มา : <https://www.researchgate.net>

2) การเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating) เป็นการจุ่มพื้นที่ผิวที่ต้องการเคลือบในสารละลายที่เตรียมไว้ ด้วยการทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว เช่น การอบ ทำให้ได้ฟิล์มที่พื้นผิวสม่ำเสมอ และมีประสิทธิภาพโดยการปรับเวลาการจุ่ม เวลาทำให้แห้ง และจำนวนรอบให้เหมาะสม [7-10] ดังแสดงภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating)

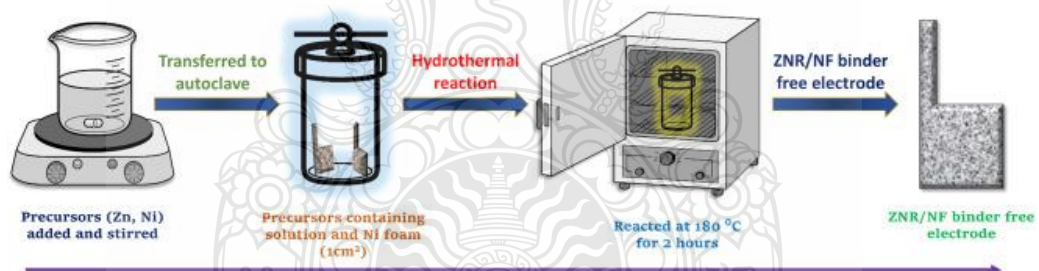
ที่มา : <https://www.tri-entoenec.co.th>

วิธีการโซลเจลนี้มีข้อดีหลายประการดังนี้ (1) สามารถเตรียมฟิล์มบนพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ได้ง่ายขึ้นและมีความหนาที่เหมาะสม (2) วิธีการโซลเจลทำให้สารละลายมีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพทางแสงสูง และ (3) เทคนิคนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเทคนิค

ดังกล่าวนี้ยังมีข้อจำกัด คือ (1) ยังคงมีปัญหากับการยึดเกาะและการหลุดลอก และ (2) ความเสถียรของฟิล์มสังเคราะห์ซึ่งยังต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติม

2.5.3 เทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Technique)

วิธีนี้มีลักษณะเฉพาะและกระบวนการเคลือบฟิล์มจะดำเนินการภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูง วิธีไฮโดรเทอร์มอลใช้กันอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์ผลึกเดี่ยว โครงสร้างนาโน และฟิล์มบางของโลหะออกไซด์ เทคนิคนี้ทำให้เกิดโครงสร้างฟิล์ม [11] รูปร่างต่างๆ เช่น นาโนทิวบ์ แท่งนาโน นาโนชีต ภายใต้สภาวะความร้อนสูง แรงตึงผิว ความหนืด ความหนาแน่น และความดันไอ ดังแสดงภาพที่ 2.12 เทคนิคดังกล่าวนี้มีข้อดีหลายประการคือ (1) ให้โครงสร้างนาโนแบบ free standing (2) เป็นวิธีที่ปลอดภัยสำหรับเกิดการเตรียมฟิล์มบนพื้นผิวที่ยึดหยุ่นได้ เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลสามารถสร้างผลึกและทำให้วัสดุมีความบริสุทธิ์โดยการปรับอุณหภูมิเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดคือ (1) เป็นเทคนิคที่ใช้เวลาและพลังงานมาก (2) ไม่สามารถสังเกตกลไกการสร้างฟิล์มได้

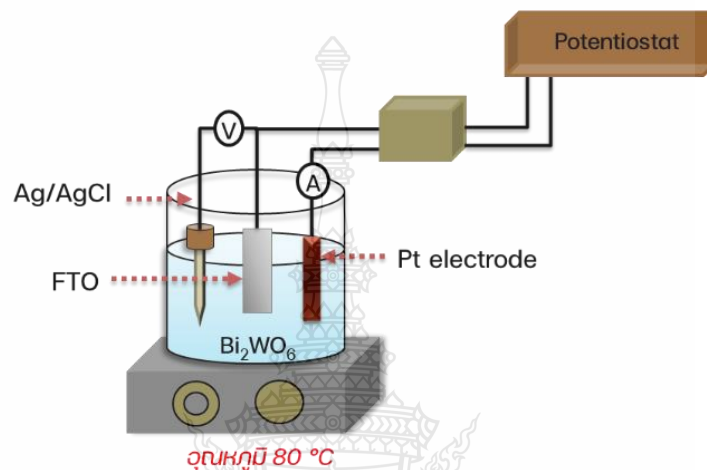


ภาพที่ 2.12 การเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Technique) [12]

2.5.4 เทคนิคการเตรียมฟิล์มทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition Technique)

การเคลือบพื้นผิวด้วยเทคนิคการเตรียมฟิล์มทางเคมีไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบางบนขั้วไฟฟ้าโครงสร้างนาโน จากโหมดศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆคือ โปเทนชิโอสแตติก (potentiostatic) กัลวานอสแตติก (galvanostatic) และพัลส์โพเทนเชียล (pulsed potential) [13, 14] โครงสร้างและคุณสมบัติอื่นๆ ของวัสดุฟิล์มบางที่จะถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ การปรับค่า ของการสร้างฟิล์ม เช่น เวลาที่ใช้ในการสแกนและค่ากระแส ค่าศักย์ไฟฟ้า

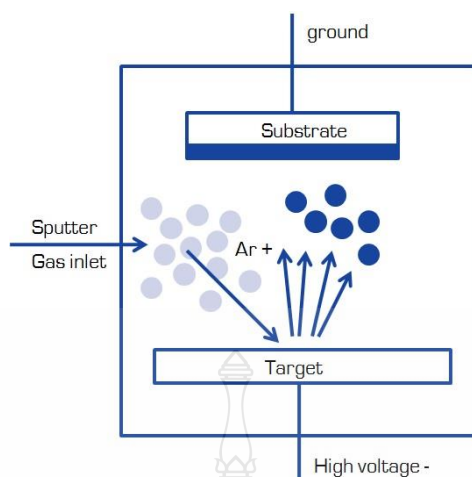
ค่า pH และองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงภาพที่ 2.13 เทคนิคดังกล่าวมีข้อดี เช่น (1) มีการยึดเกาะที่ดีของสารกึ่งตัวนำกับพื้นผิวหน้าวัสดุ (2) วิธีนี้มีการพอกพูนของสารบริเวณที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและควบคุมองค์ประกอบได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดของการใช้สารละลายที่สังเคราะห์สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว เป็นวิธีการที่สิ้นเปลือง และไม่สามารถเตรียมชิ้นขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก



ภาพที่ 2.13 การเตรียมฟิล์มบางทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition Technique)

2.5.5 เทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering Technique)

การเคลือบแบบฟิล์มบางโดยกระบวนการสปัตเตอร์ริง วัสดุที่จะถูกเคลือบทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Substrate) ดังแสดงภาพที่ 2.14 โดยก๊าซเฉื่อยจะถูกป้อนเข้ามาบริเวณผิวหน้าของสารตั้งต้น ส่งผลให้อนุภาคพุ่งออกมาหลังจากการกระตุ้นถูกตรึงบนสารตั้งต้นซึ่งอยู่หน้าแคโทดในห้องสุญญากาศ และไอออนประจุบวกที่มีพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นให้ไปเกาะที่เป้าหมายหรือวัสดุแคโทด การสปัตเตอร์สามารถแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ ปฏิกิริยาสปัตเตอร์ การสปัตเตอร์ลำแสงไอออน ซึ่งเทคนิคนี้มีข้อดีคือสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้อย่างแม่นยำ ได้ลักษณะฟิล์มที่เรียบเนียน สม่ำเสมอและปรับแต่งสมบัติของฟิล์มได้อย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากต้องควบคุมการเตรียมในสภาวะที่มีสุญญากาศและเครื่องมือมีราคาแพง



ภาพที่ 2.14 การเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering Technique)

ที่มา : <https://www.thfc.de>

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกได้รับความสนใจนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมกันอย่างแพร่หลาย [15-20] เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง กระบวนการไม่ยุ่งยาก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้ต้นทุนต่ำ การพัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกทำได้หลากหลายวิธี [21] เช่น การเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมที่มีค่าแถบพลังงานแคบ เพื่อให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็น ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดในแสงธรรมชาติ และมีค่าแถบวาเลนซ์ที่มีศักย์ไฟฟ้าด้านบวกมากๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าสารกึ่งตัวนำบิสมาทวานาเดต (BiVO_4) [22, 23] และ ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) [24-26] ได้รับความสนใจพัฒนากันอย่างมาก ด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งสองตัวมีคุณสมบัติต่างๆ ตรงกับที่ต้องการของสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาพัฒนาเป็นเซลล์ไฟฟ้าแอโนดดังกล่าวมาข้างต้นได้เป็นอย่างดี [14, 27, 28] แต่อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานกว้างบางตัวก็ยังเป็นที่น่าสนใจพัฒนาเนื่องจากมีค่าแถบวาเลนซ์ไปด้านบวกมากทำให้มีศักยภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี เช่น บิสมาททังสเตท (Bi_2WO_6) [29-31] และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [32-34] นอกจากการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมแล้ว การพัฒนากระบวนการตรึงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำลงบนวัสดุรองรับ ก็เป็นอีกหัวข้อที่ได้รับความสนใจพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของของเซลล์ไฟฟ้าในเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ดีต้องสามารถควบคุมคุณภาพของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี มีขั้นตอนการเตรียมไม่

ยุ่งยาก ใช้สารเคมีไม่มากและไม่อันตราย ที่สำคัญคือต้องมีความเสถียรของฟิล์มบางที่ได้และต้องเป็นเทคนิคที่สามารถขยายขนาดสเกลได้ดีเพื่อการประยุกต์ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ในการใช้งานจริงได้ ซึ่งมีหลากหลายเทคนิคที่นักวิจัยนิยมพัฒนาเพื่อเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เช่น เทคนิคการสเปรย์เคลือบ (spray coating) [2, 35, 36] และเทคนิคสปีดเทอริง [22, 24, 26, 34] ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี แต่อาจจะมีขั้นตอนที่ค่อนข้างหลายขั้นตอน และใช้สารเคมี และเครื่องมือที่มีราคาแพง เทคนิคสปินโคตติง (Spin coating) [20, 21, 37] เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นักวิจัยนิยมพัฒนาเพื่อเตรียมฟิล์มบางที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมความหนาของฟิล์มที่มีความเฉพาะเจาะจงและความคงทนการยึดเกาะของฟิล์มบาง ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคด้านเคมีไฟฟ้าเพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว มีกระบวนการเตรียมฟิล์มที่ง่าย มีความแม่นยำและประสิทธิภาพของฟิล์มคงทน และเทคนิคจุ่มเคลือบ (Dip coating) [10, 26, 27, 38] เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ได้รับความสนใจพัฒนาเนื่องจากมีความง่ายและสะดวกในการเตรียมฟิล์ม ดังนั้นการผสมผสานเทคนิคที่มีกระบวนการไม่ยุ่งยากได้ฟิล์มที่มีความคงทน มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยา และสามารถขยายสเกลได้ง่าย จึงเหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำรองรับการพัฒนาต่อยอดกับการออกแบบระบบที่มีขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี โดยการพัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ยังมีอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบคือการออกแบบเซลล์ต้นแบบ (Reactor prototype design) ทั้งการวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าแอโนด แคโทด ตำแหน่งหลอดไฟ การควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้า และการควบคุมระบบไหลเวียนของสารผ่านผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบระบบดังกล่าวเพื่อการประยุกต์ใช้ที่หลากหลาย เช่น การออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสีย้อม [7, 39-41] การกำจัดน้ำมันปนเปื้อนในน้ำ [42-44] การกำจัดเชื้อโรคปนเปื้อนในน้ำเสีย [34, 45, 46] การฟอกอากาศด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก [47, 48] หรือการกำจัดสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำต่างๆ [49-51] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีหัวข้อที่มีการประยุกต์ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนในอากาศ และส่วนใหญ่ยังเป็นการศึกษาวิจัยและออกแบบในระดับสเกลที่ไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด และสามารถขยายขนาดสเกลได้ดี และได้พัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงสำหรับการประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อโรคในอากาศ และเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศสำหรับห้องที่เป็นระบบปิด และเพื่อสามารถศึกษาต่อยอดการผลิตเครื่องฟอกอากาศจำหน่ายเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 3

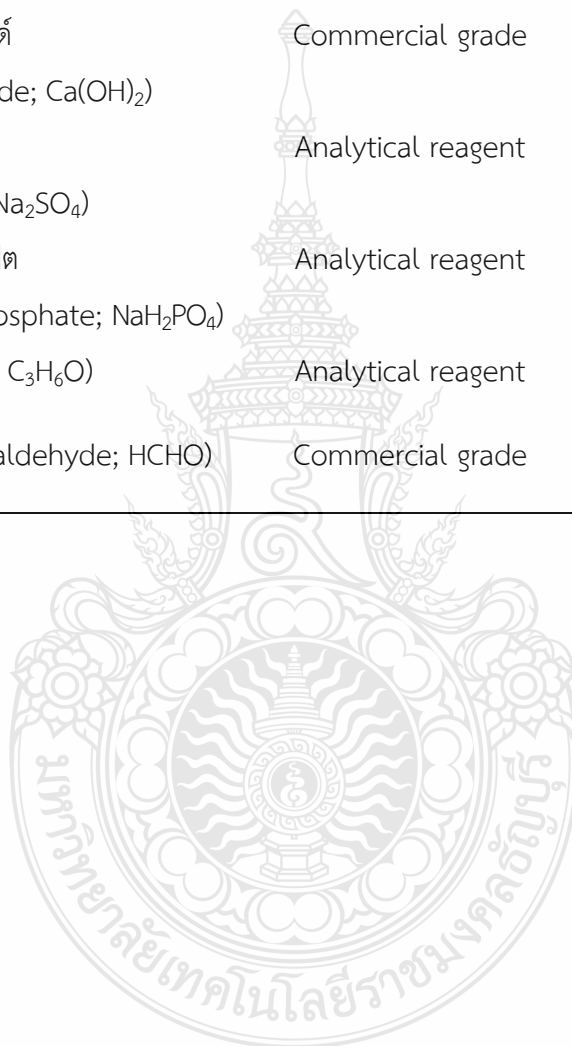
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1. สารเคมี

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)	Analytical reagent	Univar
2. เอทานอล (Ethanol; CH ₂ CH ₃ OH)	Analytical reagent	ACL Lab scan
3. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)	Analytical reagent	Univar
4. กรดทังสติก (Tungstic acid; H ₂ WO ₄)	Analytical reagent	Sigma-aldrich
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH ₄ OH)	Analytical reagent	ACL Lab scan
6. บิสมัท-(III) ไนเตรท เพนตะไฮเดรต (Bismuth (III) nitrate pentahydrate; Bi(NO ₃) ₃ • 5H ₂ O)	Analytical reagent	Sigma-Aldrich
7. วานาเดียม (IV) ออกไซด์ อะซีติลอะซิโตน (Vanadium (IV) oxide acetylacetonate ; C ₁₀ H ₁₄ O ₅ V)	Analytical reagent	Merck
8. กรดอะซิติก (Acetic acid; CH ₃ COOH)	Analytical reagent	RCI Lab scan
9. เมทิลีนบลู (Methylene Blue)	Analytical reagent	Unilab

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
10. ไฮดรอกซีเอทิล เซลลูโลส (Hydroxyethyl Cellulose; HEC)	-	-
11. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide; KOH)	Analytical reagent	Univar
12. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; Ca(OH) ₂)	Commercial grade	-
13. โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate; Na ₂ SO ₄)	Analytical reagent	KEMAUS
14. โมโนโซเดียม ฟอสเฟต (Monosodium Phosphate; NaH ₂ PO ₄)	Analytical reagent	Univar
15. อะซิโตน (Acetone ; C ₃ H ₆ O)	Analytical reagent	ACL Lab scan
16. ฟอर्मัลดีไฮด์ (Formaldehyde; HCHO)	Commercial grade	-



3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือ/อุปกรณ์	เกรด	ยี่ห้อ
1. กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped Tin Oxide : FTO)	-	Bangkok Solar Co., Ltd. Thailand.
2. สายไฟ (Copper wire)	-	-
3. อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)	DURO 20	Pettex, Thailand
4. เตาเผา (Furnace)	-	Wisd, China
5. ตู้ดูดควัน (Hood)	-	VATIGUL, Thailand
6. เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)	MSH-20A	Wisd, China
7. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)	WUC-A02H	Wisd, China
8. เครื่องวัดประมาณค่าทางไฟฟ้า (Multimeter)	PM3	Sanwa
9. หัวแร้งบัดกรี	Model CT-30B	SOLDERING IRON
10. เครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (Potentiostat Meter)	Polarization unit PS 07	-
11. เครื่องจ่ายไฟดีซี (DC power supply)	NPS306W	WANPTEK
12. เครื่องตรวจวัดแก๊สออกซิเจน (Oxygen sensor)	-	SMART Sensor
13. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)	Ag/AgCl	-
14. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode)	Pt	-
15. ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล (Stainless steel)	-	-
16. เครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ (Air quality sensor)	-	SMART Sensor

17. เครื่องวัดยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)	UV-1601	SHIMADZU, Japan
สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
18. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (Scanning Electron Microscope)	JSM6510	JEOL
19. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction Analysis)	RINT 200HT	Rigaku

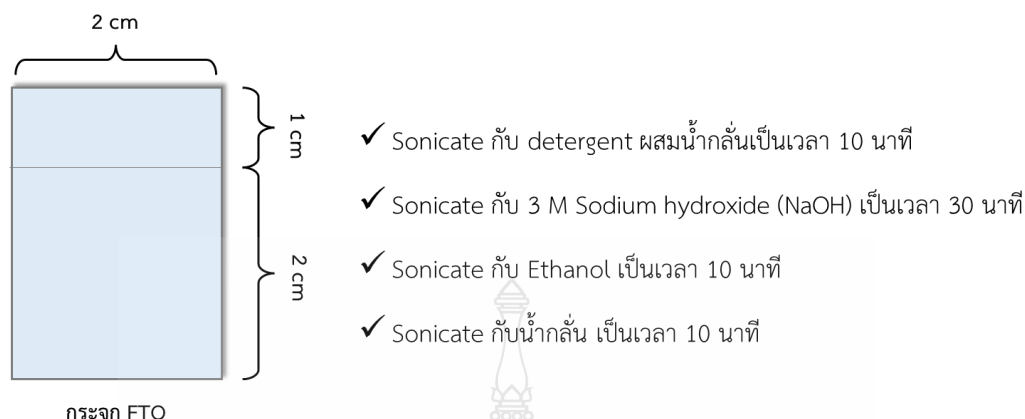
3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแอโนด

การฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนจะต้องใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยงานวิจัยนี้เราสนใจพัฒนาสารกึ่งตัวนำบิสเมททังสเตท (Bismuth tungstate; Bi_2WO_6) เพื่อตรึงลงบนกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped Tin Oxide; FTO) ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำทังสเตนออกไซด์และบิสเมทวานาเดต ($\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$) บนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1.1. การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped Tin Oxide; FTO)

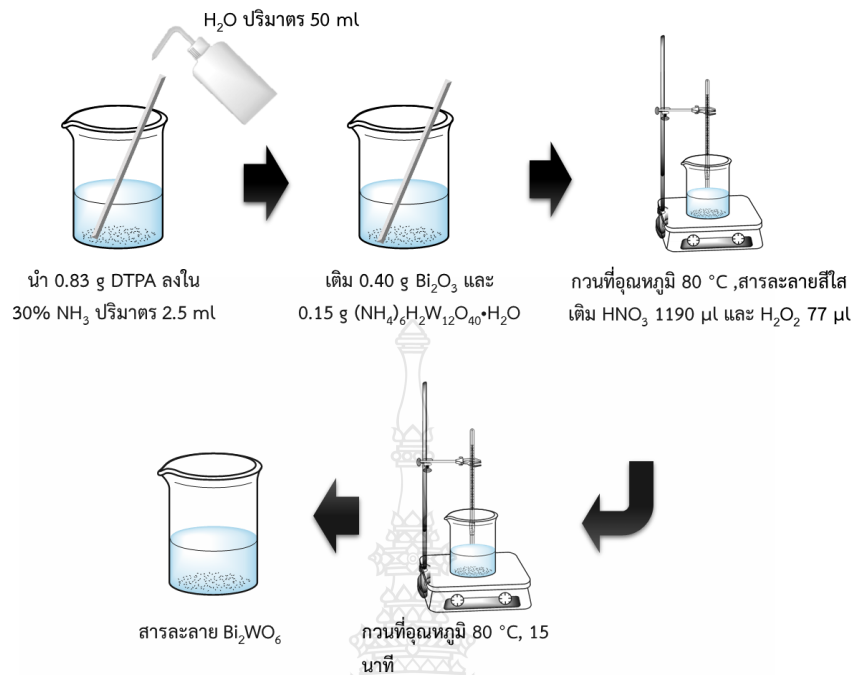
การเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรึงสารกึ่งตัวนำบิสเมททังสเตท (Bismuth tungstate; Bi_2WO_6) เพื่อตรึงลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำทังสเตนออกไซด์และบิสเมทวานาเดต ($\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$) จะต้องทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า FTO โดยนำกระจกนำไฟฟ้าที่มีขนาด ความกว้าง x ยาว เท่ากับ 2×3 เซนติเมตร ตามขั้นตอนต่อไปนี้ (1) Sonicate กับ detergent ผสมน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที (2) Sonicate กับ 3 M Sodium hydroxide (NaOH) เป็นเวลา 30 นาที (3) Sonicate กับ Ethanol เป็นเวลา 10 นาที (4) Sonicate กับน้ำกลั่น เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นตั้งไว้ให้แห้ง แล้วนำกระจกไฟฟ้า FTO ที่ทำความสะอาดแล้วมาวัดค่าการนำไฟฟ้า (กระจก FTO ที่ใช้นำไฟฟ้าด้านเดียว) จากนั้นแบ่งพื้นที่การทำงานของกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้านที่นำไฟฟ้าให้มีขนาด กว้าง x ยาว เท่ากับ 2×3 เซนติเมตร ดังแสดงขั้นตอนการเตรียมในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า FTO

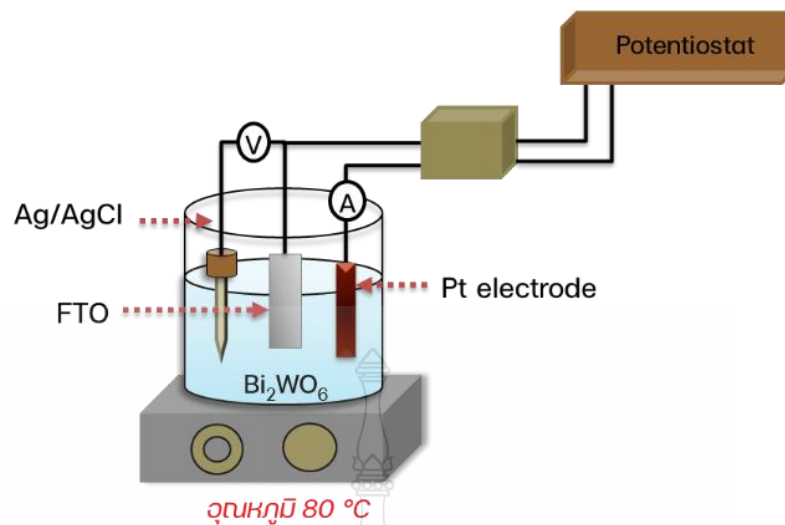
3.2.1.2. การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 ด้วยวิธีการตรึงขั้วไฟฟ้าเทคนิค Cyclic voltammetry deposition

การเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนดสารกึ่งตัวนำบิสมาททั้งสเทลงบนกระจกนำ FTO ด้วยวิธีการตรึงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry Deposition) โดยมีการเตรียมสารละลายตั้งต้น (precursor solution) Bi_2WO_6 ขึ้นแรกผสม Diethylenetriamine penta acetic acid (DTPA) 0.83 กรัม ละลายในสารละลาย 30% Ammonia (NH_4OH) ปริมาตร 2.5 ml และเติมน้ำกลั่นลงไป 50 ml คนให้สารละลายเข้ากัน จากนั้นเติม Bismuth(III) oxide (Bi_2O_3) 0.4 กรัม และ Ammonium meta tungstate hydrate ($(\text{NH}_4)_6\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 0.15 กรัม หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสพร้อมคนสารละลายตลอดเวลาจนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติม Nitric acid (HNO_3) 1,190 μl และ Hydrogen peroxide (H_2O_2) 77 μl คนต่อใหม่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงขั้นตอนการเตรียมในภาพที่ 3.2 หลังจากนั้นจึงนำไปใช้ในการตรึงฟิล์ม Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry deposition



ภาพที่ 3.2 การเตรียมสารละลายตั้งต้นบิส้มทังสเตท (Bi₂WO₆) สำหรับการตรึงชีวไฟฟ้าเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition

นำกระจก FTO ที่ทำความสะอาดและแห้งสนิทแล้วใช้เป็นชีวไฟฟ้าทำงาน (Working electrode; WE) ชั่วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode; CE) เป็น Pt Electrode และ ชั่วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode; RE) เป็น Ag/AgCl โดยจุ่มชีวไฟฟ้าทั้งสามลงในสารละลายตั้งต้น Bi₂WO₆ เพื่อเข้าสู่กระบวนการตรึงด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition โดยควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง 0.8 โวลต์ และอัตราการสแกน (scan rate) เท่ากับ 50 mV/s จำนวน 30 รอบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งไว้จนชีวไฟฟ้าให้เย็นลง จากนั้นต่อสายไฟและปิดทับด้วย Epoxy resin และรอให้แห้งจะได้ชีวไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ดังแสดงขั้นตอนการเตรียมในภาพที่ 3.3 โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผา (Calcination temperature) เป็นปัจจัยหลักหลังการตรึงชีวไฟฟ้า



ภาพที่ 3.3 การตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition

3.2.1.3. การเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic Dip coating)

- การเตรียมสารละลายตั้งต้น WO_3 และ BiVO_4

เตรียมสารละลาย 0.1 M WO_3 จากกรดทังสติก (H_2WO_4) 1.2493 กรัม ละลายในสารละลาย 30% Ammonium hydroxide (NH_4OH) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายไป Reflux ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลาย 0.1 M WO_3 โดยควบคุมปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยการ เติม 30% NH_4OH ตลอดเวลาขณะกระบวนการ Reflux

เตรียมสารละลาย 0.05 M BiVO_4 จากการเตรียมสารละลาย 0.1 M $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.2127 กรัม ใน Acetic acid 25 มิลลิลิตร ละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันและเตรียมสารละลาย 0.1 M $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_5\text{V}$ 0.6622 กรัม ในสารละลาย Acetyl acetone 25 มิลลิลิตร จนได้สารละลายสีเขียว จากนั้นนำสารละลายทั้งสองมาผสมกันจะได้สารละลาย 0.05 M BiVO_4

- การเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

นำสารละลาย WO₃ เติมลงในบีกเกอร์จากนั้นใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติจุ่ม FTO ลงในสารละลาย โดยสารละลาย WO₃ จะเกาะติดเป็นฟิล์มบางที่ผิวหน้าของกระจก FTO จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำชั้นไฟฟ้าไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃

นำชั้นไฟฟ้าที่เตรียม WO₃ ไปจุ่มในสารละลายสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ จากนั้นนำไปอบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

3.2.2 การศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic properties) ของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆

ศึกษาคุณลักษณะของชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ โดยจะใช้เทคนิคหรือเครื่องมือที่เหมาะสมในการตรวจสอบวัด ดังนี้

คุณลักษณะ	เทคนิคหรือเครื่องมือ
ศึกษาสมบัติทางแสง	UV-Vis Spectrophotometer
ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำ	Potentiostat (Amperometry)
ศึกษาความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าในการส่งผ่านอิเล็กตรอน	Potentiostat (EIS)
ศึกษาสมบัติสัณฐานวิทยา 2 มิติ	Scanning Electron Microscope (SEM)
ศึกษาโครงสร้างผลึก	X-ray Diffractometer (XRD)

3.2.3 การศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

3.2.3.1. การศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของชั้นไฟฟ้า

การพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้าแอโนด FTO/Bi₂WO₆ ให้มีประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และช่วยเร่งการส่งผ่านประจุไปยังชั้นไฟฟ้าแคโทด ซึ่งทดสอบสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกโดยการติดตามค่ากระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำด้วยเครื่อง Potentiostat โหมด Amperometry ภายใต้สภาวะให้แสงและไม่ให้แสงสลับกัน เป็นเวลา 90 วินาที

3.2.3.2. การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

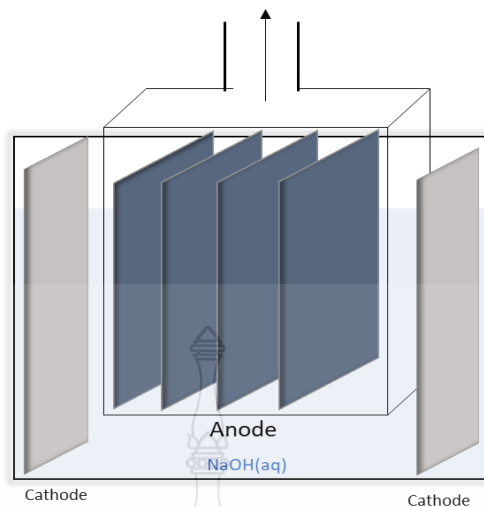
การพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด $\text{FTO/Bi}_2\text{WO}_6$ ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์รวมในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Total plate count) เป็นตัวแทนของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งต้องเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อได้แก่ Nutrient broth 0.8 g ละลายในน้ำกลั่น 100 mL จากนั้นนำเข้า Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 bar เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นลုပ်เชื้อตัวอย่างน้ำมาผสมแล้วทำการเขย่าด้วยเครื่อง shaker ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ถึง 24 ชั่วโมง จากนั้นจะได้เชื้อพร้อมการกำจัดและทำการติดตามผลการกำจัดเชื้อโดยการ Sampling สารหลังผ่านกระบวนการกำจัดปริมาตร 1 mL ทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นหยดลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำมานับจำนวนของเชื้อบนจานเพาะเชื้อ

3.2.3.3. การศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของขั้วไฟฟ้า $\text{FTO/Bi}_2\text{WO}_6$ และขั้วไฟฟ้า $\text{FTO/WO}_3/\text{BiVO}_4$

การศึกษาการใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้น $\text{FTO/Bi}_2\text{WO}_6$ เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า $\text{FTO/WO}_3/\text{BiVO}_4$ โดยศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม ภายใต้สภาวะเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง โดยติดตามค่าการลดลงของสารอินทรีย์สีย้อมต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในระบบด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้า

3.2.4 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเซลล์ต้นแบบโดยการออกแบบระบบ การวางขั้วไฟฟ้า การจัดตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาสำหรับระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก (Electrocatalytic; EC) โดยจะติดตามการเพิ่มขึ้นของออกซิเจน ด้วยเครื่องตรวจวัดแก๊สออกซิเจน (Oxygen sensor) ดังภาพที่ 3.4 แสดงการจัดอุปกรณ์สำหรับการศึกษาและพัฒนาเซลล์ไฟฟ้าสำหรับการเพิ่มปริมาณแก๊สออกซิเจน โดยได้ศึกษาพารามิเตอร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้



ภาพที่ 3.4 เซลล์ต้นแบบอิเล็กโทรไลต์ (EC cell) สำหรับระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจน

3.2.4.1 การศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อได้เซลล์ต้นแบบที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ดีที่สุด ได้นำมาศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีผลอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยา รวมถึงการเพิ่มปริมาณออกซิเจน โดยเลือกศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 M ของสารละลาย NaOH, Na_2SO_4 , NaCl, NaH_2PO_4 , KOH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปริมาตรเท่ากับ 1,250 ml ในระยะเวลา 35 นาที

3.2.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยได้ศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.3 และ 1.5 M แล้วติดตามประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาด้วยการวัดปริมาณ O_2 ที่เกิดขึ้น

3.2.4.3 การศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้า

การเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเซลล์เคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยา และส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง 3.0 ถึง 7.0 โวลต์ โดยควบคุมให้ปริมาณสารละลายอิเล็กโทรไลต์และจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เท่ากัน

3.2.4.4 การศึกษาผลชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด

ขั้วไฟฟ้าแคโทดทำหน้าที่ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดซึ่งเป็นที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำให้กลายเป็นออกซิเจน ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตปริมาณออกซิเจนของระบบได้เป็นอย่างดี โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เป็นทองแดง สแตนเลสสตีล สังกะสี ทองเหลืองและกระจกนำไฟฟ้า FTO เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา รวมถึงความคงทนต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์และระยะเวลาการใช้งานที่ดีที่สุด

3.2.4.5 การศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด

การศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าแอโนดในระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก (Electrocatalytic; EC) ได้ศึกษาขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ กระจกนำไฟฟ้า FTO ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล ภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวและศึกษาระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล ภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าและแสงเพื่อเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาในการแยกน้ำให้กลายเป็นออกซิเจน

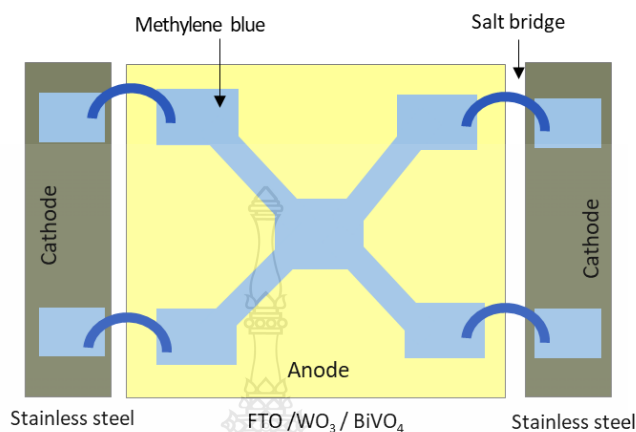
3.2.4.6 การศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด

ศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าต่อการเพิ่มปริมาณออกซิเจน โดยการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่ใช้ในระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยได้ศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนด 1 ถึง 6 ขั้ว และศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทด 1 ถึง 4 ขั้ว เพื่อศึกษาอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ

3.2.5 การศึกษาและพัฒนาเซลล์เคมีไฟฟ้าต้นแบบกับการกำจัดสารอินทรีย์สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบฟอกอากาศ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบฟอกอากาศ โดยได้ศึกษาเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล (Stainless steel) ภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าและแสงไปในระบบเซลล์ต้นแบบและเลือกใช้สารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) เป็นตัวแทนสารอินทรีย์สำหรับติดตามประสิทธิภาพการทำงานของฟิล์มบางด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยหยดสารละลายสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 ppm ลงบนขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ปริมาตร 2,500 μl . และ

หยดสารละลายบนขั้วไฟฟ้าแคโทดทั้ง 4 จุด ปริมาตร 150 μL . นำสะพานเกลือที่เตรียมไว้ทั้ง 4 ด้าน วางลงบนสารละลายโดยให้ปลายเปิดของสะพานเกลือทั้งสองด้านสัมผัสกับสารละลายดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การศึกษาการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำกับการกำจัดสารอินทรีย์สำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศ ด้วยเซลล์ต้นแบบโพโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

- การเตรียมสะพานเกลือ (Salt bridge)

เตรียมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (Sodium chloride; NaCl) และเติม 2% ของไฮดรอกซีเอทิล เซลลูโลส (Hydroxyethyl Cellulose; HEC) ลงไปในสารละลายขณะร้อน คนให้ละลายจนเนื้อสารค่อนข้างหนืด นำท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ความยาว 3 เซนติเมตร จำนวน 4 เส้น นำสารละลายที่เตรียมไว้บรรจุลงสายยางให้พอดี

การติดตามประสิทธิภาพการกำจัด โดยตัดกระดาษกรองขนาด 1x1 เซนติเมตร ปิเปตสารละลายตัวอย่างบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ปริมาตร 30 μL . หยดลงบนกระดาษที่เตรียมไว้ รอให้แห้งนำไปวัดค่าความเข้มของแสงและตรวจวัดค่าสีด้วยโปรแกรม Color Picker ซึ่งจะเก็บสารละลายทุกๆ 5 นาที จนครบเวลา 20 นาที เพื่อศึกษาการลดลงของสีของเมทิลีนบลู โดยจะศึกษาพารามิเตอร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.5.1 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีของเมทิลีนบลู

ศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์สีของเมทิลีนบลู ภายใต้สภาวะเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ การเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าด้วยแสง (Photocatalytic; PC) การเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic; EC) การเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่

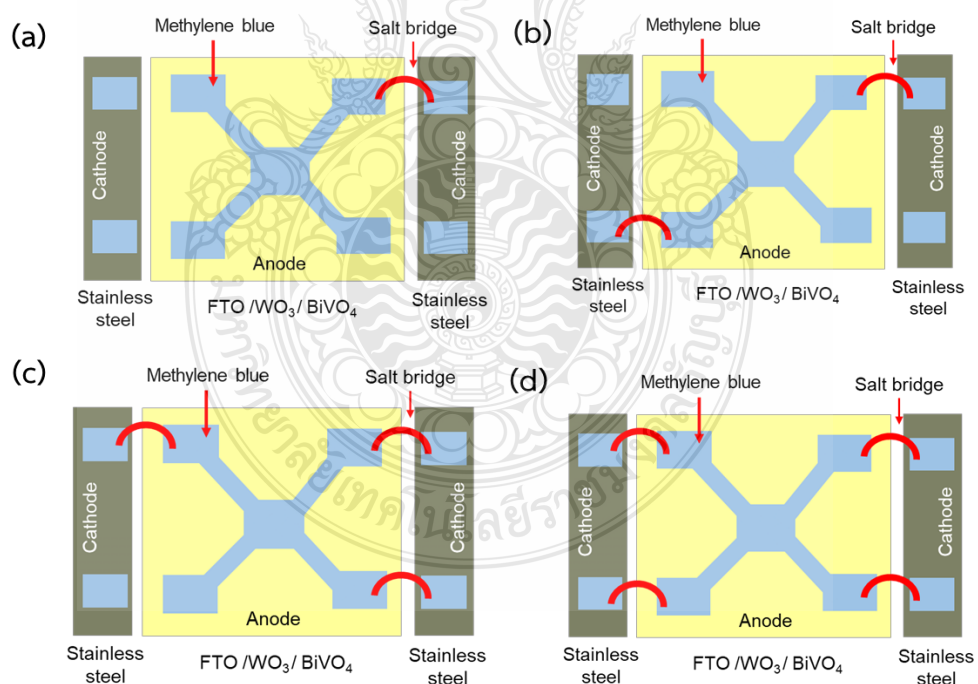
ชีวไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง (Photoelectrocatalytic; PEC) สภาวะที่มีแสงอย่างเดียว (Light) และสภาวะที่ไม่มีแสง (Dark)

3.2.5.2 การศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้า

ได้ศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1 ถึง 5 โวลต์ ภายในระยะเวลา 20 นาที แล้วติดตามการลดลงของสารอินทรีย์

3.2.5.3 การศึกษาดำเนินและจำนวนของสะพานเกลือ

การประยุกต์ใช้ชีวไฟฟ้าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำกับระบบฟอกอากาศ เนื่องจากเป็นสภาวะที่ชีวไฟฟ้าไม่ได้อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สะพานเกลือจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการไหลเวียนของอิเล็กตรอนจากชีวไฟฟ้าแอโนดไปยังแคโทดจนครบวงจร และทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดได้ดี ศึกษาการวางตำแหน่งและจำนวนของสะพานเกลือดังรูป 3.6 รูปแบบ (a) ถึง (d) แล้วติดตามประสิทธิภาพการลดลงของสารอินทรีย์



ภาพที่ 3.6 รูปแบบการจัดวางตำแหน่งและจำนวนของสะพานเกลือของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์

3.2.5.4 การศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของแคโทด

การกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู ศึกษาการขยายขนาดของพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด โดยใช้ขนาด 1 cm^2 , 4 cm^2 , 9 cm^2 , และ 16 cm^2 แล้วติดตามประสิทธิภาพการลดลงของสารอินทรีย์

3.2.5.5 การศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือ

การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือเพื่อดูประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยศึกษาที่ขนาดเล็กที่สุดคือ 3 mm , 4 mm และ 5 mm แล้วติดตามประสิทธิภาพการลดลงของสารอินทรีย์

3.2.5.6 การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด

การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ใช้ในการทดลอง โดยศึกษาขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Al) สังกะสี (Zn) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) สแตนเลสสตีล (SS) และทองแดง (Cu) เนื่องจากคงทนต่อการใช้งานและประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อการทำงานของระบบ

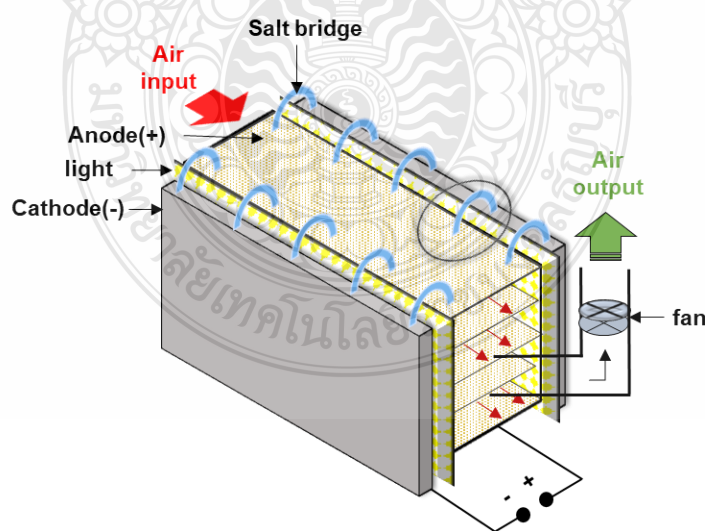
3.2.5.7 การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

การเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์รวม โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์รวมในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Total plate count) เป็นตัวแทนของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาหารเลี้ยงเชื้อได้แก่ Nutrient broth 0.8 g ละลายในน้ำกลั่น 100 mL จากนั้นนำเข้า Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 bar เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นลုပ်เชื้อตัวอย่างนำมาผสมแล้วทำการเขย่าด้วยเครื่อง shaker ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ถึง 24 ชม. จากนั้นจะได้เชื้อพร้อมการกำจัดและทำการทดสอบการกำจัดเชื้อโดยการ Sampling สารตัวอย่างปริมาตร $500\text{ }\mu\text{L}$ หลังกระบวนการกำจัดที่ระยะเวลา 15 นาที หลังจากนั้นหยดลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำมานับจำนวนของเชื้อบนจานเพาะเชื้อ

3.2.6 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจน

3.2.6.1 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศแบบที่ 1

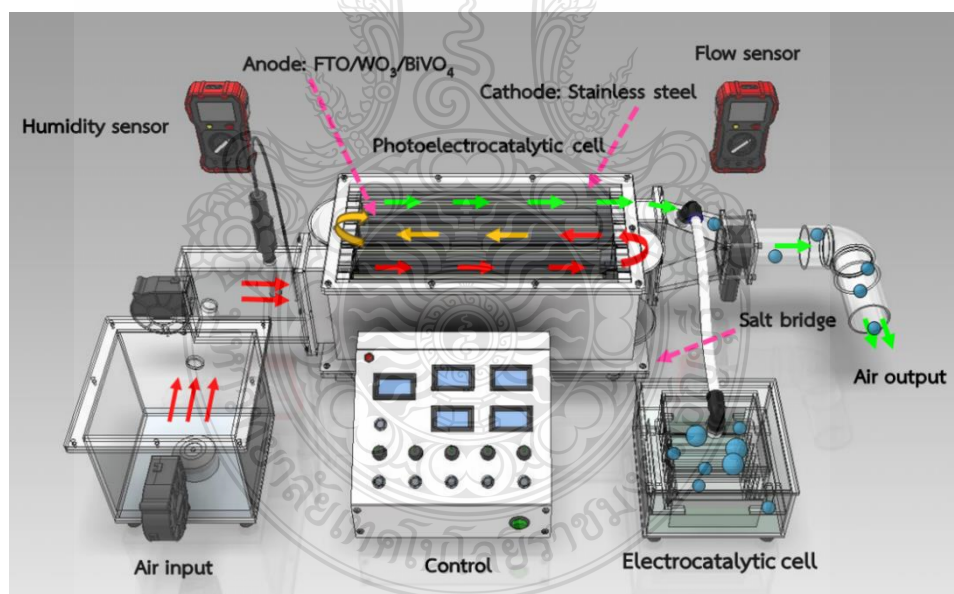
ได้ออกแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) เพื่อใช้เป็นชุดต้นแบบขนาดเล็กสำหรับการฟอกอากาศเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในอากาศ ซึ่งการทำงานของระบบฟอกอากาศ โดยอากาศเสียจะไหลเข้าทาง Air input จะถูกควบคุมความเร็วลมที่เหมาะสมทางปลายทางออก อากาศไหลเข้าสู่เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีการจัดวางขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 วางขนานในแนวระนาบทั้งหมด 4 ชั้น เพื่อให้เกิดการไหลเวียนและการสัมผัสของอากาศที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด และขั้วแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล (Stainless steel) จำนวน 2 ขั้ว จัดวางอยู่ด้านนอกของระบบ โดยใช้เจลสะพานเกลือเชื่อมต่ออยู่ด้านบนสุดของระบบเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ภายใต้การทำงานด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง แสดงดังภาพที่ 3.7 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของระบบฟอกอากาศจะใช้น้ำสารละลาย อะซิโตน (Acetone; $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ระเหยง่ายสำหรับการกำจัดในระบบฟอกอากาศ และติดตามประสิทธิภาพการลดลงของสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยการแทนที่ในสารละลายน้ำและนำไปวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยได้ศึกษาที่สภาวะเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ ภายใต้การเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยแสง (Photocatalytic; PC) ภายใต้การเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic; EC) ภายใต้การเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง (Photoelectrocatalytic; PEC)



ภาพที่ 3.7 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศแบบที่ 1 (PEC cell model 1)

3.2.6.2 การศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้ในระบบฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนแบบที่ 2

ได้ออกแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) ในรูปแบบที่ 2 เพื่อใช้เป็นชุดต้นแบบขนาดเล็กสำหรับการฟอกอากาศเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในอากาศ ซึ่งการทำงานของระบบฟอกอากาศ โดยอากาศเสียจะไหลเข้าทาง Air input จะถูกควบคุมความเร็วลม ความชื้นที่เหมาะสม เมื่ออากาศไหลเข้าสู่เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีการจัดวางขั้วไฟฟ้าแอโนดที่มีจำนวนมากขึ้นจากแบบที่ 1 เป็นขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ จำนวนทั้งหมด 6 ขั้ว โดยแบ่งเป็น 3 คู่ เพื่อให้เกิดการไหลเวียนและการสัมผัสของอากาศที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด และขั้วแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล (Stainless steel) จำนวน 2 ขั้ว จัดวางอยู่ทางด้านข้างของระบบ โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเป็นสะพานเกลืออยู่ด้านล่างสุดของระบบเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ภายใต้การทำงานด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง แสดงดังภาพที่ 3.8 ควบคุมการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้า



ภาพที่ 3.8 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ (PEC cell) และเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจน (EC cell model 2) แบบที่ 2

3.2.6.3 ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์ต้นแบบที่ 2

การศึกษาระบบฟอกอากาศจะใช้สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde; HCHO) เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ระเหยง่ายสำหรับการกำจัดในระบบฟอกอากาศ และติดตามประสิทธิภาพการลดลงของสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ (Air quality sensor) ซึ่งมี LOD < 0.003 mg/m³ โดยได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารระเหยอินทรีย์

ศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ฟอร์มัลดีไฮด์ ที่สภาวะเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ ภายใต้การเร่งด้วยแสง (Photocatalytic; PC) ภายใต้การเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic; EC) ภายใต้การเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง (Photoelectrocatalytic; PEC)

2) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์

ศึกษาความเข้มข้นของสารระเหยอินทรีย์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ด้วยระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ความเข้มข้น 0.10, 0.30, และ 0.50 mg/m³ ภายในระยะเวลา 5 นาที แล้วติดตามการลดลงของสารระเหยอินทรีย์

3) การศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้า

ได้ศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วยระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2 ถึง 6 โวลต์ ภายในระยะเวลา 5 นาที แล้วติดตามการลดลงของสารระเหยอินทรีย์

3.2.6.4 ศึกษาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศด้วยเซลล์ต้นแบบที่ 2

การพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศ โดยใช้เชื้อ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) เป็นตัวแทนเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจะทดสอบประสิทธิภาพโดยการเพิ่มเชื้อลงไปในสารละลายน้ำและทำให้กลายเป็นละอองน้ำเข้าสู่เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ได้ติดตามผลการกำจัดเชื้อโดยการวางจานเพาะเชื้อลงที่ปลายทางออกของอากาศซึ่งจะมีกล่องสำหรับ Sampling ตัวอย่าง และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำมานับจำนวนของเชื้อบนจานเพาะเชื้อ

3.2.6.5 ศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างระบบฟอกอากาศและการเพิ่มออกซิเจนในเวลาเดียวกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูงแบบที่ 2

การศึกษาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูงแบบที่ 2 ดังแสดงภาพที่ 3.8 ประกอบไปด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับฟอกอากาศและเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับเพิ่มออกซิเจน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูง ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ พร้อมกับการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเวลาเดียวกัน เป็นระยะเวลา 60 นาที และติดตามผลด้วยเครื่องวัดออกซิเจนและเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

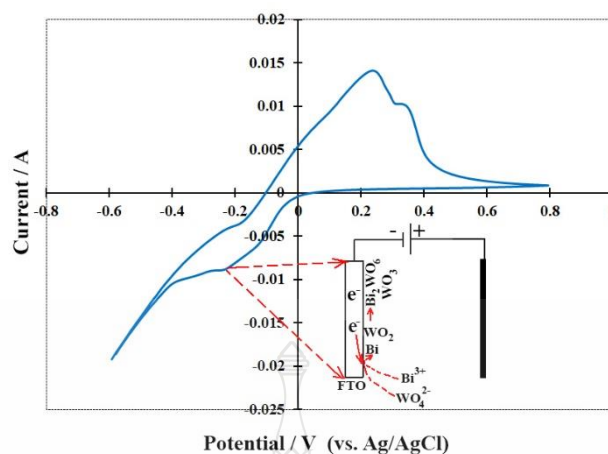
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition

4.1.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาของชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6 หลังการตรึงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition

การศึกษาศึกษาการเตรียมสารสำหรับการเตรียมฟิล์มด้วยสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition โดยเลือกสภาวะที่ได้กระแสไฟฟ้าที่สูงและเหมาะสมที่สุด ดังนี้ DTPA 0.83 g, NH_3 2.5 mL, Bi_2O_3 0.017 M, $(\text{NH}_4)_{16}\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.0010 M, H_2O_2 0.015 M และ HNO_3 0.38 M จากนั้นได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาของชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 หลังจากการตรึงฟิล์มบาง Bi_2WO_6 เพื่อให้ได้คุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสูงที่สุด โดยได้ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาคือค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.1.1.1 การศึกษาศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ของชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6

จากการศึกษาศึกษาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ดังแสดงภาพที่ 4.1 Cyclic voltammograms แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันของสารละลายสารตั้งต้น ช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ -0.8 ถึง +0.8 โวลต์ ซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาที่ศักย์ไฟฟ้าด้านบวกเป็นหลัก การให้ศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้สารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 เกิดกระบวนการตรึงฟิล์มกับพื้นผิวกระจก FTO จากการเกิดปฏิกิริยาพื้นผิวกระจก FTO ในช่วงการให้ศักย์ไฟฟ้าด้านลบไอออน Bi^{3+} และ WO_4^{2-} เกิดปฏิกิริยาเป็นฟิล์มบาง $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ ที่ยึดติดกับพื้นผิว FTO ซึ่งเกิดการรีดิวซ์ในช่วงศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.2 โวลต์ เป็นการยืนยันกระบวนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีการเกิดปฏิกิริยาแบบรีดักชัน

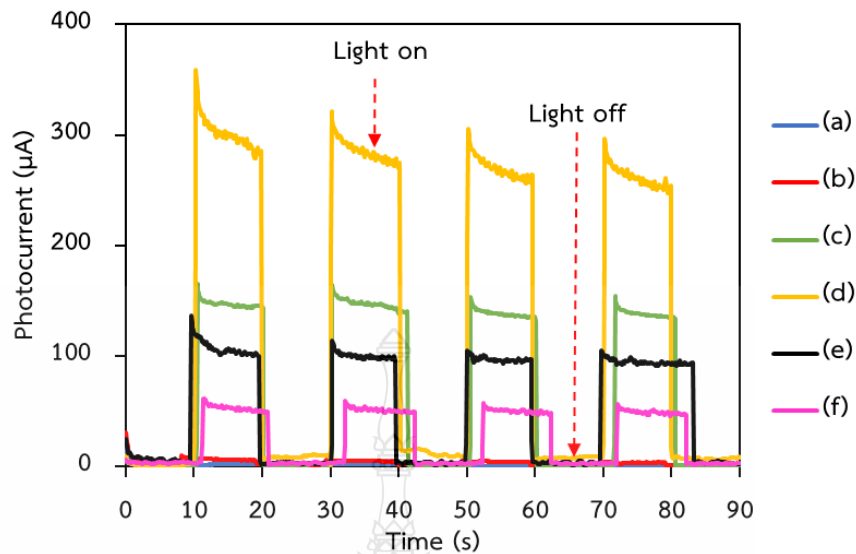


ภาพที่ 4.1 Cyclic voltammograms ของชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ที่อัตราการสแกน 50 mV/s

4.1.1.2 สมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน

สารละลายน้ำ

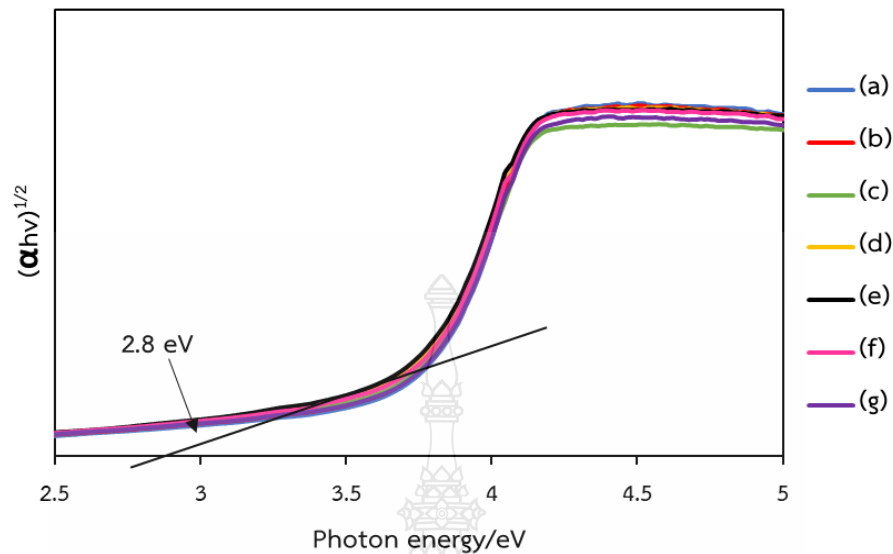
ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชีวไฟฟ้า Bi_2WO_6 ที่เตรียมได้จากการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 450°C, 500°C, และ 600°C, เปรียบเทียบกับสภาวะไม่เผาที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ดังแสดงผลในภาพที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่าการเผาชีวไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 450°C ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงมีค่ากระแสจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำสูงสุด เมื่อชีวไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการเผาและอุณหภูมิการเผาที่ 300°C จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไม่เกิดขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดมาจากพื้นผิวของชีวไฟฟ้ายังไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมหรือยังไม่มีกรวยกัดที่มากพอจึงทำให้การส่งผ่านประจุได้น้อยลง ในขณะที่การเผาอุณหภูมิ 400°C มีค่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อการเผาอุณหภูมิที่ 450°C โดยอุณหภูมิจะมีผลกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก และลักษณะสัณฐานวิทยา ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านประจุได้ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ดี และเมื่อการเผาอุณหภูมิที่ 500°C และ 600°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปอาจทำให้สารกึ่งตัวนำที่ตรึงบนชีวไฟฟ้าเกิดการหลอมติดกันมากเกินไป ส่งผลให้การจัดเรียงประจุ และค่ากระแสไฟฟาลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (a) 25°C, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 450°C, (e) 500°C, และ (f) 600°C

4.1.1.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง

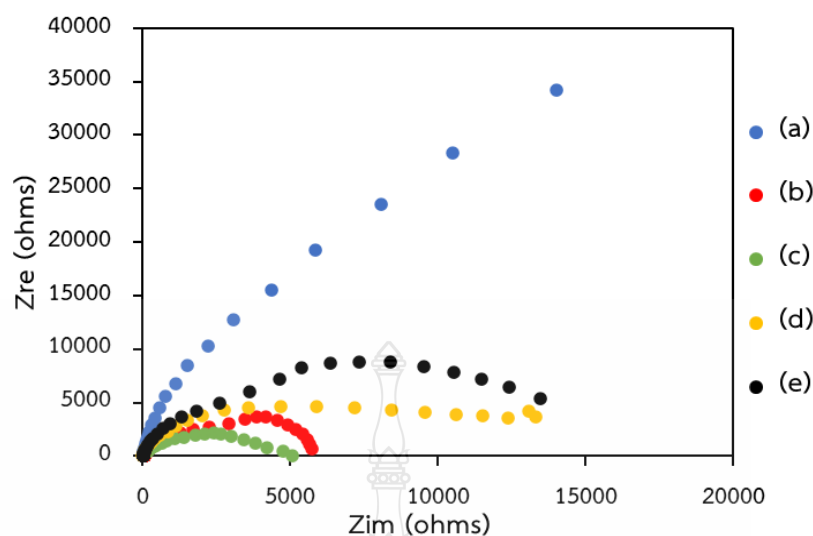
สมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า Bi₂WO₆ ที่ได้จากการตรึงฟิล์มบางด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 450°C, 500°C, และ 600°C เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ไม่เผาโดยการทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง พบว่าการดูดกลืนแสง ยังไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเส้นกราฟ (e) หรืออุณหภูมิการเผาที่ 450°C เส้นกราฟอยู่ด้านบนสุด เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นกราฟของ FTO และเมื่อคำนวณค่าแถบพลังงาน (Band gap energy; E_g) ของขั้วไฟฟ้าจากสมการ $E_g = 1,240/\lambda$ จะได้เท่ากับ 2.8 eV เป็นการยืนยันได้ว่าการตรึงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Bi₂WO₆ ลงบนกระจก FTO [52-54] และเผาที่อุณหภูมิ 450°C โดยสามารถหาค่าดังกล่าวได้จากการลากเส้นความชันของกราฟและตัดผ่านแกน X ซึ่งเป็นค่าแถบพลังงานดังภาพที่ 4.3 ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด เมื่อเทียบกับกระจก FTO และการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งจะสอดคล้องกับคุณสมบัติความเป็นโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก เนื่องจากการให้แสงสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอน (e⁻) จากแถบวาเลนซ์ (Valance band; VB) เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ (Conduction band; CB) บริเวณแถบวาเลนซ์จึงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดช่องว่าง (hole; h⁺) ที่มีประจุบวกที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดีต่อไป



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของกระจก (a) FTO และการเตรียมชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และผ่านเผาที่อุณหภูมิ (b) 25°C, (c) 300°C, (d) 400°C, (e) 450°C, (f) 500°C, และ (g) 600°C

4.1.1.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า

การศึกษาความต้านทานของชั้นไฟฟ้า Bi_2WO_6 ได้จากการตรึงฟิล์มบางด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 450°C, 500°C, และ 600°C ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) จากผลการทดลองพบว่า การเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6 การเผาที่อุณหภูมิ 450°C ภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสง ทำให้ได้ฟิล์มบางของ Bi_2WO_6 บนตัวรองรับ FTO ที่มีค่าความต้านทานการส่งผ่านประจุ (Charge transfer resistance; R_{ct}) น้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.4 โดยการสังเกตจากค่ารัศมีครึ่งวงกลมที่แคบสุดของกราฟ Nyquist แสดงถึงค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าต่ำสุด ซึ่งจะมีความสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าที่ดีที่สุด



ภาพที่ 4.4 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่ (a) 300°C, (b) 400°C, (c) 450°C, (d) 500°C, และ (e) 600°C

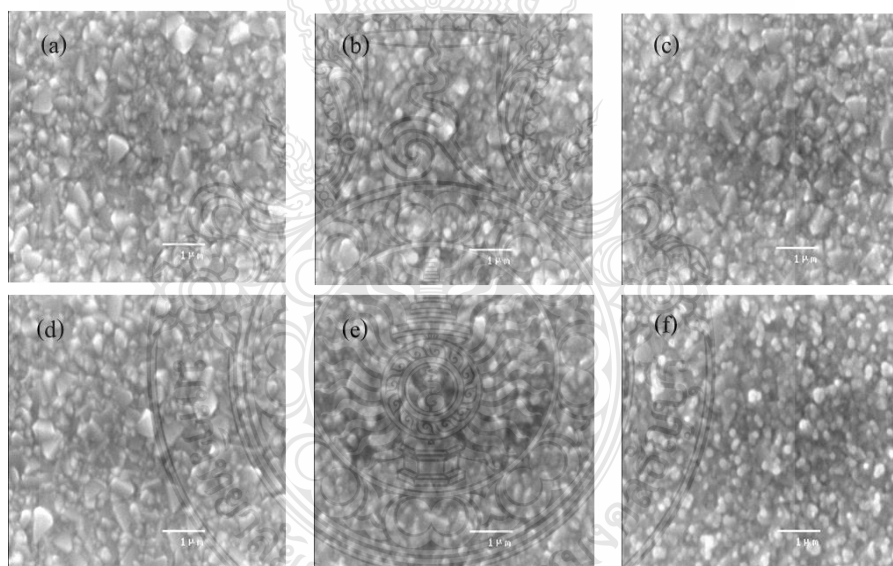
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยการใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณผลจากวงจรไฟฟ้าที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองจะแปรผันตรงกับกราฟ Nyquist ที่อุณหภูมิการเผาของขั้วไฟฟ้า Bi₂WO₆ ที่ 450°C มีค่าความต้านทานน้อยที่สุด สอดคล้องกับค่ากระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งค่ากระแสต่ำสุดจะมีค่าความต้านที่สูง ตามลำดับ เนื่องจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนต่ำที่สุด จึงส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงในการส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการเกิดออกซิเดชันได้ดีที่สุด ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 450°C, 500°C และ 600°C

อุณหภูมิการเผา (°C)	ความต้านทาน ; Rct (Ohm)
300	109,000
400	6,148
450	5,166
500	11,830
600	15,970

4.1.1.5 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า

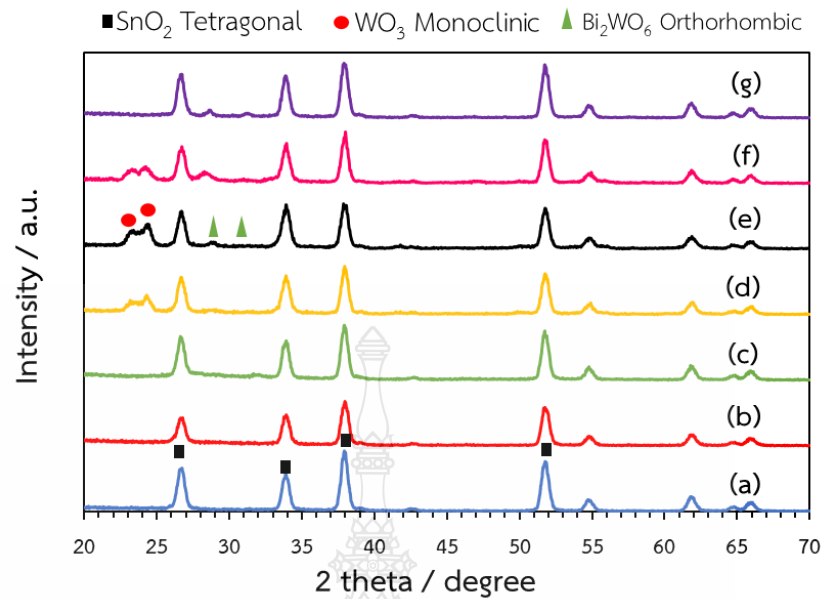
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 4.5 (a) 25°C, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 450°C, (e) 500°C, และ (f) 600°C โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) จากภาพ (a) ไม่ผ่านการเผาหรือตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ภาพ (b) , (c) และ (d) แสดงการเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, และ 450°C ไม่ได้มีความแตกต่างกันมาก แต่ยังมีการจัดเรียงและกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้คุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกดีขึ้น สอดคล้องกับค่ากระแสแสดงแสดงภาพที่ 4.2 ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิ 450°C ให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงสุด และเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มมากขึ้นดังภาพ (e) และ (f) เป็นการเผา 500°C และ 600°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพื้นผิวมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจึงส่งผลให้คุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกลดลง ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และถูกเผาที่อุณหภูมิ (a) 25°C, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 450°C, (e) 500°C และ (f) 600°C

4.1.1.6 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของชีวไฟฟ้า

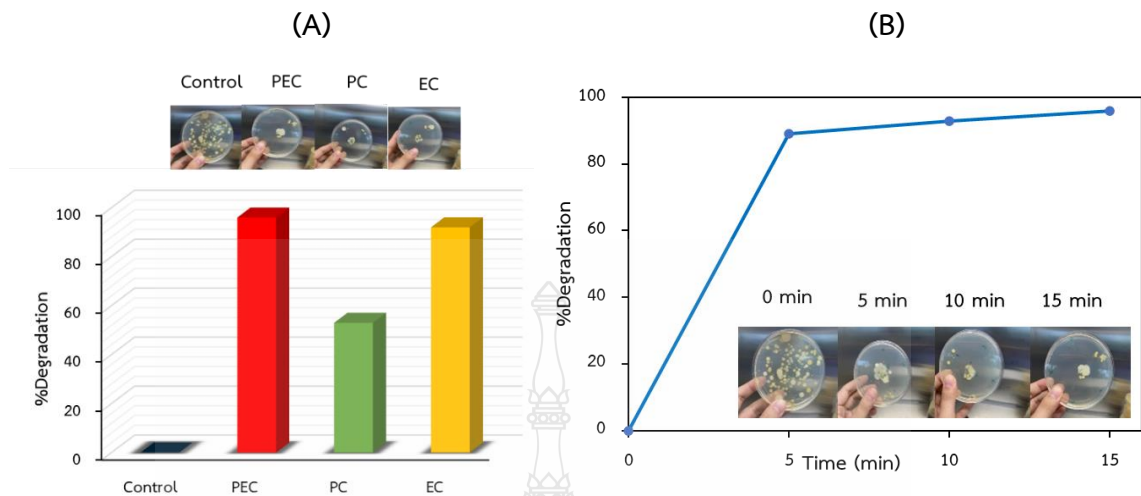
การศึกษาโครงสร้างผลึกของชีวไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.6 กระจาก FTO, 25°C, 300°C, 400°C, 450°C, 500°C, และ 600°C ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคุณสมบัติความเป็นผลึกของสารกึ่งตัวนำมีผลต่อสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยสารกึ่งตัวนำ Bi₂WO₆ ที่มีคุณสมบัติเป็นโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ดี จะต้องมีการสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic phase) [55] จาก XRD pattern ที่อุณหภูมิการเผาระหว่าง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นจุดสูงสุดของ XRD ที่ 2 theta เท่ากับ 29.0° และ 31.0° สามารถยืนยันโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิกเป็นลักษณะโครงสร้างของ Bi₂WO₆ และยังเกิดโครงสร้างผลึกของ WO₃ เป็นโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic phase) [56,57] โดยมีค่า XRD pattern 2-theta เท่ากับ 23.1°, 23.7°, และ 24.2 ตรงกับ (002), (020), และ (200) ตามลำดับ (JCPDS no.43-1035) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ยังไม่เป็นสารประกอบ Bi₂WO₆ ที่สมบูรณ์ แต่อยู่ในสถานะที่กำลังเปลี่ยนเฟสเป็นสารประกอบ Bi₂WO₆ และเมื่อคำนวณขนาดของจุดผลึก (Crystalline size) จากสมการของ Scherrer คือ $D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$ พบว่าอุณหภูมิการเผาช่วง 400 ถึง 500 °C ส่งผลต่อขนาดผลึก WO₃ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 450 °C มีขนาดผลึกเล็กที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่อุณหภูมิ 450 °C มีค่ามากที่สุดอาจเกิดจากผลของขนาดผลึกที่เล็กดังกล่าว อย่างไรก็ตาม สำหรับ Bi₂WO₆ ให้ผลไม่สอดคล้องกับสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก อาจเกิดจากลักษณะของ XRD pattern ของ Bi₂WO₆ ไม่เด่นชัดทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดขนาดโครงสร้างผลึกได้ จากผล XRD สามารถยืนยันผลของอุณหภูมิการเผาต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้เป็นอย่างดีคือ จากผลของค่ากระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำดังภาพที่ 4.2 ชีวไฟฟ้าที่เผาที่อุณหภูมิ ช่วง 400, 450, และ 500°C ได้ค่ากระแสที่สูงเหตุผลหนึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดเฟสผสมผสานระหว่าง WO₃ และ Bi₂WO₆ จึงทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีมากขึ้นดังแสดงในผลการศึกษาความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.6 XRD pattern ของ (a) กระจก FTO และชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เปรียบเทียบที่สภาวะอุณหภูมิต่าง คือ (b) 25°C (ไม่ผ่านการเผา) และผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ, (c) 300°C, (d) 400°C, (e) 450°C, (f) 500°C, และ (g) 600°C

4.1.2 ผลการศึกษาการจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำของชั้นไฟฟ้า Bi₂WO₆

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่ตรึงด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งได้ศึกษาเชื้อจุลินทรีย์รวม โดยใช้น้ำเสียจากบ่อน้ำข้างคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี เป็นตัวแทนเชื้อจุลินทรีย์รวมในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยา ดังภาพที่ 4.7 ภาพ (a) ศึกษาที่สภาวะภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic; EC) สภาวะการให้แสง (Photocatalytic; PC) และสภาวะการให้ ศักย์ไฟฟ้าและแสง (Photoelectrocatalytic; PEC) เปรียบเทียบกับเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์รวม กำจัดได้ 92 เปอร์เซ็นต์, 53 เปอร์เซ็นต์, และ 96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งระบบ PEC มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์รวม และภาพ (b) การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ภายในระยะเวลา 15 นาที สามารถกำจัดได้ดีในช่วงเวลาที่ 5 นาที และมีแนวโน้มการกำจัดได้ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถยืนยันประสิทธิภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายน้ำได้เป็นอย่างดี



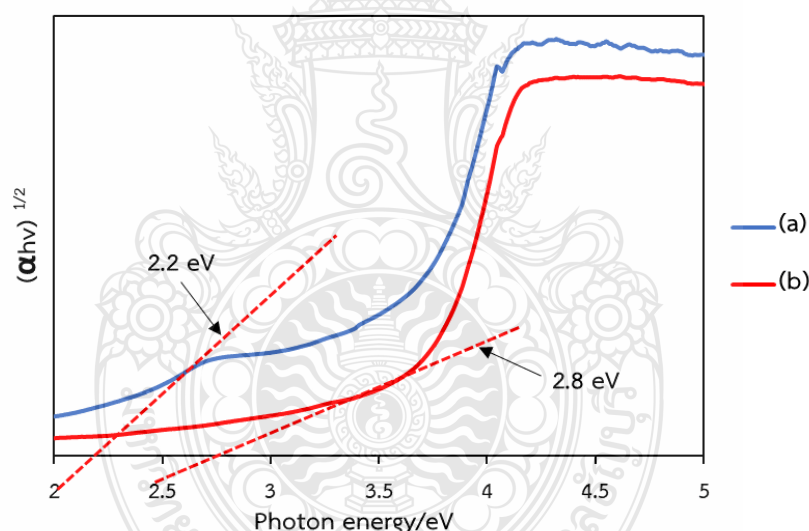
ภาพที่ 4.7 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์รวม (% Degradation) ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ (a) กลไกการเกิดปฏิกิริยา (b) การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยระบบ PEC ภายในระยะเวลา 15 นาที

4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ และขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

จากการศึกษาคุณสมบัติการทางโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ซึ่งมีประสิทธิภาพและสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป แต่จากการออกแบบระบบในขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับระบบฟอกอากาศด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ FTO/Bi₂WO₆ ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ยังมีข้อจำกัดในการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Automatic Dip coating เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และคุณสมบัติการทำงานของขั้วไฟฟ้าเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาและประยุกต์การใช้นั้นเอง

4.2.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง

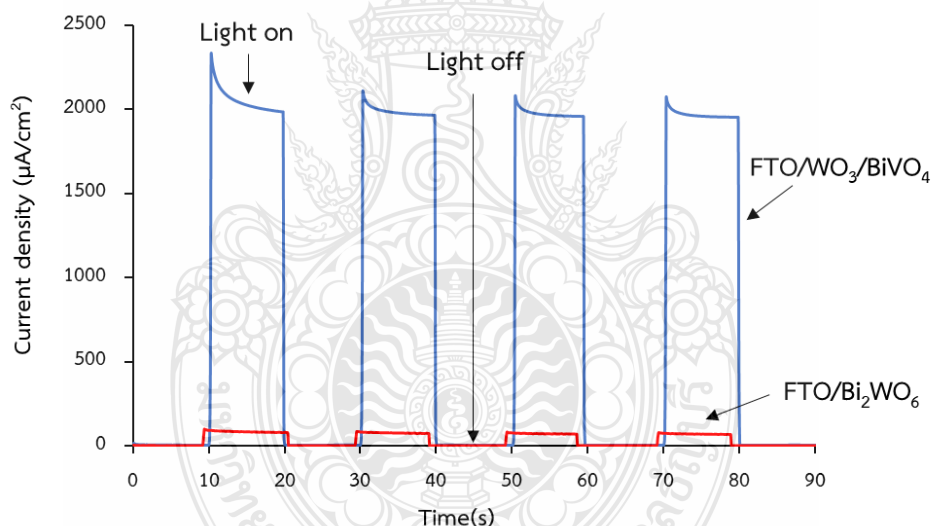
จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/Bi₂WO₆ เตรียมได้ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เปรียบเทียบกับชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ เตรียมด้วยเทคนิค Automatic Dip coating เมื่อคำนวณค่าแถบพลังงาน (Energy band gap; E_g) จากสมการ $E_g = 1,240/\lambda$ พบว่า ชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่ผ่านการเผาอุณหภูมิ 450°C เริ่มดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 477 nm มีค่าแถบพลังงาน (E_g) เท่ากับ 2.6 eV และชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ เริ่มดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 567 nm มีค่าแถบพลังงาน (E_g) ได้เท่ากับ 2.2 eV [21, 58, 59] ดังภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) ได้มากกว่าชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ โดยพิจารณาจากค่าขอบเขตของการดูดกลืนแสงที่มากกว่า และชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่า E_g ที่แคบกว่าชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า (a) ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ และ (b) ชั้นไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆

4.2.2 สมบัติทางโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

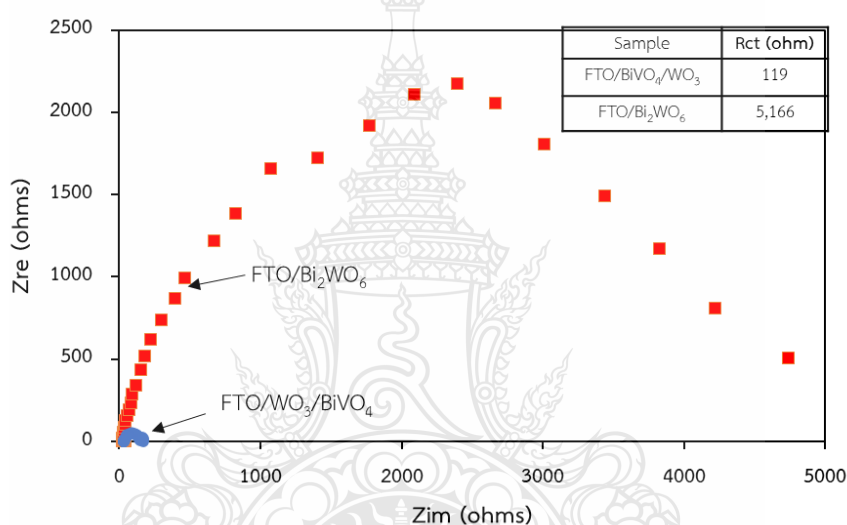
ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/Bi₂WO₆ เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ ดังภาพที่ 4.9 จากการทดลองพบว่าค่ากระแสของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่าเท่ากับ 2,029 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ซึ่งมีค่ากระแสสูงกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ที่มีค่ากระแสเท่ากับ 82 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ภายใต้การเร่งด้วยแสงและค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงดังภาพที่ 4.8 เป็นการยืนยันคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ดีในช่วงแสงตามองเห็นไปถึงค่าพลังงานแถบ (Band gap energy, E_g) ที่แคบกว่า ส่งผลให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอน (e^-) กับช่องว่าง (h^+) ได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/Bi₂WO₆ จึงเกิดทำให้เกิด h^+ เป็นจำนวนมากขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4.9 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ และขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.2.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า

การศึกษาค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/Bi₂WO₆ เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ พบว่าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/Bi₂WO₆ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และจากค่าในตารางแสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้ดี ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ ดังภาพที่ 4.9

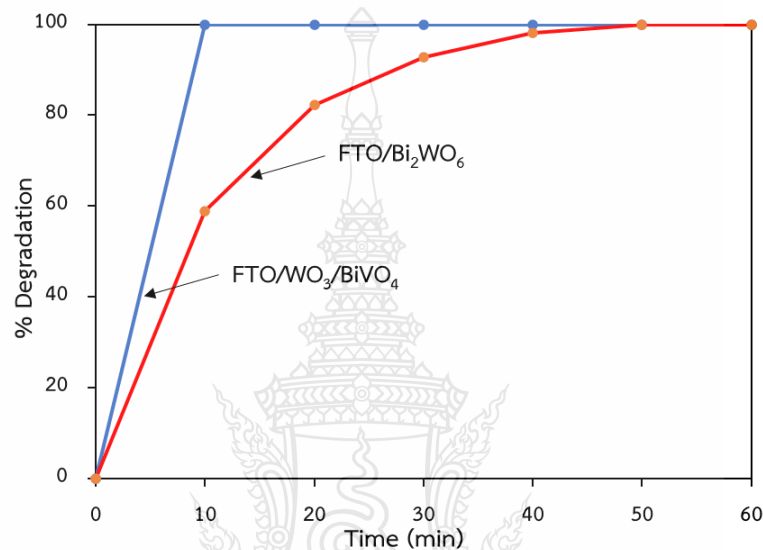


ภาพที่ 4.10 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ และขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.2.4 ผลการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีส้ม Orange red

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีส้ม Orange red ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ดังแสดงภาพที่ 4.11 จากผลการทดลองขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ มีแนวโน้มในการกำจัดที่ดี และกำจัดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 40 นาที ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ สามารถกำจัดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 10 นาที ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้รวดเร็วกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่กล่าวมาข้างต้น โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยา

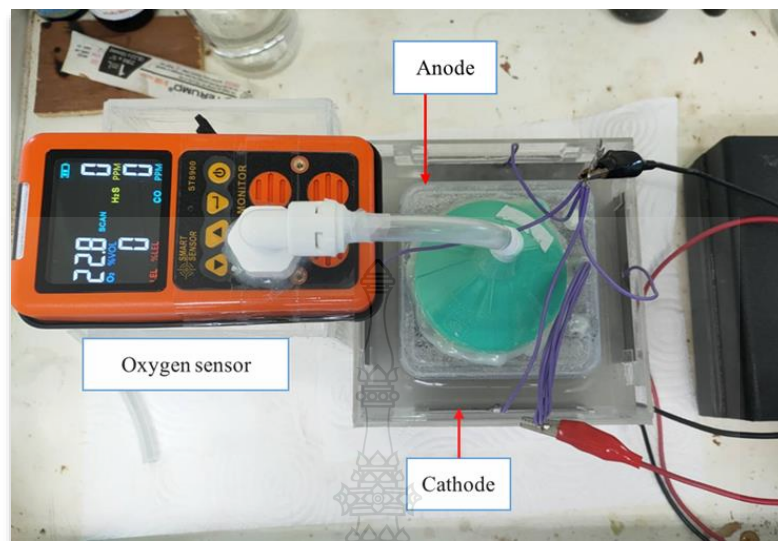
ออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่สูง มีค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าที่ต่ำ และยังสามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นได้ดี เป็นผลให้มีประสิทธิภาพการออกซิไดส์สารอินทรีย์สีส้มในสารละลายน้ำที่สูงมากขึ้นด้วย เป็นการยืนยันว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมมากกว่ากับการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ยังสามารถขยายสเกลให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ง่ายสำหรับการประยุกต์ใช้ในอนาคต



ภาพที่ 4.11 กราฟการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อม Orange red ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi₂WO₆ และขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.3 การศึกษาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

การพัฒนาและออกแบบเซลล์ต้นแบบสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติกเป็นการแยกน้ำภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้า ซึ่งได้ออกแบบโดยการแบ่งกล่องด้านในระหว่างตรงกลางจะเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อแยกน้ำเป็นออกซิเจน และด้านนอกเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด เชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับ power supply เพื่อควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และต่อท่อด้านบนเหนือขั้วไฟฟ้าแอโนดกับตัวตรวจวัดออกซิเจน (Oxygen sensor) เพื่อตรวจวัดก๊าซออกซิเจนที่สามารถผลิตได้จากเซลล์ดังกล่าว และเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาดังภาพที่ 4.12

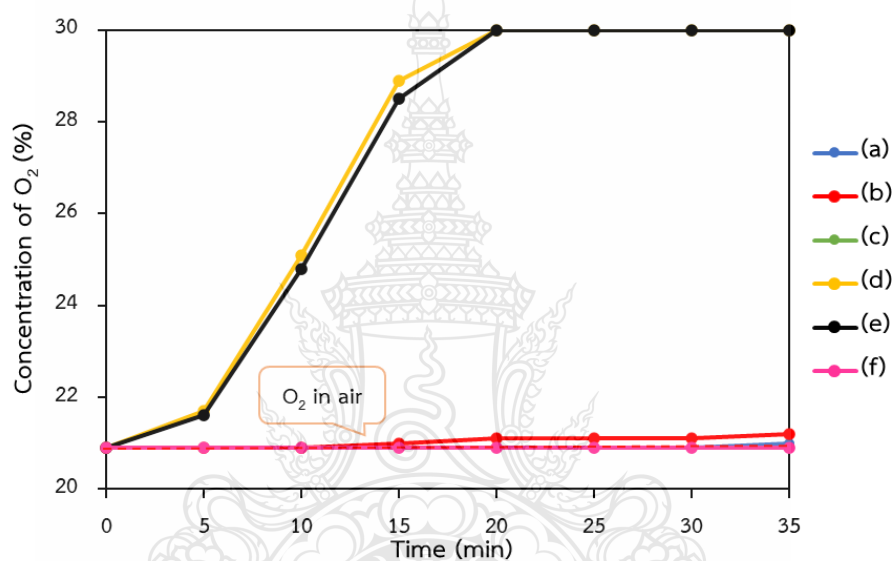


ภาพที่ 4.12 แสดงชุดเซลล์ต้นแบบสำหรับศึกษาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก

4.3.1 ผลการศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกันสำหรับการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นเท่ากันที่ 1 M ได้ผลการศึกษาสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; NaOH) โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate; Na_2SO_4) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Sodium dihydrogen phosphate; NaH_2PO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ปริมาตร 1,250 ml ดังแสดงในภาพที่ 4.13 จากผลการทดลองการเพิ่มปริมาณออกซิเจนพบว่า สารละลาย 1 M NaOH และ 1 M KOH สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้มากถึง 30.0 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 35 นาที ในขณะที่สารละลาย 1 M Na_2SO_4 , 1 M NaCl, 1 M NaH_2PO_4 และ 1 M $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีการเพิ่มของออกซิเจนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสารละลาย NaOH และ KOH ที่สภาวะเป็นเบส มีความสามารถการแตกตัวเป็น OH^- ได้ดี ส่งผลให้มีการรับอิเล็กตรอนได้ดี จึงมีประสิทธิภาพในการผลิตออกซิเจนได้สูง ตามลำดับ [60, 61] และจากสมการค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันที่ (1)

และ (2) แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะเป็นเบสมาก มีการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าสภาวะเป็นกรด จึงจะสามารถออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็นออกซิเจนได้ ในขณะที่สารละลาย Ca(OH)_2 มีสภาวะเป็นเบสเช่นเดียวกันแต่ไม่สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ เนื่องจากมีค่าการละลายในน้ำได้เพียงเล็กน้อย จึงไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกสารละลาย NaOH เนื่องจากมีราคาถูก สามารถหาได้ง่ายและเหมาะสมในการศึกษาต่อไป

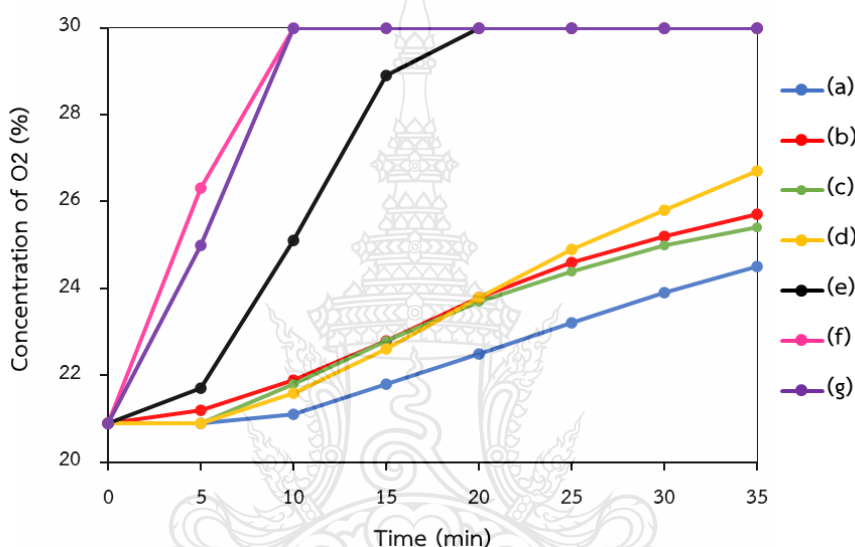


ภาพที่ 4.13 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน (a) NaCl (b) Na_2SO_4 (c) NaH_2PO_4 (d) NaOH (e) KOH และ (f) Ca(OH)_2

4.3.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการเพิ่มปริมาณของออกซิเจนในอากาศ โดยได้ศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.3, และ 1.5 M ดังแสดงในภาพที่ 4.14 จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศได้

อย่างรวดเร็ว และพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.3 M สามารถเพิ่มปริมาณของออกซิเจนในอากาศได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาเพียง 7 นาที ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึง 1.5 M มีการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ 30 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้ระยะเวลาถึง 35 นาที เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1.5 M น่าจะมีความเข้มข้นมากเกินไป หรืออาจเกิดจากสารละลายอิ่มตัว ทำให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในระยะเวลาที่มากขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจน ส่งผลให้การรับส่งอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าขั้วได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศได้เป็นอย่างดี

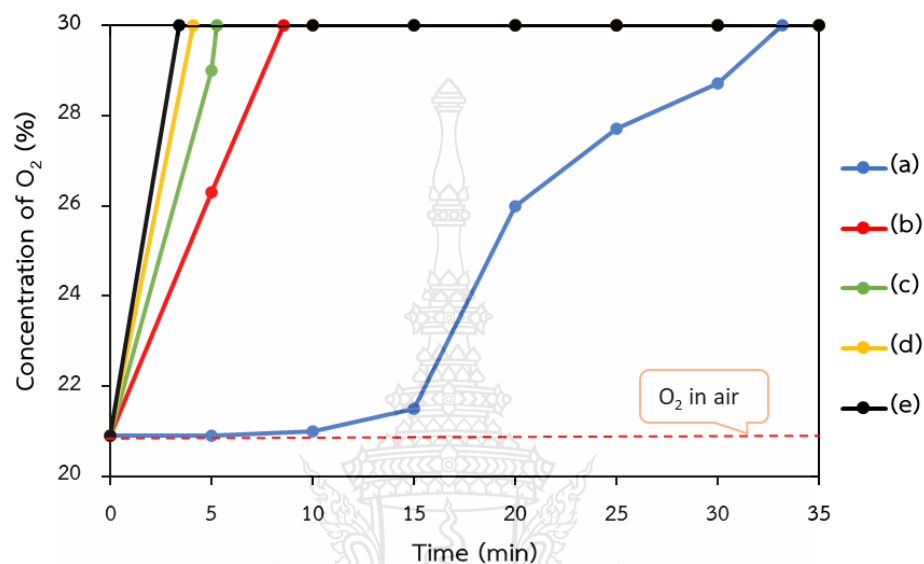


ภาพที่ 4.14 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรดตะกั่วโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คือ (a) 0.5 M (b) 0.7 M (c) 0.8 M (d) 0.9 M (e) 1.0 M (f) 1.3 M และ (g) 1.5 M

4.3.3 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 1.3 M ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าช่วงตั้งแต่ 3 ถึง 7 โวลต์ ดังแสดงดังภาพที่ 4.15 การทดลองพบว่าเมื่อใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลต์ จะสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ แต่ต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน จึงจะเพิ่มปริมาณได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 4 โวลต์ มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนอย่างชัดเจน เพิ่มได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 10 นาที เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมากขึ้น จะเป็นการเร่งการไหลของอิเล็กตรอน

จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดได้ดี ส่งผลให้มีแนวโน้มการผลิตออกซิเจนได้ดีขึ้นตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อการเพิ่มออกซิเจนในอากาศอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นในด้านฝั่งแอโนด จึงเลือกสภาวะที่ 5 โวลต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมและไม่ใช้พลังงานมากเกินไปสำหรับระบบผลิตออกซิเจนในอากาศ

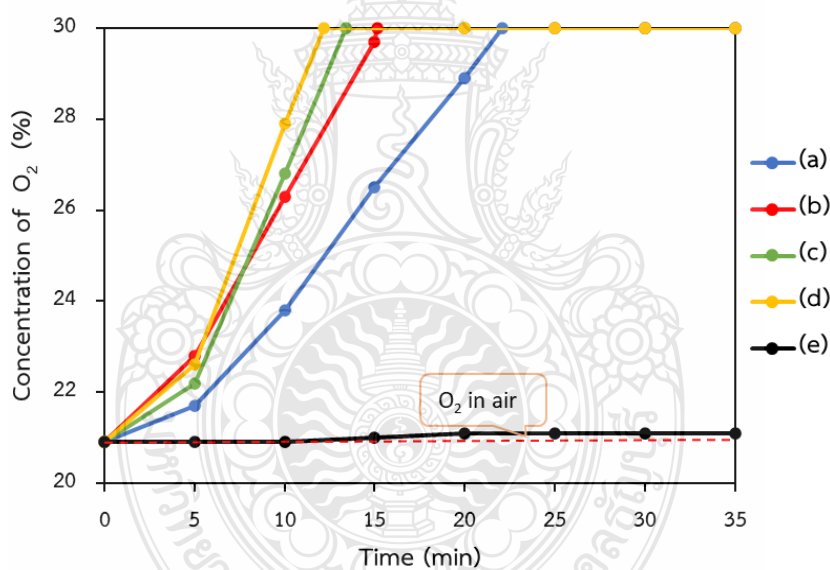
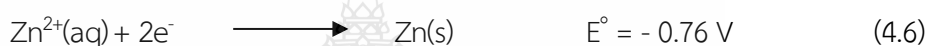
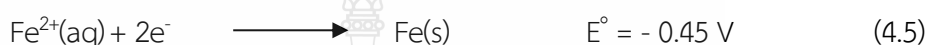
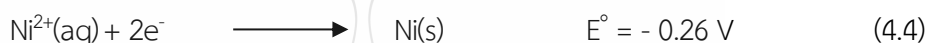
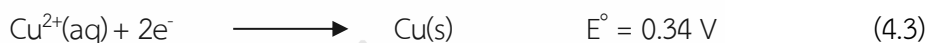


ภาพที่ 4.15 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรเคมีโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน (a) 3 V (b) 4 V (c) 5 V (d) 6 V และ (e) 7 V

4.3.4 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

การทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแคโทด สำหรับการเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น 1.3 M NaOH ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ซึ่งศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด แสดงดังภาพที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตออกซิเจนในอากาศจากการใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดต่างชนิดกันคือ แผ่นทองแดง (Cu) แผ่นสแตนเลสสตีล (SS) แผ่นสังกะสี (Zn) แผ่นทองเหลือง (brass) และกระจกนำไฟฟ้า FTO จากผลการทดลองพบว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำด้วยแผ่นทองแดง แผ่นทองเหลือง แผ่นสังกะสีและแผ่นสแตนเลสสตีล มีประสิทธิภาพในการเพิ่มออกซิเจนในอากาศได้มากถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลาประมาณ 12 ถึง 20 นาที เนื่องจากขั้วไฟฟ้าแคโทดดังกล่าวมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยารีดักชัน (Standard Reduction Potential) ดังแสดงในสมการ (4.3-4.6) ทำให้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนและการส่งผ่านประจุได้ดี ตามลำดับ จึงส่งผลให้มีแนวโน้มการ

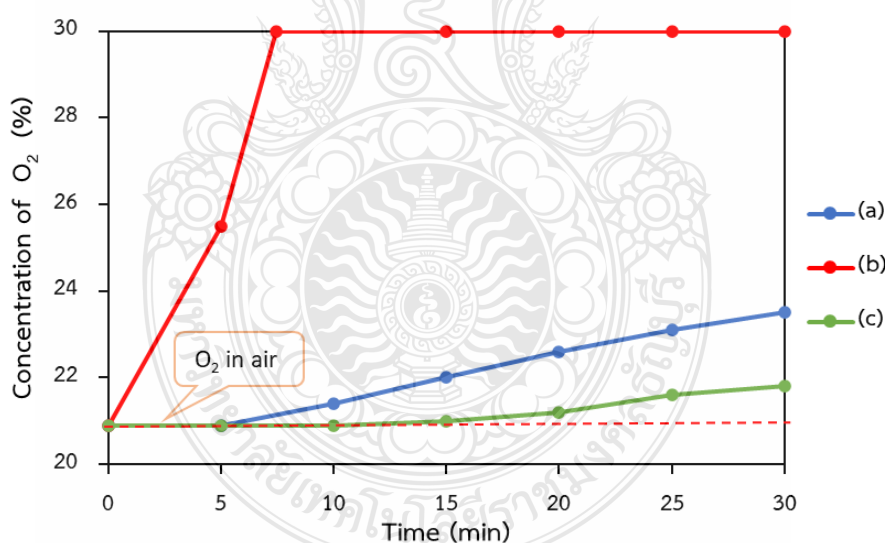
เกิดปฏิกิริยาได้ดีไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งแผ่นสังกะสีและแผ่นทองเหลืองมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้เร็วที่สุด แต่อย่างไรก็ตามโลหะดังกล่าวยังมีข้อจำกัดคือสามารถเกิดการกัดกร่อนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะเบสได้ง่าย ซึ่งไม่มีความทนทาน ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ดังนั้น จึงเลือกขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด สำหรับการศึกษาและการใช้งานระยะยาว [62] ทั้งยังมีประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มออกซิเจนได้ดีไม่แตกต่างจากโลหะอื่น ๆ อีกด้วย



ภาพที่ 4.16 ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทดในเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกต่อประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศ (a) ทองแดง (b) สแตนเลสสตีล (c) สังกะสี (d) ทองเหลือง และ (e) กระจกนำไฟฟ้า FTO

4.3.5 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

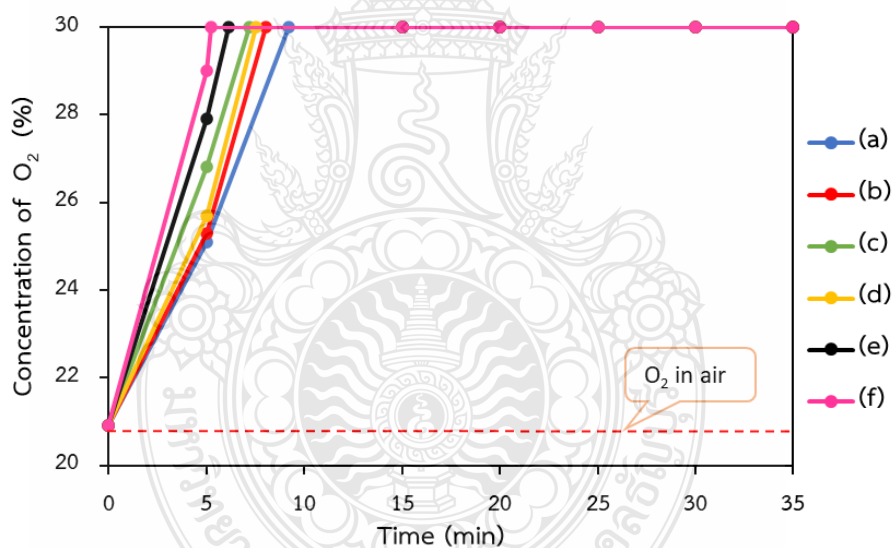
การทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแอโนด สำหรับการเพิ่มปริมาณออกซิเจนโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaOH ที่ความเข้มข้น 1.3 M ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5 มีการศึกษาระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยศึกษากระจกนำไฟฟ้า FTO และแผ่นแกรไฟต์ ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล เปรียบเทียบกับระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็น $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ และขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล ดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 4.17 จากการทดลองพบว่าระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก การศึกษาใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ดีถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 13 นาที และแผ่นกระจก FTO สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ 23 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 30 นาที และการศึกษาระบบ โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ซึ่งเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้เพียงเล็กน้อย จึงไม่เหมาะต่อการใช้งานสำหรับการเพิ่มปริมาณออกซิเจน ซึ่งแผ่นแกรไฟต์ประสิทธิภาพที่สูงจึงเหมาะสมสำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป ทั้งยังสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.17 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศ ด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกโดยศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยระบบ EC (a) กระจกนำไฟฟ้า FTO (b) แผ่นแกรไฟต์ และระบบ PEC (c) $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$

4.3.6 ผลของขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ โดยการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งจะใช้เป็นแผ่นแกรไฟต์ ขั้วไฟฟ้าแคโทดใช้เป็นแผ่นสแตนเลสสตีล จำนวน 4 ขั้ว ซึ่งได้ศึกษาที่จำนวนขั้วไฟฟ้าของแผ่นแกรไฟต์จำนวน 1 ถึง 6 ขั้ว หรือคิดเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ $0.04 \text{ cm}^2/\text{ml}$ ถึง $0.24 \text{ cm}^2/\text{ml}$ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 จากการทดลองพบว่าการใช้อัตราส่วนของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรที่มากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเพิ่มปริมาณออกซิเจนตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ไม่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรที่ $0.04 \text{ cm}^2/\text{ml}$ เพื่อเป็นการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นภายในระบบให้มีปริมาณน้อยที่สุด และยังมีประสิทธิภาพการเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ดี



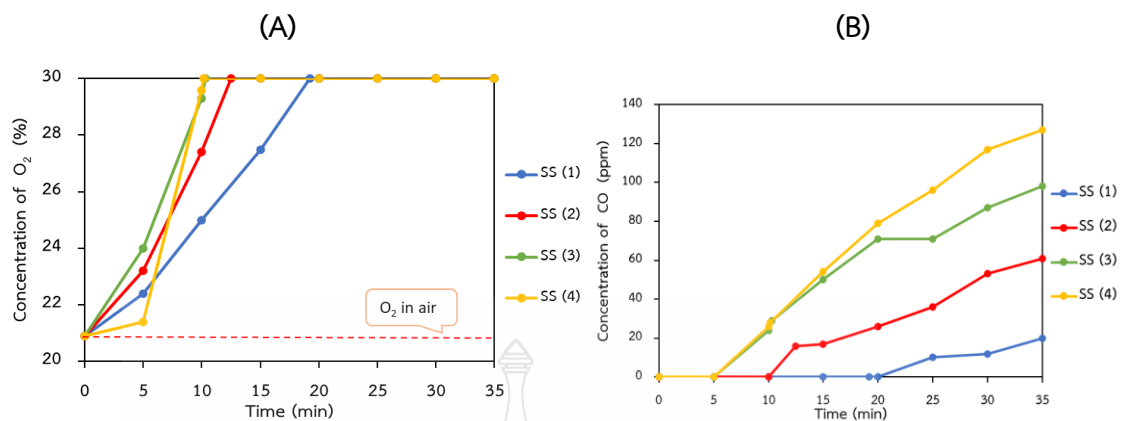
ภาพที่ 4.18 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศด้วยเซลล์อิเล็กโทรดตะกั่วที่อัตราส่วนของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดต่อปริมาตรสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (a) $0.04 \text{ cm}^2/\text{ml}$ (b) $0.08 \text{ cm}^2/\text{ml}$ (c) $0.12 \text{ cm}^2/\text{ml}$ (d) $0.16 \text{ cm}^2/\text{ml}$ (e) $0.20 \text{ cm}^2/\text{ml}$ และ (f) $0.24 \text{ cm}^2/\text{ml}$

4.3.7 ผลการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสไฟฟ้ากับการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

Cathode	Current (A)
SS (1)	1.663
SS (2)	2.386
SS (3)	2.733
SS (4)	2.764

การทดลองนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจนโดยการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทด เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดจำนวน 1 ขั้ว เป็นขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ และศึกษาจำนวนของขั้วไฟฟ้าแคโทดตั้งแต่ 1 ถึง 4 ขั้ว ซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล ดังแสดงในภาพที่ 4.19 ภาพ (A) กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในอากาศ เมื่อใช้จำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดมากขึ้น การเพิ่มปริมาณของออกซิเจนในอากาศเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามยังมีประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ภาพ (B) แสดงกราฟการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ จากผลการทดลองพบว่าการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดตั้งแต่ 1 ถึง 4 ขั้ว มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ สอดคล้องกับผลในตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่ากระแสที่เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนขั้วไฟฟ้าเช่นกัน แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดในสารละลายได้ดีตามลำดับ จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เป็นแกรไฟต์ ซึ่งเป็นคาร์บอน มีการเกิดความร้อนและเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศอย่างไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หลุดออกมาปนเปื้อนในอากาศได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ สารอีพอกซี (Epoxy) เรซินที่ใช้ยึดติดระหว่างสายไฟและแผ่นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล ซึ่งมีความร้อนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบได้อีกเช่นกัน ทั้งยังมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นด้วย [63] ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจากการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดดังกล่าวจึงเลือกใช้จำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดเพียง 1 ขั้ว ซึ่งมีประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศที่เพียงพอต่อการใช้งาน และยังลดการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบได้อีกด้วย

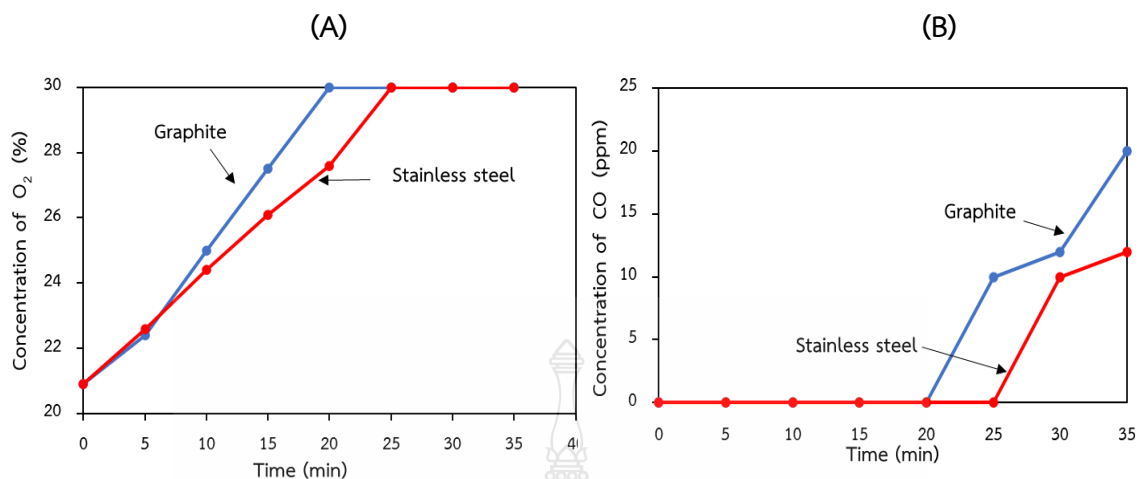


ภาพที่ 4.19 ผลการศึกษาจำนวนชั่วโมงไฟฟ้าแคโทดด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (A) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนในอากาศ (B) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ

4.3.8 ผลการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับระบบเพิ่มออกซิเจนใน

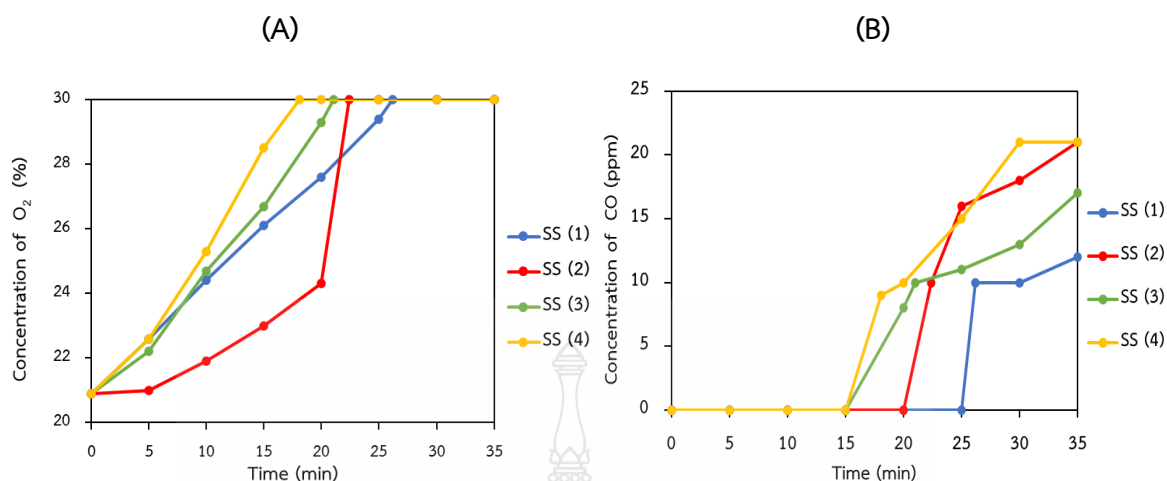
อากาศ

การทดลองนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ โดยได้เปรียบเทียบการทำงานของขั้วไฟฟ้าแอโนดระหว่างขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จำนวน 1 ขั้ว และขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล จำนวน 1 ขั้ว ต่อการใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลจำนวน 1 ขั้ว เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.20 พบว่าภาพที่ 4.20 (A) ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์สามารถเพิ่มปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในอากาศ ได้เร็วกว่าขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล แต่อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4.20 (B) ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ยังมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศที่มากกว่าขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล ดังนั้น จึงเลือกขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่เพียงพอต่อการเพิ่มปริมาณออกซิเจน และเป็นการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสยังมีความทนทานมากกว่าขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อีกด้วย



ภาพที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนดแกรไฟต์กับสแตนเลสสตีลด้วยเซลล์อิเล็กโทรดตะกั่ว (A) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนในอากาศ (B) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ

การเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลสำหรับขั้วไฟฟ้าแอโนด เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดจำนวน 1 ขั้ว เป็นขั้วสแตนเลสสตีล และได้ศึกษาจำนวนของขั้วแอโนดตั้งแต่ 1 ถึง 4 ขั้ว ดังแสดงภาพที่ 4.21 ภาพ (A) กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในอากาศ เมื่อใช้จำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดมากขึ้น การเพิ่มปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ยังมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ภาพ (B) แสดงกราฟการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ การทดลองพบว่าการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดตั้งแต่ 1 ถึง 4 ขั้ว มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นตามลำดับเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดจาก 1 เป็น 4 ขั้ว มีการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของการอีพอกซี (Epoxy) ระหว่างสายไฟและแผ่นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล ซึ่งมีความร้อนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าส่งผลให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบได้ ทั้งยังมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นด้วย ทำให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในอากาศได้อย่างรวดเร็ว แต่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจากการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนด การใช้ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลเพียง 1 ขั้ว มีประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มออกซิเจนในอากาศที่เพียงพอต่อการใช้งาน และยังลดการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศได้อีกด้วย



ภาพที่ 4.21 ผลการศึกษาผลของจำนวนของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก (a) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนในอากาศ (b) กราฟการเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ

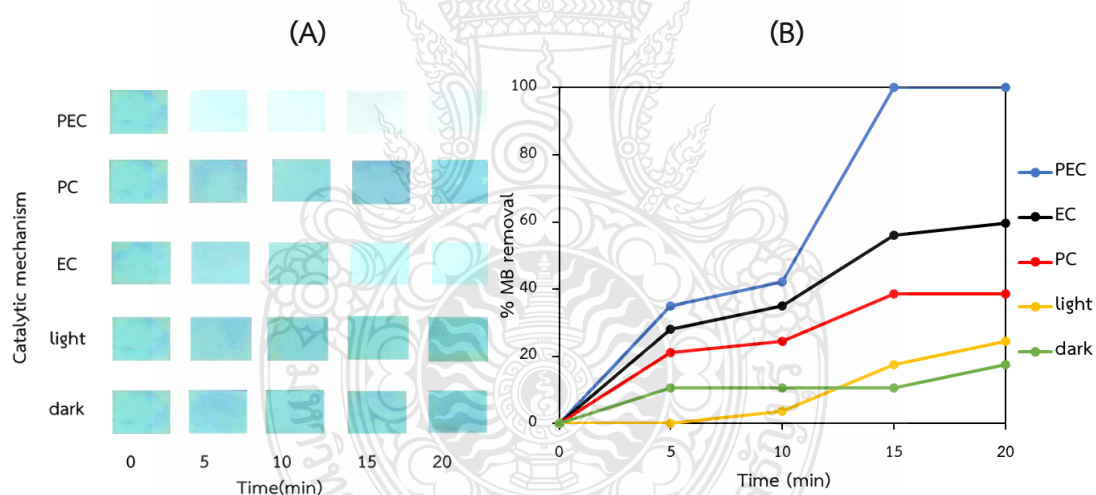
จากการศึกษาระบบเพิ่มออกซิเจนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล จำนวน 1 ขั้ว และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล ขนาดพื้นที่ต่อปริมาตร 0.04 cm²/ml กับสภาวะที่เหมาะสม ดังนี้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.3 M ศักย์ไฟฟ้าให้แก่ระบบ 5 โวลต์ จึงจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนสูงสุดถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 25 นาที ซึ่งการจัดวางรูปแบบขั้วไฟฟ้าของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ของบทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าสำหรับระบบฟอกอากาศ

4.4.1 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษากลไกการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (methylene blue, MB) ได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ระบบโพโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) [64-66] โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาการให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 2 V และแสง LED ระบบโพโตคะตะไลติก (PC) ภายใต้การให้แสง LED เพียงอย่างเดียว ระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก (EC) ภายใต้การให้

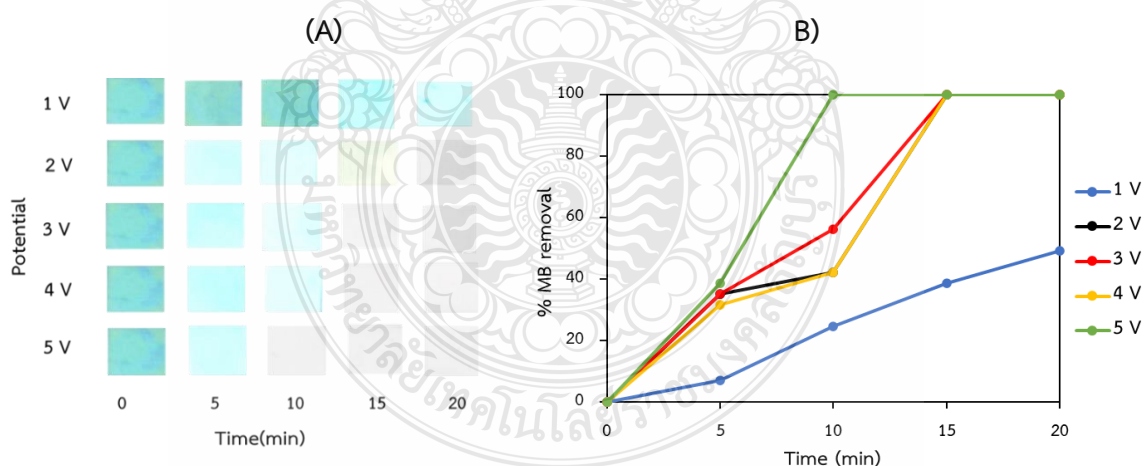
ศักย์ไฟฟ้า 2 V เพียงอย่างเดียว สภาวะที่ให้แสงธรรมชาติ (light) และสภาวะที่มีมืด (Dark) การทดลองภายในระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ภาพ (A) การลดลงของสีย้อมจะเห็นได้ชัดเจนในระบบ PEC เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ และภาพ (B) เป็นการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู จากภาพพบว่าการกำจัดสีย้อมได้ดีในสภาวะที่ชั่วไฟฟ้าถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง ซึ่งสามารถกำจัดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ระบบ EC กำจัดได้ 60 เปอร์เซ็นต์ ระบบ PC กำจัดได้ 39 เปอร์เซ็นต์ สภาวะให้แสงธรรมชาติกำจัดได้ 25 เปอร์เซ็นต์ และสภาวะที่มีมืดกำจัดได้ 18 เปอร์เซ็นต์ โดยระบบ PEC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด สามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการกำจัดสารอินทรีย์เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าชั่วไฟฟ้าได้ เนื่องจากการกระตุ้นผิวหน้าชั่วไฟฟ้าที่มีสารกึ่งตัวนำด้วยแสง ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ และมีการใช้ศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจากชั่วแอโนดไปยังชั่วแคโทด จึงทำให้แถบวาเลนซ์เกิดช่องว่างที่มีประจุบวกได้มากขึ้น ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้เป็นสารที่ไม่เป็นอันตราย จึงเหมาะสมสำหรับการไปใช้งานเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์ต้นแบบการฟอกอากาศต่อไป



ภาพที่ 4.22 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (A) ภาพการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที

4.4.2 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

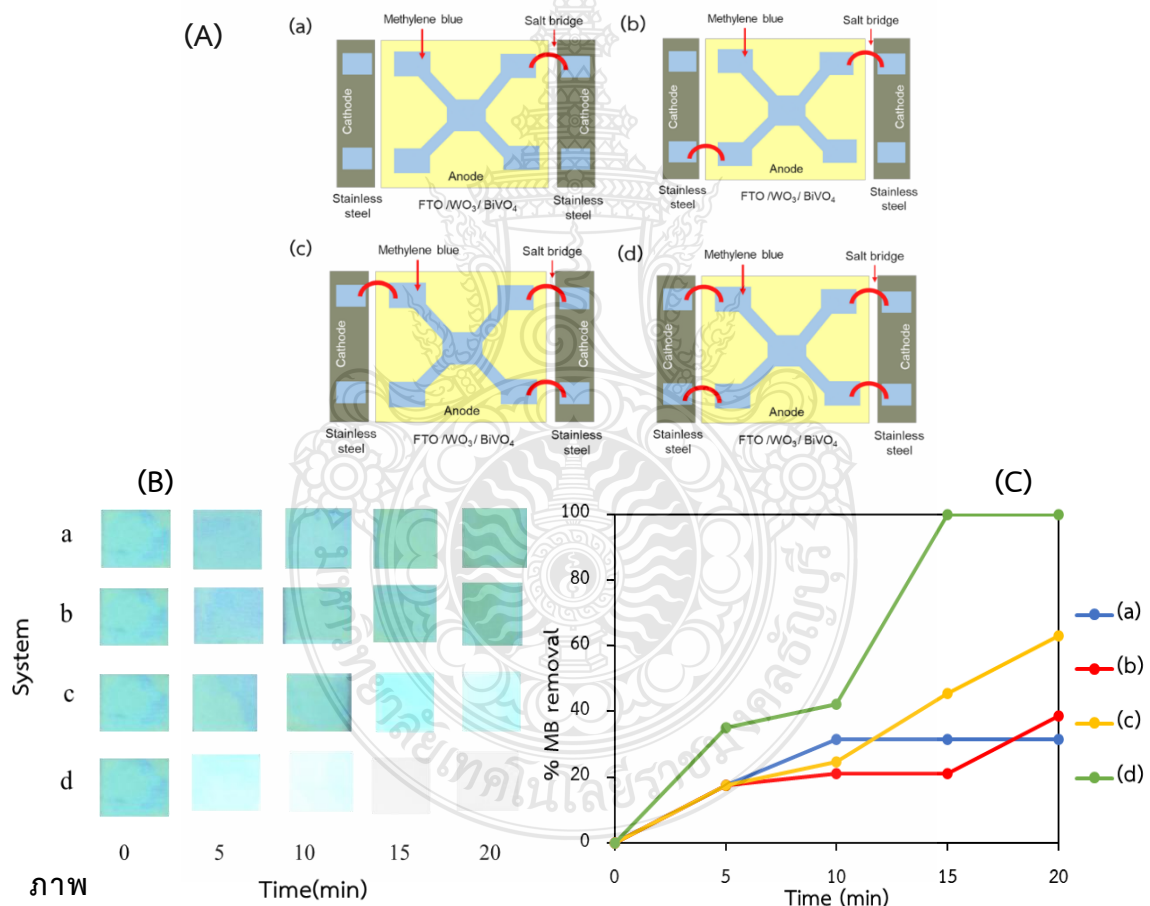
การศึกษาระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ใช้สำหรับการฟอกอากาศได้ศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1, 2, 3, 4, และ 5 โวลต์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และสแตนเลสสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ภายในระยะเวลา 20 นาที จากภาพที่ 4.23 ภาพ (A) แสดงการลดลงของสีย้อมจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปทางบวกมากขึ้นมีการลดลงของสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ชัดเจนและสามารถกำจัดได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ ตามลำดับ จากภาพที่ 4.23 (B) ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์มีการกำจัดได้เพียง 49 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 2 ถึง 5 โวลต์ มีการกำจัดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถยืนยันการทำงานของสะพานเกลือได้อย่างสมบูรณ์และครบวงจร เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับระบบช่วยเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้อย่างรวดเร็วทำให้บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิดช่องว่างประจุบวกที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย แต่การเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไปทำให้ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเสื่อมสภาพได้จะมีผลต่ออายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นแนวโน้มการกำจัดที่ลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อรักษาคุณภาพการใช้งานของขั้วไฟฟ้าแอโนดได้นานยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.23 ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที

4.4.3 ผลการศึกษาผลของจำนวนของสะพานเกลือของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาลักษณะการวางและจำนวนของสะพานเกลือ ซึ่งจะศึกษา 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.24 ภาพ (A) จากผลการทดลองพบว่าภาพ (B) ภาพการทดลองการลดลงของสีย้อมเมทิลีนบลู มีการลดลงอย่างชัดเจน สำหรับการวางสะพานเกลือแบบ (d) ซึ่งมีจำนวนสะพานเกลือ 4 อัน และวางทั้ง 4 ด้าน ภาพ (C) แสดงให้เห็นได้ว่าการวางแบบ (d) มีการกำจัดได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวางแบบอื่นๆ จะมีการจัดวางสะพานเกลือที่จำนวนน้อยกว่า ส่งผลให้การกำจัดลดลงตามลำดับ เนื่องจากการวางและจำนวนของสะพานเกลือที่มาก ยิ่งส่งผลให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดได้ดีมากขึ้นอีกด้วย จึงทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีขึ้น

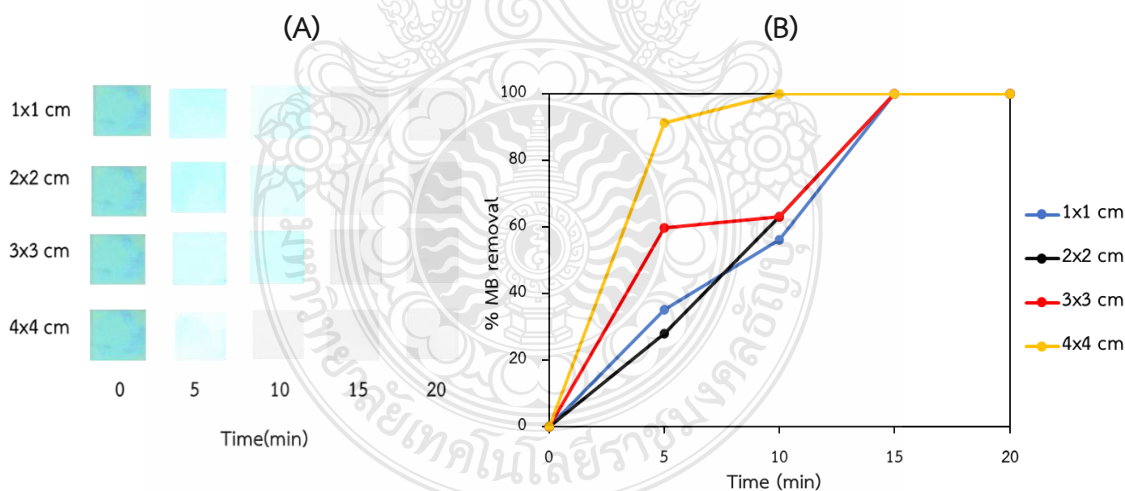


ที่ 4.24 (A) รูปแบบลักษณะการจัดวาง

สะพานเกลือและจำนวนของสะพานเกลือ (B) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (C) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที

4.4.4 ผลการศึกษาผลของขนาดพื้นที่ผิวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่สัมผัสขั้วไฟฟ้าแคโทด

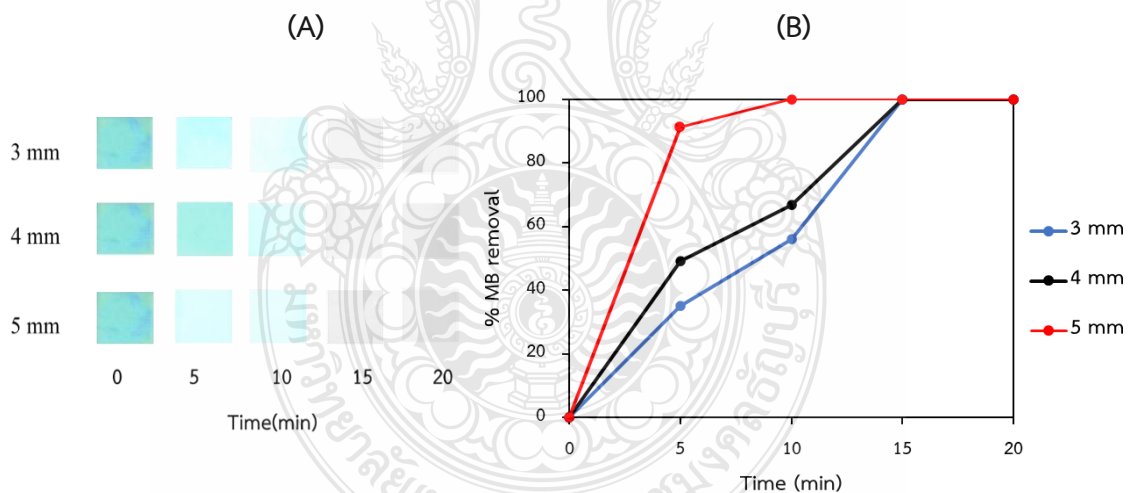
การศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของแคโทดสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ได้ศึกษาขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าที่ 1x1 cm, 2x2 cm, 3x3 cm และ 4x4 cm ดังแสดงในภาพที่ 4.25 โดยให้ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ จากผลการทดลองพบว่า ภาพ (A) แสดงภาพการทดลองของสีย้อมเมทิลีนบลู สามารถเห็นได้ว่าการกำจัดได้ชัดเจน เมื่อขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทดมีขนาดเพิ่มมากขึ้น ภาพ (B) จากกราฟขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด 1x1 cm, 2x2 cm และ 3x3 cm สามารถกำจัดสีย้อมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 15 นาที ซึ่งมีการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด 4x4 cm สามารถกำจัดได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 10 นาที ซึ่งสอดคล้องกับภาพ (A) แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทดเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของแคโทดส่งผลให้สารละลายมีพื้นที่ผิวสัมผัสหน้าขั้วแคโทดมากขึ้นจึงมีผลต่อการส่งผ่านของอิเล็กตรอนของสะพานเกลือจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด 1x1 cm เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ไม่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจนและเป็นการประหยัดพื้นที่ในการออกแบบระบบอีกด้วย



ภาพที่ 4.25 ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที

4.4.5 ผลการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือ

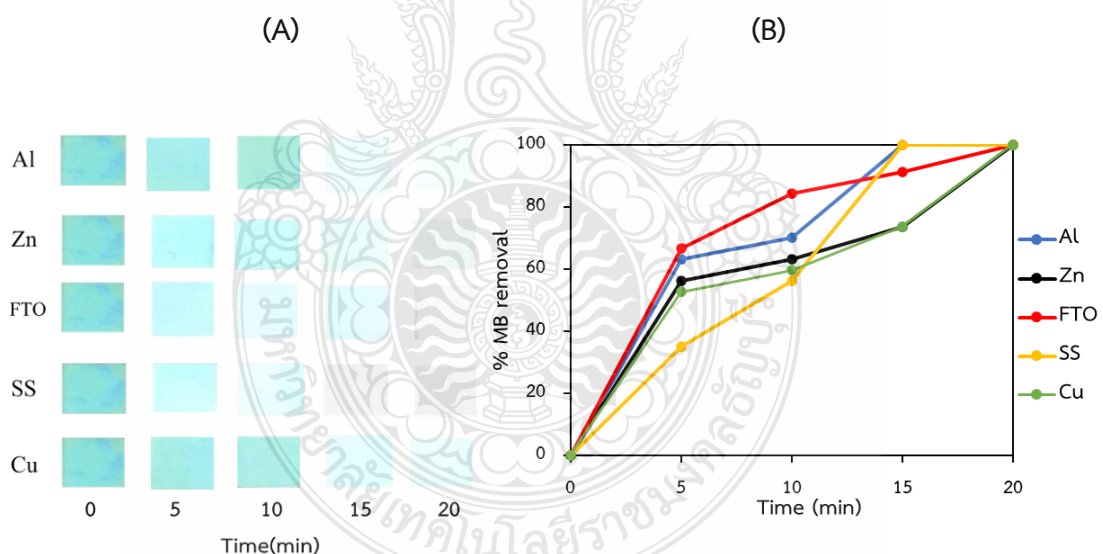
การศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู ได้ทำการศึกษาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm, 4 mm, และ 5 mm แสดงดังภาพที่ 4.26 โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลต์ จากผลการทดลองพบว่า ภาพ (A) แสดงภาพการกำจัดไม่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ภาพ (B) จากกราฟขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือที่ 4 mm และ 5 mm สามารถกำจัดสีย้อมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 15 นาที ซึ่งมีการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือที่ 5 mm สามารถกำจัดได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 10 นาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ปริมาณเจลของสะพานเกลือมากขึ้นด้วย [67] สามารถทำให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอนของสะพานเกลือจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปขั้วไฟฟ้าแคโทดได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 3 mm เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ไม่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจนและเป็นการใช้สะพานเกลือที่มีปริมาณน้อยอีกด้วย



ภาพที่ 4.26 ผลการศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางของสะพานเกลือสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที

4.4.6 ผลการศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด

การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู โดยได้ศึกษาผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) สังกะสี (Zn) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) สแตนเลสสตีล (SS) และทองแดง (Cu) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.27 จากผลการทดลองพบว่า ภาพ (A) แสดงภาพการทดลองของสีย้อมเมทิลีนบลู แสดงให้เห็นการใช้ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล มีการลดลงของสีย้อมที่ชัดเจน ภาพ (B) จากกราฟเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม พบว่า สังกะสี ทองแดง และกระจกนำไฟฟ้ามีการกำจัดสีย้อม 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 20 นาที ซึ่งอะลูมิเนียมและสแตนเลสสตีล สามารถกำจัดสีย้อมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 15 นาที ซึ่งมีการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Standard Reduction Potential) ที่ใกล้เคียงกันและมีค่าไปทางลบมากกว่าแคโทดชนิดอื่นๆ จึงส่งผลให้มีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังแคโทดได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดสารอินทรีย์และที่สำคัญมีความคงทน อายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าขั้วไฟฟ้าแคโทดชนิดอื่นๆ



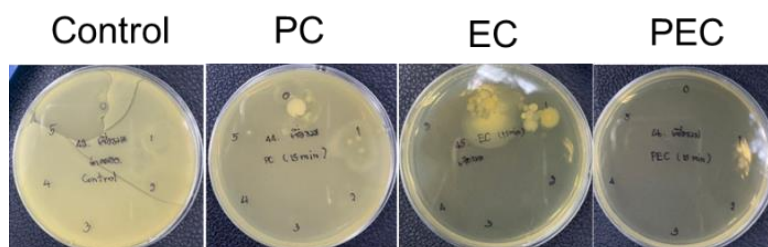
ภาพที่ 4.27 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (A) ภาพการทดลองการลดลงของความเข้มของสีของสารละลายสีย้อม (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมภายในระยะเวลา 20 นาที

4.4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ ได้ศึกษาเชื้อจุลินทรีย์รวม โดยใช้น้ำเสียจากบ่อน้ำข้างคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี เป็นตัวแทนเชื้อจุลินทรีย์รวมในการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ได้ศึกษาที่สภาวะภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลต์ (EC) สภาวะการให้แสง LED (PC) และสภาวะการให้ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์และแสง LED (PEC) เปรียบเทียบกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น พบว่าการกำจัดที่สภาวะ PEC มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลดลงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ดังแสดงรูปภาพการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่างานเพาะเชื้อจุลินทรีย์ของสภาวะ PEC ไม่พบเชื้อ ในขณะที่สภาวะ PC และ EC ยังมีการพบเชื้อเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งสามารถยืนยันประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศได้และเหมาะสมที่พัฒนาเป็นเซลล์ต้นแบบต่อไป

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์รวมเริ่มต้นกับการกำจัดที่สภาวะต่างๆ

Sample	CFU/ml	Log CFU/ml
Control	spreader	≥ 7
PC	3×10^3	3.47
EC	9×10^3	3.95
PEC	$<10^2$	<2

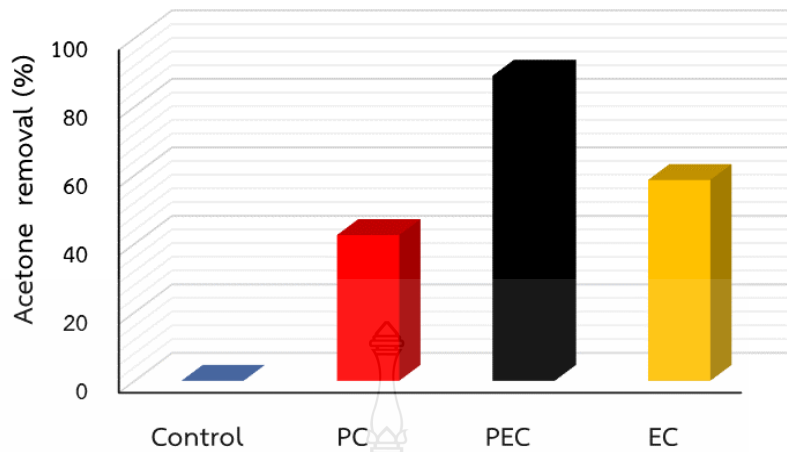


จากผลการศึกษาและพัฒนาเซลล์เคมีไฟฟ้าโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับฟอกอากาศประกอบไปด้วยชั้นไฟฟ้าแอโนดเป็นชั้นไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ชั้นไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลส สตีล ขนาดพื้นที่สัมผัสกับสารละลาย 1×1 cm โดยการจัดวางรูปแบบชั้นไฟฟ้าและสะพานเกลือ แสดงดังภาพที่ 3.5 และมีสภาวะที่เหมาะสม ดังนี้ การใช้สะพานเกลือเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 mm ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ จึงจะส่งผลให้ระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์

4.5 ผลการศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ

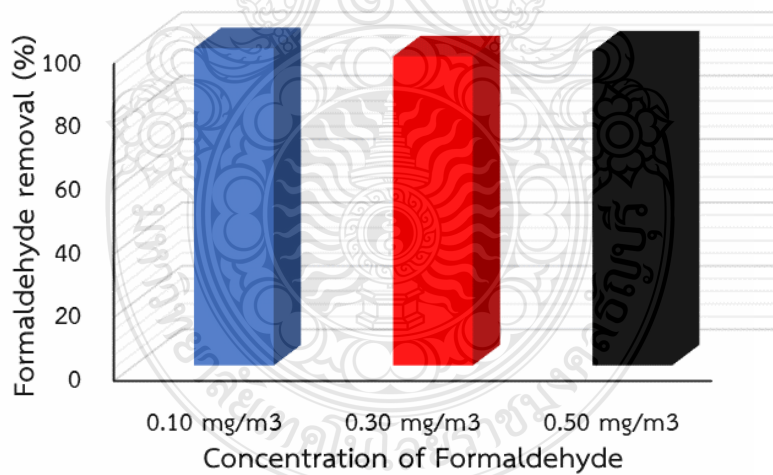
4.5.1 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 1

การออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับฟอกอากาศ เซลล์ต้นแบบที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ได้ศึกษากลไกการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ง่ายอะซิโตน (Acetone; $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) [68,69] กับเซลล์ต้นแบบสำหรับระบบฟอกอากาศที่มีการออกแบบให้อากาศไหลไปในทางเดียวกัน ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า ได้แก่ ระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) โดยจะใช้ชั้นไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ทำหน้าที่เป็นชั้นไฟฟ้าแอโนด และชั้นไฟฟ้าสแตนเลสสตีลทำหน้าที่เป็นชั้นไฟฟ้าแคโทด ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาการให้ศักย์ไฟฟ้า 3 V และแสง LED ระบบโฟโตคะตะไลซิส (PC) ภายใต้การให้แสง LED เพียงอย่างเดียว ระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก (EC) ภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้า 3 V เพียงอย่างเดียว ติดตามผลด้วยการแทนที่ในน้ำและนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ดังแสดงในภาพที่ 4.28 จากการทดลองพบว่าระบบ PEC มีการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายอะซิโตนได้สูงสุดถึง 89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าระบบ EC และ PC ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการให้ศักย์ไฟฟ้าและแสง ส่งผลให้เกิดกระบวนการทำงานบริเวณผิวหน้าชั้นไฟฟ้า เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยแสง LED ให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ดี และมีศักย์ไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้นไฟฟ้าแอโนดไปยังชั้นไฟฟ้าแคโทด จึงทำให้แถบวาเลนซ์เกิดช่องว่างที่มีประจุบวกได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากเซลล์ต้นแบบที่ 1 ยังมีข้อจำกัดการใช้เจลสะพานเกลือที่แห้งได้ง่าย และการจัดวางชั้นไฟฟ้าแอโนดที่ทำให้การไหลของอากาศที่ยังกระจายบริเวณผิวหน้าชั้นไฟฟ้าได้ไม่ดีจึงต้องปรับแก้ในเซลล์ต้นแบบถัดไป



ภาพที่ 4.28 การกำจัดสารระเหยอินทรีย์ง่ายอะซิโตนด้วยกลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบต่างๆของเซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 1

4.5.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยเซลล์ต้นแบบฟอกอากาศแบบที่ 2



ภาพที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันภายในเวลา 5 นาที

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของ สารอินทรีย์ระเหยง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ของเซลล์ ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศแบบที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 3.8 ที่มีการ ออกแบบให้มีการหมุนเวียนของอากาศ และมีการเพิ่มพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามากขึ้น รวมการใช้สะพานเกลือ ให้มีความสะดวกและง่ายต่อการเตรียมและจัดวางในระบบได้ดีขึ้น ซึ่งได้ศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ ($LOD < 0.003 \text{ mg/m}^3$) ที่ความเข้มข้นของ สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ 0.10, 0.30, และ 0.50 mg/m^3 ดังแสดงในภาพที่ 4.29 จากผลการกำจัดของ สารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยระบบ PEC พบว่าสามารถกำจัดได้มากถึง 100% ซึ่งมีการกำจัดได้ดีเมื่อความ เข้มข้นที่สูงขึ้น เมื่อนำสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เข้าระบบในรูปแบบไอของสารระเหยอินทรีย์ เครื่อง ตรวจวัดคุณภาพอากาศสามารถตรวจวัดได้และปริมาณที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงความเข้มข้นที่เป็น อันตรายต่อผู้อยู่อาศัยภายในระบบพื้นที่ ดังแสดงตารางที่ 4.4 งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาประสิทธิภาพของ ระบบ PEC สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 0.50 mg/m^3 เนื่องจาก เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการศึกษาที่ครอบคลุมค่ามาตรฐานการการยอมรับ และยังเป็นการป้องกัน อันตรายจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย อาจส่งผลกระทบต่อผู้ทำการทดลองได้

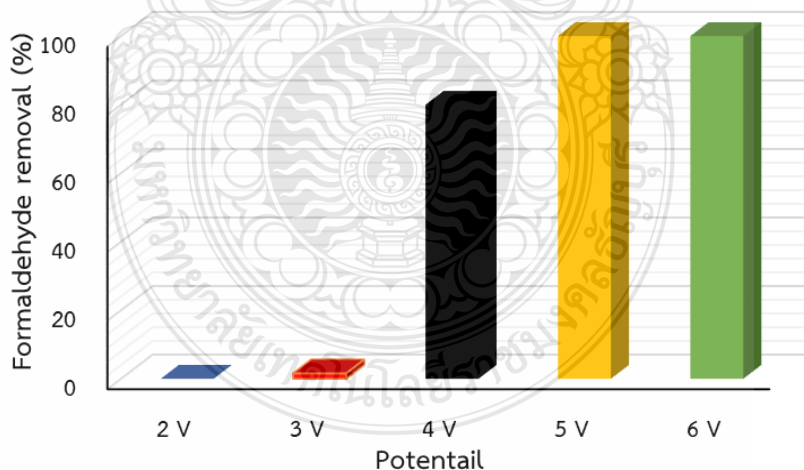
ตารางที่ 4.4 คุณภาพอากาศมาตรฐานจาก Indoor Air Quality Standards

No	Indicator	Unit	Requirement	Remarks
1	Ozone (O_3)	mg/m^3	≤ 0.16	1-hour Average
2	Nitrogen Dioxide (NO_2)	mg/m^3	≤ 0.20	1-hour Average
3	Sulfur Dioxide (SO_2)	mg/m^3	≤ 0.50	1-hour Average
4	Carbon Dioxide (CO_2)	%	≤ 0.10	1-hour Average
5	Ammonia (NH_3)	mg/m^3	≤ 0.20	1-hour Average
6	Formaldehyde (HCHO)	mg/m^3	≤ 0.08	1-hour Average
7	Benzene (C_6H_6)	mg/m^3	≤ 0.03	1-hour Average

Ref: www.ChineseStandard.net

4.5.3 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์ต้นแบบฟอตกาทาคแบบที่ 2

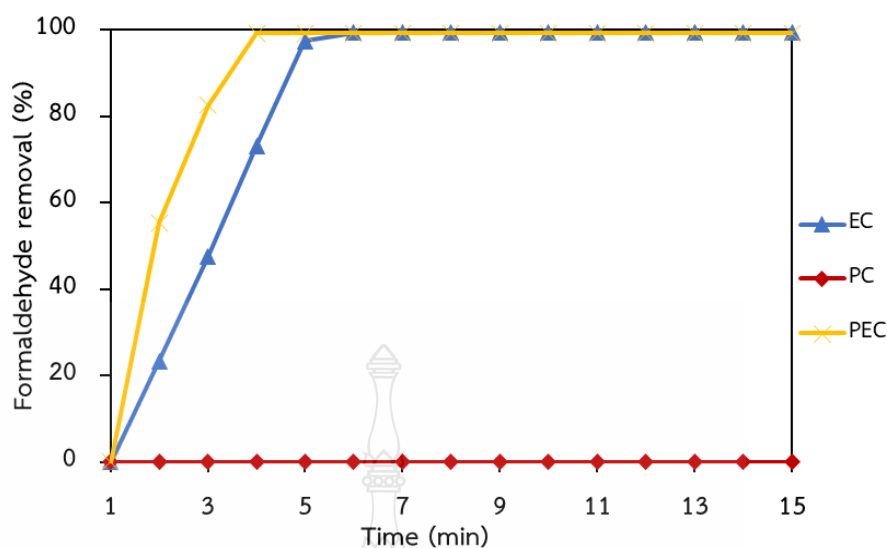
การศึกษาระบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอตกาทาค ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายใต้การให้แสงด้วยหลอดไฟ LED และศักย์ไฟฟ้า โดยศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2 ถึง 6 โวลต์เพื่อประเมินประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังแสดงในภาพที่ 4.30 จากผลการทดลองพบว่าเริ่มเกิดการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ได้เพียงเล็กน้อย จึงเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกให้สูงขึ้นพบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์สามารถกำจัดได้ 80 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มกำจัดได้ดียิ่งขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์เป็นต้นไป ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่มากพอที่จะให้ขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ สามารถทำงานภายใต้แสงและศักย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ดี และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด จึงทำให้แถบวาเลนซ์เกิดช่องว่างที่มีประจุบวกได้มากขึ้น เมื่อสารระเหยอินทรีย์ไปสัมผัสกับบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจึงสามารถออกซิไดซ์ให้เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายในอากาศได้ จึงเลือกใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายและยังเป็นการไม่ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปมากกว่านี้อีกด้วย



ภาพที่ 4.30 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกันภายในเวลา 15 นาที

4.5.4 ผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเซลล์ต้นแบบฟอโตคาทอลิกแบบที่ 2

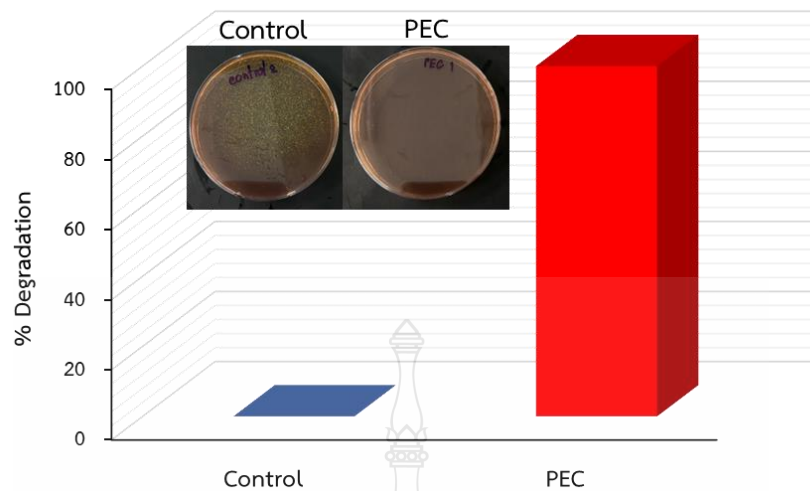
การศึกษากลไกการสลายสารระเหยอินทรีย์ง่ายฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde; HCHO) กับเซลล์ต้นแบบสำหรับระบบฟอโตคาทอลิกที่มีการออกแบบให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศได้ดี ได้ศึกษา กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ระบบโพโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาการให้ศักย์ไฟฟ้า 5 V และแสง LED ระบบโพโตคะตะไลซิส (PC) ภายใต้การให้แสง LED เพียงอย่างเดียว ระบบอิเล็กโทรคะตะไลติก (EC) ภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้า 5 V เพียงอย่างเดียว ติดตามผลเป็นระยะเวลา 15 นาที ดังแสดงภาพที่ 4.31 ระบบ PEC และระบบ EC มีการลดลงของสารระเหยอินทรีย์ที่ใกล้เคียงกันมาก เพียงแต่ระบบ PEC มีการลดลงที่ใช้เวลาที่เร็วกว่าระบบ EC ซึ่งระบบ PC ไม่สามารถกำจัดได้เลย แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าไม่เกิดการทำงานภายใต้การให้แสง เพียงอย่างเดียว เนื่องจากความเข้มแสงที่น้อย จึงส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การกลับมารวมกันของอิเล็กตรอน (Recombination effect) [43,70] ทำให้ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ ในขณะที่ระบบ PEC และ ระบบ EC สามารถกำจัดได้มากถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ การใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ดี และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด จึงทำให้แถบวาเลนซ์เกิดช่องว่างที่มีประจุบวกได้มากขึ้น ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารระเหยอินทรีย์ให้เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายในอากาศได้ ซึ่งระบบ PEC มีการใช้แสง LED มีส่วนช่วยในการกระตุ้นบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอนและช่องว่างประจุบวก และมีการให้ศักย์ไฟฟ้าที่มากพอที่จะเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด จึงลดการเกิดปรากฏการณ์การกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนได้ ส่งผลให้เกิดการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ได้เร็วกว่าระบบ EC ที่ให้ศักย์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว [71,72] เป็นการยืนยันได้ว่าเซลล์ต้นแบบ PEC สำหรับระบบฟอโตคาทอลิกสามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds; VOCs) ในอากาศได้นั่นเอง



ภาพที่ 4.31 กลไกการเร่งปฏิกิริยากับการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ฟอร์มัลดีไฮด์กับระยะเวลาในการกำจัดที่ระยะเวลา 15 นาที

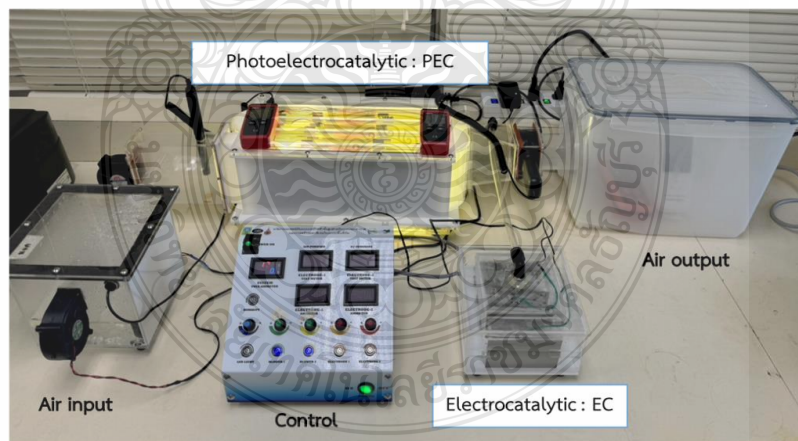
4.5.6 ศึกษาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศด้วยเซลล์ต้นแบบที่ 2

การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศ ได้ศึกษาเชื้อจุลินทรีย์ *S.aureus* เป็นตัวแทนเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศที่ก่อให้เกิดโรคได้ โดยศึกษาเชื้อเริ่มต้นในสารละลายน้ำปริมาณ 10 Log CFU/ml และนำเข้าสู่ระบบ PEC ในรูปของละอองน้ำ การศึกษากระบวนการกำจัดด้วย PEC ที่เวลา 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.32 ได้ศึกษาที่สภาวะภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ และแสง LED เปรียบเทียบกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น พบว่าสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงรูปภาพการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่างานเพาะเชื้อจุลินทรีย์ของสภาวะ PEC ไม่พบเชื้อ ซึ่งสามารถยืนยันประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.32 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *S.aureus* ของเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ระยะเวลา 10 นาที

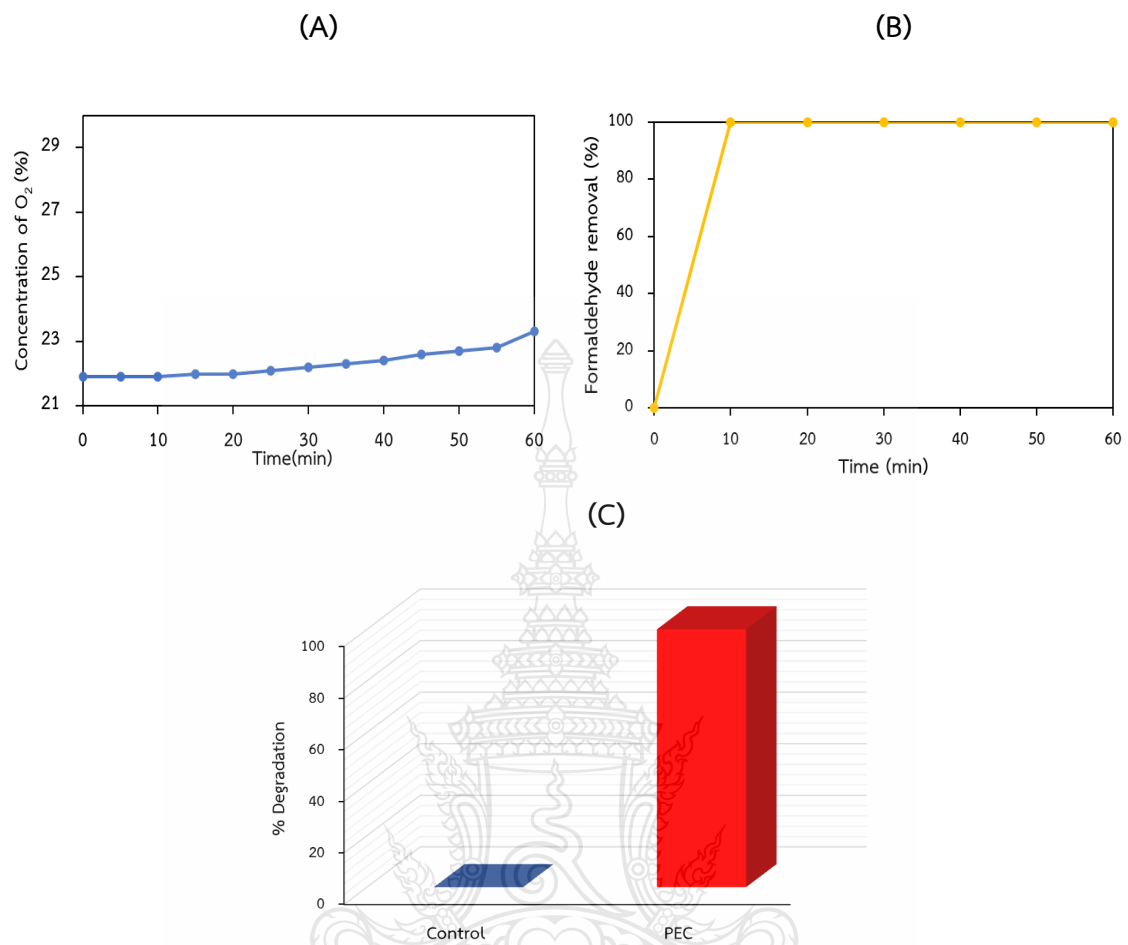
4.5.7 การทดสอบการทำงานร่วมกันของเซลล์ต้นแบบระบบฟอกอากาศและเพิ่มออกซิเจนด้วยเซลล์ต้นแบบที่ 2



ภาพที่ 4.33 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบฟอกอากาศ (PEC cell) และเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศ (EC cell) แบบที่ 2

การศึกษาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูงแบบที่ 2 ประกอบไปด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลต์สำหรับฟอกอากาศและเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลต์สำหรับเพิ่มออกซิเจนในอากาศ การทำงานร่วมกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูง ดังแสดงภาพที่ 4.33 ได้ศึกษาการจัดสารระเหยอินทรีย์ง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ พร้อมกับการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเวลาเดียวกัน เป็นระยะเวลา 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.34 จากภาพ (A) พบว่าเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลต์สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ 23.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อความต้องการ โดยปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมต่อผู้อยู่อาศัยในช่วง 19.5-23.5% (B) แสดงการจัดสารระเหยอินทรีย์ฟอร์มัลดีไฮด์ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ (C) การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *S.aureus* ในอากาศ สามารถกำจัดได้มากถึง 100 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบการทำงานร่วมกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูงแสดงให้เห็นว่าสามารถฟอกอากาศกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือมลภาวะ เชื้อจุลินทรีย์ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มออกซิเจนในเวลาเดียวกัน แต่ยังต้องมีการพัฒนาระบบการเพิ่มออกซิเจนในพื้นที่ขนาดใหญ่ยังต้องใช้เวลาที่มากกว่านี้จึงจะมีประสิทธิภาพที่สูงและต้องปรับปรุงการออกแบบระบบให้เหมาะสมและระวังการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในระบบที่อาจทำให้เกิดคาร์บอนนอกไซด์ได้





ภาพที่ 4.34 การทำงานร่วมกันของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูง (A) การเพิ่มขึ้นของปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของการกำจัดสารระเหยอินทรีย์ง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ระยะเวลา 60 นาที (C) เปอร์เซ็นต์การลดลงของการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *S.aureus* ในอากาศ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้า และได้ศึกษาเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติกเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในอากาศและพัฒนาเป็นเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าชั้นสูงสำหรับระบบฟอกอากาศด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและเพิ่มปริมาณออกซิเจนด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษาและพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้าบิสมัททังสเตท (Bi_2WO_6) บนกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (FTO) ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (CVD) จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ ด้วยเทคนิค CVD คือช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ -0.8 V ถึง $+0.8 \text{ V}$ ที่อัตราการสแกน 50 mV/s จำนวน 30 รอบ ที่อุณหภูมิ 80°C องศาเซลเซียส และได้ศึกษาอุณหภูมิของการเผาชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ โดยพิจารณาเลือกสภาวะที่ดีที่สุดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และผลการศึกษาคูณลักษณะต่าง ๆ ของชั้นไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นยังสอดคล้องไปในทางเดียวกับคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก พบว่าการเผาชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ ที่อุณหภูมิ 450°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่งผลให้มีสมบัติการดูดกลืนแสงที่ดีในช่วงที่ตามองเห็น มีลักษณะสัณฐานวิทยาการกระจายตัวและสม่ำเสมอของฟิล์มบาง Bi_2WO_6 ที่ผิวหน้ากระจก FTO มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่าง WO_3 และ Bi_2WO_6 มีสมบัติความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ต่ำที่สุดทำให้การส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าดีที่สุด แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเทคนิคการเตรียมชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ เหมาะสำหรับการประยุกต์ในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าวิธี CVD ยังมีข้อจำกัดในการเตรียมชั้นไฟฟ้าขนาดใหญ่ จึงได้ศึกษาและเปรียบเทียบกับเทคนิค Automatic Dip coating สำหรับการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำทังสเตนออกไซด์และบิสมัทวานาเดต ($\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$) ทั้งคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ พบว่าชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ และมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาและประยุกต์ใช้กับเซลล์ต้นแบบสำหรับระบบฟอกอากาศด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกต่อไป

จากการศึกษาและพัฒนาการออกแบบเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจนด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติกและระบบฟอกอากาศด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ส่วนที่ 1 สามารถออกแบบระบบเพิ่มปริมาณออกซิเจนด้วยเซลล์อิเล็กโทรคะตะไลติก พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล จำนวน 1 ขั้ว และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล ขนาดพื้นที่ต่อปริมาตรเท่ากับ $0.04 \text{ cm}^2/\text{ml}$ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaOH ที่ความเข้มข้น 1.3 M ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5 V ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนสูงสุดถึง 30% ที่ระยะเวลา 25 นาที ส่วนที่ 2 สามารถออกแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์แบบที่ 1 โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็น FTO/ WO_3 / BiVO_4 ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล สามารถยืนยันได้ว่าการใช้สะพานเกลือในระบบมีผลอย่างมากในการเกิดกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ออกแบบเซลล์ต้นแบบระบบฟอกอากาศด้วยเซลล์ PEC แบบที่ 2 ให้มีลักษณะการไหลเวียนของอากาศเสียให้สัมผัสบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้มากที่สุด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 จำนวน 12 ขั้ว ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล จำนวน 2 ขั้ว ซึ่งสามารถยืนยันประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศที่ความเข้มข้น $0.50 \text{ mg}/\text{m}^3$ และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *S.aureus* ในอากาศ โดยสามารถกำจัดอินทรีย์ระเหยง่ายและเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 100% ซึ่งทำให้คุณภาพอากาศอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมและไม่เป็นอันตรายต่อผู้อยู่อาศัย

ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถยืนยันได้ถึงความสำเร็จในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบสำหรับฟอกอากาศด้วยเซลล์ PEC และการเพิ่มปริมาณออกซิเจนด้วยเซลล์ EC ที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศและสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งเหมาะที่จะพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นระบบฟอกอากาศในระบบพื้นที่ปิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

บรรณานุกรม

- [1] S.V. Mohite, V.V. Ganbavle, K.Y. Rajpure, Solar photoelectrocatalytic activities of rhodamine-B using sprayed WO_3 photoelectrode, *Journal of Alloys and Compounds* 655 (2016) 106-113.
- [2] Y.M. Hunge, A.A. Yadav, M.A. Mahadik, V.L. Mathe, C.H. Bhosale, A highly efficient visible-light responsive sprayed WO_3/FTO photoanode for photoelectrocatalytic degradation of brilliant blue, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 85 (2018) 273-281.
- [3] R.S. Pedanekar, S.K. Shaikh, K.Y. Rajpure, Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review, *Current Applied Physics* 20(8) (2020) 931-952.
- [4] S.S. Soumya, Effect of annealing temperature on the electrical and photoluminescence properties of tin oxide thin films prepared by sol-gel spin coating technique, *Materials Today: Proceedings* 46 (2021) 5748-5751.
- [5] D.R. T, S.J. A, L. S, Studies on structural and optical properties of Cobalt doped ZnO thin films prepared by Sol-gel spin coating technique, *Materials Today: Proceedings* 43 (2021) 3166-3168.
- [6] P. Alulema-Pullupaxi, L. Fernandez, A. Debut, C.P. Santacruz, W. Villacis, C. Fierro, P.J. Espinoza-Montero, Photoelectrocatalytic degradation of glyphosate on titanium dioxide synthesized by sol-gel/spin-coating on boron doped diamond (TiO_2/BDD) as a photoanode, *Chemosphere* 278 (2021) 130488.
- [7] W. Nareejun, C. Ponchio, Novel photoelectrocatalytic/solar cell improvement for organic dye degradation based on simple Automatic Dip coating $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ photoanode electrode, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 212 (2020).
- [8] B. Al Farsi, T.M. Souier, F. Al Marzouqi, M. Al Maashani, M. Bououdina, H.M. Widatallah, M. Al Abri, Structural and optical properties of visible active photocatalytic Al doped ZnO nanostructured thin films prepared by dip coating, *Optical Materials* 113 (2021).

- [9] T. Xia, M. Chen, L. Xiao, W. Fan, B. Mao, D. Xu, P. Guan, J. Zhu, W. Shi, Dip-coating synthesis of P-doped BiVO₄ photoanodes with enhanced photoelectrochemical performance, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 93 (2018) 582-589.
- [10] D. Xu, L. Li, W. Fan, F. Wang, H. Bai, B. Mao, W. Shi, Preparation of WO₃ thin films by dip film-drawing for photoelectrochemical performance, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 27(5) (2019) 1207-1211.
- [11] W. Liu, Y. Yang, F. Zhan, D. Li, Y. Li, X. Tang, W. Li, J. Li, Ultrafast fabrication of nanostructure WO₃ photoanodes by hybrid microwave annealing with enhanced photoelectrochemical and photoelectrocatalytic activities, *International Journal of Hydrogen Energy* 43(18) (2018) 8770-8778.
- [12] S. Arunpandiyan, A. Raja, S. Bharathi, A. Arivarasan, Fabrication of ZnO/NiO:rGO coated Ni foam binder-free electrode via hydrothermal method for supercapacitor application, *Journal of Alloys and Compounds* 883 (2021).
- [13] D. Coelho, J.P.R.S. Gaudêncio, S.A. Carminati, F.W.P. Ribeiro, A.F. Nogueira, L.H. Mascaro, Bi electrodeposition on WO₃ photoanode to improve the photoactivity of the WO₃/BiVO₄ heterostructure to water splitting, *Chemical Engineering Journal* 399 (2020).
- [14] P. Chatchai, A.Y. Nosaka, Y. Nosaka, Photoelectrocatalytic performance of WO₃/BiVO₄ toward the dye degradation, *Electrochimica Acta* 94 (2013) 314-319.
- [15] S. Mesones, E. Mena, M.J. López-Muñoz, C. Adán, J. Marugán, Synergistic and antagonistic effects in the photoelectrocatalytic disinfection of water with TiO₂ supported on activated carbon as a bipolar electrode in a novel 3D photoelectrochemical reactor, *Separation and Purification Technology* 247 (2020).
- [16] J. Xu, H. Olvera-Vargas, B.J.H. Loh, O. Lefebvre, FTO-TiO₂ photoelectrocatalytic degradation of triphenyltin chloride coupled to photoelectro-Fenton: A mechanistic study, *Applied Catalysis B: Environmental* 271 (2020).
- [17] J. Zhang, B. Tang, G. Zhao, Selective photoelectrocatalytic removal of dimethyl phthalate on high-quality expressed molecular imprints decorated specific facet of single crystalline TiO₂ photoanode, *Applied Catalysis B: Environmental* 279 (2020).

- [18] L. Wang, Y. Wei, R. Fang, J. Wang, X. Yu, J. Chen, H. Jing, Photoelectrocatalytic CO₂ reduction to ethanol via graphite-supported and functionalized TiO₂ nanowires photocathode, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 391 (2020).
- [19] F. Mu, B. Dai, W. Zhao, L. Zhang, J. Xu, X. Guo, A review on metal-organic frameworks for photoelectrocatalytic applications, *Chinese Chemical Letters* 31(7) (2020) 1773-1781.
- [20] P. Chatchai, Y. Murakami, S.-y. Kishioka, A.Y. Nosaka, Y. Nosaka, Efficient photocatalytic activity of water oxidation over WO₃/BiVO₄ composite under visible light irradiation, *Electrochimica Acta* 54(3) (2009) 1147-1152.
- [21] P. Chatchai, S.-y. Kishioka, Y. Murakami, A.Y. Nosaka, Y. Nosaka, Enhanced photoelectrocatalytic activity of FTO/WO₃/BiVO₄ electrode modified with gold nanoparticles for water oxidation under visible light irradiation, *Electrochimica acta* 55(3) (2010) 592-596.
- [22] N. Kiama, C. Ponchio, Photoelectrocatalytic performance improvement of BiVO₄ thin film fabrication via effecting of calcination temperature strategy, *Surface and Coatings Technology* 383 (2020).
- [23] J. Xue, J. Li, Q. Bi, C. Tang, L. Zhang, Z. Leng, Yb-substitution triggered BiVO₄-Bi₂O₃ heterojunction electrode for photoelectrocatalytic degradation of organics, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 593 (2020).
- [24] F. Supanantin, C. Ponchio, Improvement ITO/WO₃ photo anode electrode fabrication using electrodeposition technique for highly efficient photoelectrocatalytic insecticide degradation, *Materials Science in Semiconductor Processing* 118 (2020).
- [25] S. Limwichean, P. Eiamchai, C. Ponchio, N. Kasayapanand, M. Horprathum, Comparative investigations of DCMS/HiPIMS reactively sputtered WO₃ thin films for photo-electrochemical efficiency enhancements, *Vacuum* 185 (2021).
- [26] N. Kangkun, N. Kiama, N. Saito, C. Ponchio, Optical properties and photoelectrocatalytic activities improvement of WO₃ thin film fabricated by fixed-potential deposition method, *Optik* 198 (2019).

- [27] B.S. Kalanoor, H. Seo, S.S. Kalanur, Recent developments in photoelectrochemical water-splitting using $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ heterojunction photoanode: A review, *Materials Science for Energy Technologies* 1(1) (2018) 49-62.
- [28] L. Xia, J. Bai, J. Li, Q. Zeng, X. Li, B. Zhou, A highly efficient $\text{BiVO}_4/\text{WO}_3/\text{W}$ heterojunction photoanode for visible-light responsive dual photoelectrode photocatalytic fuel cell, *Applied Catalysis B: Environmental* 183 (2016) 224-230.
- [29] Z. Liu, Q. Wang, W. Rong, R. Jin, Y. Cui, S. Gao, CTAB assisted hydrothermal preparation of $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{WO}_3$ nanosheets on TiO_2 nanotube arrays for photoelectrocatalytic applications, *Separation and Purification Technology* 200 (2018) 191-197.
- [30] J. Li, Z. Liang, L. Guo, N. Lei, Q. Song, Flower-like Bi_2WO_6 with oxygen vacancies achieving enhanced photoelectrocatalytic performance, *Materials Letters* 223 (2018) 93-96.
- [31] X. Zhao, T. Xu, W. Yao, C. Zhang, Y. Zhu, Photoelectrocatalytic degradation of 4-chlorophenol at Bi_2WO_6 nanoflake film electrode under visible light irradiation, *Applied Catalysis B: Environmental* 72(1-2) (2007) 92-97.
- [32] K. Akrawinthawong, K. Majkut, S. Ferreira, A. Mehdirdad, Voltage-Dependent Inappropriate Right Ventricular Capture by Right Atrial Lead Pacing as a Cause of Cardiac Resynchronization Therapy Non-Responder, *Journal of the American College of Cardiology* 69(11) (2017).
- [33] B. Gao, M. Sun, W. Ding, Z. Ding, W. Liu, Decoration of γ -graphyne on TiO_2 nanotube arrays: Improved photoelectrochemical and photoelectrocatalytic properties, *Applied Catalysis B: Environmental* 281 (2021).
- [34] W. Srevarit, S. Moonmangmee, P. Phapugrangkul, S. Kuboon, A. Klamchuen, N. Saito, C. Ponchio, Photoelectrocatalytic H_2 evolution enhancement over CuO -decorated TiO_2 nanocatalysts and promoting *E. coli* degradation, *Journal of Alloys and Compounds* 859 (2021).
- [35] R.D. Suryavanshi, S.V. Mohite, A.A. Bagade, K.Y. Rajpure, Photoelectrocatalytic activity of spray deposited $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ photoelectrode for degradation of salicylic acid and methyl orange dye under solar radiation, *Materials Science and Engineering: B* 248 (2019).

- [36] Y.M. Hunge, M.A. Mahadik, A.V. Moholkar, C.H. Bhosale, Photoelectrocatalytic degradation of phthalic acid using spray deposited stratified WO_3/ZnO thin films under sunlight illumination, *Applied Surface Science* 420 (2017) 764-772.
- [37] L. Zhou, Y. Wu, L. Wang, Y. Yang, Y. Na, Excellent performance of water oxidation at low bias potential achieved by transparent $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ photoanode integrated with molecular nickel porphyrin, *Inorganic Chemistry Communications* 107 (2019).
- [38] V.S. Kumbhar, H. Lee, J. Lee, K. Lee, Interfacial growth of the optimal BiVO_4 nanoparticles onto self-assembled WO_3 nanoplates for efficient photoelectrochemical water splitting, *J Colloid Interface Sci* 557 (2019) 478-487.
- [39] A.S. Martins, A. Lachgar, M.V. Boldrin Zanoni, Sandwich Nylon/stainless-steel/ WO_3 membrane for the photoelectrocatalytic removal of Reactive Red 120 dye applied in a flow reactor, *Separation and Purification Technology* 237 (2020).
- [40] Y. Xu, J. Jia, D. Zhong, Y. Wang, Degradation of dye wastewater in a thin-film photoelectrocatalytic (PEC) reactor with slant-placed TiO_2/Ti anode, *Chemical Engineering Journal* 150(2-3) (2009) 302-307.
- [41] G.G. Bessegato, L.C. de Almeida, S.L.C. Ferreira, M.V.B. Zanoni, Experimental design as a tool for parameter optimization of photoelectrocatalytic degradation of a textile dye, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(4) (2019).
- [42] N. Kiama, C. Ponchio, Photoelectrocatalytic reactor improvement towards oil-in-water emulsion degradation, *J Environ Manage* 279 (2021) 111568.
- [43] X. Meng, Z. Zhang, X. Li, Synergetic photoelectrocatalytic reactors for environmental remediation: a review, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 24 (2015) 83-101.
- [44] M.I. Jaramillo-Gutiérrez, E.P. Rivero, M.R. Cruz-Díaz, M.E. Niño-Gómez, J.A. Pedraza-Avella, Photoelectrocatalytic hydrogen production from oilfield-produced wastewater in a filter-press reactor using TiO_2 -based photoanodes, *Catalysis Today* 266 (2016) 17-26.
- [45] C. Pablos, J. Marugán, C. Adán, M. Osuna, R. van Grieken, Performance of TiO_2 photoanodes toward oxidation of methanol and *E. coli* inactivation in water in a scaled-up photoelectrocatalytic reactor, *Electrochimica Acta* 258 (2017) 599-606.

- [46] N.K. Eswar, S.A. Singh, G. Madras, Photoconductive network structured copper oxide for simultaneous photoelectrocatalytic degradation of antibiotic (tetracycline) and bacteria (*E. coli*), *Chemical Engineering Journal* 332 (2018) 757-774.
- [47] J. Mo, Y. Zhang, Q. Xu, J.J. Lamson, R. Zhao, Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review, *Atmospheric Environment* 43(14) (2009) 2229-2246.
- [48] A.H. Mamaghani, F. Haghighat, C.-S. Lee, Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art, *Applied Catalysis B: Environmental* 203 (2017) 247-269.
- [49] B.O. Orimolade, O.A. Arotiba, Bismuth vanadate in photoelectrocatalytic water treatment systems for the degradation of organics: A review on recent trends, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 878 (2020).
- [50] F. Fang, Y. Zhang, J. Bai, J. Li, X. Mei, C. Zhou, M. Zhou, B. Zhou, Efficient urine removal, simultaneous elimination of emerging contaminants, and control of toxic chlorate in a photoelectrocatalytic-chlorine system, *Environ Pollut* 267 (2020) 115605.
- [51] O.A. Arotiba, B.O. Orimolade, B.A. Koiki, Visible light-driven photoelectrocatalytic semiconductor heterojunction anodes for water treatment applications, *Current Opinion in Electrochemistry* 22 (2020) 25-34.
- [52] W. He, Y. Sun, G. Jiang, H. Huang, X. Zhang, F. Dong, Activation of amorphous Bi_2WO_6 with synchronous Bi metal and Bi_2O_3 coupling: Photocatalysis mechanism and reaction pathway, *Applied Catalysis B: Environmental* 232 (2018) 340-347.
- [53] Z.-Q. Li, X.-T. Chen, Z.-L. Xue, Microwave-assisted synthesis and photocatalytic properties of flower-like Bi_2WO_6 and Bi_2O_3 - Bi_2WO_6 composite, *Journal of colloid and interface science* 394 (2013) 69-77.
- [54] Z. Wang, L. Zhang, X. Zhang, C. Hu, L. Wang, B. Shi, X. Cao, Enhanced photocatalytic destruction of pollutants by surface W vacancies in VW- Bi_2WO_6 under visible light, *Journal of Colloid and Interface Science* 576 (2020) 385-393.
- [55] Y. Liang, J. Shi, Effect of Halide Ions on the Microstructure of Bi_2WO_6 with Enhanced Removal of Rhodamine B, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 30 (2020) 2872-2880.

- [56] F. Liu, X. Chen, Q. Xia, L. Tian, X. Chen, Ultrathin tungsten oxide nanowires: oleylamine assisted nonhydrolytic growth, oxygen vacancies and good photocatalytic properties, *RSC advances* 5(94) (2015) 77423-77428.
- [57] N. Minh Vuong, D. Kim, H. Kim, Porous Au-embedded WO_3 nanowire structure for efficient detection of CH_4 and H_2S , *Scientific reports* 5(1) (2015) 1-13.
- [58] N. Kangkun, C. Ponchio, Photoelectrodeposition of BiVO_4 layer on FTO/WO_3 photoanodes for highly efficient photoelectrocatalytic chemical oxygen demand sensor applications, *Applied Surface Science* 526 (2020) 146686.
- [59] A.A. Ibrahim, I. Khan, N. Iqbal, A. Qurashi, Facile synthesis of tungsten oxide – bismuth vanadate nanoflakes as photoanode material for solar water splitting, *international journal of hydrogen energy* 42(5) (2017) 3423-3430.
- [60] K. Wang, X. Wang, Z. Li, B. Yang, M. Ling, X. Gao, J. Lu, Q. Shi, L. Lei, G. Wu, Designing 3d dual transition metal electrocatalysts for oxygen evolution reaction in alkaline electrolyte: Beyond oxides, *Nano Energy* 77 (2020) 105162.
- [61] X. Yin, G. Sun, L. Wang, L. Bai, L. Su, Y. Wang, Q. Du, G. Shao, 3D hierarchical network NiCo_2S_4 nanoflakes grown on Ni foam as efficient bifunctional electrocatalysts for both hydrogen and oxygen evolution reaction in alkaline solution, *International Journal of Hydrogen Energy* 42(40) (2017) 25267-25276.
- [62] D. Li, D. Chen, P. Liang, Influence of oxygen content on the corrosion behaviour of 316 L stainless steel in the simulated cathodic environment of proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Alloys and Compounds* 873 (2021) 159695.
- [63] N. Soliman, Factors affecting CO oxidation reaction over nanosized materials: A review, *Journal of Materials Research and Technology* 8(2) (2019) 2395-2407.
- [64] D. Liu, R. Tian, J. Wang, E. Nie, X. Piao, X. Li, Z. Sun, Photoelectrocatalytic degradation of methylene blue using F doped TiO_2 photoelectrode under visible light irradiation, *Chemosphere* 185 (2017) 574-581.
- [65] Y.-H. Wu, T. Wu, Y.-W. Lin, Photoelectrocatalytic degradation of methylene blue on cadmium sulfide-sensitized titanium dioxide film, *Materials Research Bulletin* 118 (2019) 110500.

- [66] Y. Gong, J. Wang, Z. Cheng, Z. Han, X. Zhao, B. Chai, Y. Han, Developing high-quality g-C₃N₄ film electrode for the photoelectrocatalytic degradation of methylene blue in water, *Chinese Chemical Letters* 34(3) (2023) 107535.
- [67] S. Seveda, T. Sreekrishnan, Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater, *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 47(6) (2012) 878-886.
- [68] X. Mu, H. Ding, W. Pan, Q. Zhou, W. Du, K. Qiu, J. Ma, K. Zhang, Research progress in catalytic oxidation of volatile organic compound acetone, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4) (2021) 105650.
- [69] Y. Li, W.-H. Li, C.-S. Yuan, C.-H. Hung, H. Shen, Photoelectrocatalytic degradation of gaseous acetone using electrical glassfiber filter coated with nano-sized TiO₂ photoelectrocatalyst, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 77 (2017) 187-195.
- [70] X. Zhang, X. Liang, M. Xu, J. Wang, F. Wang, M. Chen, In situ recombination for durable photoelectrocatalytic degradation of organic dye in wastewater, *Chemosphere* 312 (2023) 137237.
- [71] A. Safavi, N. Maleki, F. Farjami, E. Farjami, Electrocatalytic oxidation of formaldehyde on palladium nanoparticles electrodeposited on carbon ionic liquid composite electrode, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 626(1-2) (2009) 75-79.
- [72] C. Nie, L. Liu, R. He, Pt/TiO₂-ZnO in a circuit Photo-electro-catalytically removed HCHO for outstanding indoor air purification, *Separation and Purification Technology* 206 (2018) 316-323.

ภาคผนวก



ภาคผนวก

การเผยแพร่ผลงาน



ตีพิมพ์ผลงานวิจัยใน Progress in applied science and technology , Accepted:
November 03, 2023



Research Article

Received: August 22, 2023
Revised: October 21, 2023
Accepted: November 03, 2023

DOI: 10.14456/past.2023.250631

Fabrication of a $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ Composite Electrode by Electrodeposition and its Application for Microbial Degradation

Chotika Sangthong¹ and Chatchai Ponchio^{*1,2}

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

² Advanced Photochemical and Electrochemical Materials (APEM) Research Unit, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*E-mail: chatchai@rmutt.ac.th

Abstract

Photoelectrocatalytic (PEC) techniques are an innovative and promising method for eliminating microorganisms. Developing and applying such advanced technologies is essential for protecting public health and the environment. Semiconductor electrode development is a major issue in the advancement of such methods. We have developed a technique for fabricating $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes using cyclic voltammetry (CV), focusing on the efficiency of the reaction and investigating key aspects for its use in microbial degradation. The optimization of the CV method parameter and calcination temperature was conducted in order to enhance the characteristics of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes for the aqueous oxidation process. The properties of the fabricated composited $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode were analyzed by several techniques, including UV-visible spectrophotometry, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and electrochemical impedance spectroscopy. The PEC water oxidation and total microorganism elimination efficiencies were investigated to validate the application of the developed composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode properties. The characteristics of the prepared composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes are significantly influenced by the calcination temperature. We were able to satisfactorily verify the electrodes' properties in a reaction involving different calcining temperatures. At a calcining temperature of 450 °C, $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes exhibited excellent PEC activity in water oxidation and electron transfer rate at the electrode surface. The composited $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode can effectively remove 96% of total microorganisms under the PEC process within 15 minutes. This study provides important background information for future work on composite semiconductor thin film preparations with potential applications in microbe eradication and environmental protection.

Keywords: Photoelectrocatalytic Method, Microorganisms Elimination, Composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$

1. Introduction

Microbial contamination in water sources is a big issue that has an impact on the quality of life of those who rely on that water for survival. As a result, a highly effective technique must be devised to eradicate such toxins as soon as possible before releasing them into the

environment. The photoelectrocatalytic (PEC) oxidation process is an alternate technological approach to addressing water pollution, which includes the eradication of microorganisms in natural water sources (1-7). The advancement of this approach has aided in the selection of appropriate semiconductors as well as the

different electrode properties (5, 7, 8). The effect of calcination temperature on the morphology, optical properties, chemical composition, and crystal structure of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ thin films synthesized by the CV technique for water oxidation and total microbial elimination in water is described. This research could potentially be helpful in the development of semiconductor thin film preparations using electrochemical methods, as well as in utilizing those preparations for the purpose of PEC cells aimed at the degradation of microorganisms.

2. Materials and Experiment

2.1 Materials

All chemicals in the analytical grade and all solutions throughout the experiments were prepared using deionized water. Diethylenetriamine pentaacetic acid; DTPA (Sigma Aldrich), Ammonium hydroxide; NH_4OH (J.T.Baker), Bismuth(III)oxide; Bi_2O_3 (Sigma Aldrich), Ammonium metatungstate hydrate; $(\text{NH}_4)_6\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}\cdot\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich), Nitric acid; HNO_3 (Univar), Hydrogen peroxide; H_2O_2 (Chem-supply), Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (Rel Labscan), Sodium chorine; NaCl (Kemaus), Methylene blue; $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ (KEMAUS) Sodium hydroxide; NaOH (Univar) and Fluorine doped tin oxide; (FTO with dimension of $2\times 2\text{ cm}^2$; Bangkok solar co.ltd., THAILAND).

2.2 Composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode preparation

The conductive glass fluorine doped tin oxide (FTO) base was cleaned by sonicating it for 10 minutes in a solution of detergent, 3 M NaOH , ethanol, and deionized water, respectively. To make the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ precursor solution, 0.83 g of diethylenetriamine pentaacetic acid (DTPA) was dissolved in 2.5 ml of 30% ammonia solution (NH_4OH), and the end amount was brought up to 50 ml by adding deionization water. The solution was stirred, and then 0.4 g of bismuth (III) oxide (Bi_2O_3) and 0.15 g of ammonium metatungstate hydrate ($(\text{NH}_4)_6\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}\cdot\text{H}_2\text{O}$) were added. The solution was stirred at 80°C until it was uniform. The solution was then mixed efficiency of fabricating a thin layer of semiconductors on an electrode substrate. Bismuth-tungstate (Bi_2WO_6) and tungsten oxide (WO_3) are a promising semiconductor material for the PEC water oxidation due to its narrow band gap energy and

high positive potential of its valence band (9-11). Furthermore, the fabrication process of WO_3 and Bi_2WO_6 semiconductor thin films has significant importance in the advancement of PEC techniques, aiming to achieve electrodes that exhibit high reaction efficiency, long-term durability, and simplified processing methods. The most used technique is hydrothermal, but it also involves a challenging procedure that involves great heat and pressure (12, 13). The sol-gel method is widely used for the fabrication of Bi_2WO_6 and WO_3 films on substrates, owing to its straightforward and cost-effective nature (14, 15). However, this method has a disadvantage in that the film creation process may be time-consuming, and the resulting films may have considerable porosity, decreasing their photocatalytic activity. To overcome the drawbacks of the aforementioned approaches while maintaining semiconductor performance, it is essential to create a process for WO_3 and Bi_2WO_6 film preparation. Bi_2WO_6 and WO_3 film preparation using the electrochemical approach is a viable option because of its precision, scalability, affordability, and low energy requirements (15-18). Therefore, this study has devised an electrochemical method for fabricating composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ films using cyclic voltammetry (CV), which allows for the quality of the films to be controlled by varying parameter settings. There are several benefits to using CV techniques for semiconductor film preparation, such as accurate electrochemical regulation, controllable film thickness, consistent deposition, and high purity levels. However, the application of CV technique for composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ film preparation has not yet been reported, confirming the novelty of this research. We have also investigated the effect of electrode sintering on reaction efficiency and the impact of temperature on with 1,190 μl of nitric acid (HNO_3) and 77 μl of hydrogen peroxide (H_2O_2) for 15 minutes at 80°C . $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ precursor solution was deposited on a cleansed FTO substrate using cyclic voltammetry with a Versa STAT 3 (Princeton Applied Research, Inc.) under the optimized potential range of -0.6 to 0.8 V and scan rate of 50 mV/s for 30 cycles at 80°C . A common three-electrode system consisted of an FTO working electrode, an Ag/AgCl (3 M KCl) reference electrode, and a platinum wire counter electrode. The composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ film on the FTO substrate was taken out, rinsed with

deionized water, and then calcined at 25 °C, 300 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, and 600 °C in the air for 1 hour to study the effects of different calcination temperatures. The optimal condition with the highest photocurrent from the PEC water oxidation process in relation to the distinguishing characteristics electrode were evaluated.

2.3 Characterization and PEC properties study

A UV-VIS spectrophotometer (Shimadzu, UV-2401PC) was used to examine the absorption characteristics of the fabricated $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode. A scanning electron microscope (SEM; JEOL, JSM-6510) was used to investigate the morphology in top views. The chemical state, chemical composition, and crystalline structure were investigated using an X-ray photoelectron spectrometer (JPS-9010TR), an Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX), and an X-ray diffraction (XRD) (JEOL, JDX-3530). In order to validate the presence and characteristics of the produced electrodes, a comparison was conducted between the characteristics of FTO and modified FTO with $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$. The proposed $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes' photoelectrocatalytic water oxidation performance and charge transfer efficiency were studied in 0.5 M Na_2SO_4 electrolyte solution utilizing a potentiostat and electrochemical impedance spectroscopy (METEK, Versa STAT 3).

2.4 PEC microbial elimination efficiency study

As shown in the experimental setup in Figure 1, natural water was used as an actual sample for microbial contamination in water to evaluate the efficiency of the developed PEC cell. The microbial culture medium was prepared using 0.8 g of nutrient bouillon diluted in 100 mL of distilled water, which was then autoclaved at 121 °C at 15 bar pressure for 15 minutes and disposed of in the PEC cell. A 1 mL sample of the solution was collected at 5-minute intervals throughout a 15-minute period. The sample was then placed onto a sterile dish containing agar medium and incubated at a temperature of 37 °C for a duration of 24 hours. The number of microorganisms present on the sterile dish was afterwards determined.

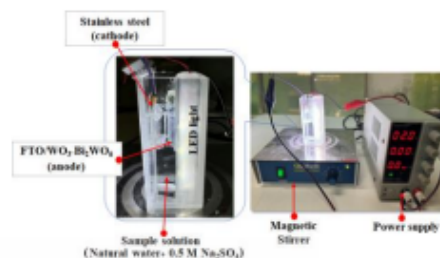


Figure 1 Experimental setup for investigating the degradation of microorganisms utilizing the developed PEC cell.

3. Results and Discussion

3.1 Cyclic Voltammetry Technique for composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ Film Preparation

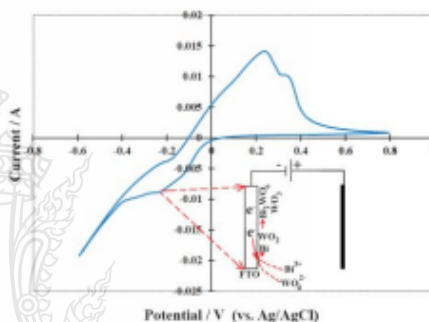


Figure 2 Cyclic voltammogram of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ deposition on FTO substrate and inset of schematic reaction of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ film formation.

Figure 2 depicts the reduction reaction of the precursor solution while varying the voltage from 0.8 to -0.6 V to cause the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ layer to adhere to the FTO electrode surface. The schematic reaction at the FTO substrate is shown in the inset of Figure 2. When a negative potential is introduced, Bi^{3+} and WO_4^{2-} ions agglomerate to create a composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ layer that adheres to the FTO surface. The reduction current occurred in the range of -0.2 V on the cyclic voltammogram, indicating the value of the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ film-forming current at the electrode surface.

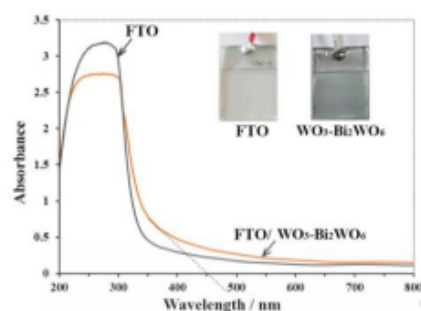


Figure 3 The absorbance properties of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ immobilized on FTO substrate, as well as images of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ film compared to FTO substrate, are shown in the inset.

Figure 3 shows the absorption edge of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ starting at 450 nm, which is consistent with the absorption characteristics of WO_3 and Bi_2WO_6 with a band energy of 2.80 eV (17). The inset of Figure 3 reveals a bright yellow hue of WO_3 and Bi_2WO_6 , which corresponds to the electrode's absorption capabilities in the visible range (19). The findings of the aforementioned investigation indicate the ability of the CV approach to immobilize composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ film, which is a simple, practical, and rapid technology that has been studied extensively.

3.2 Effect of calcination temperature on the fabrication of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes

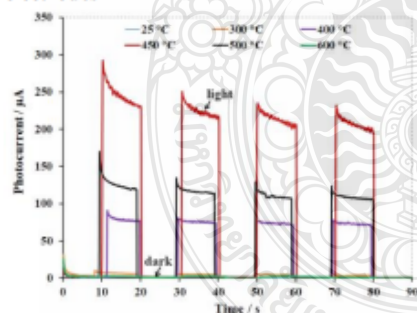


Figure 4 Effect of calcination temperature with photocurrent reaction from water oxidation on the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode developed using the CV method.

Calcination is a thermal treatment process that entails heating the precursor materials to a particular temperature to facilitate the formation of the desired phase and enhance the structural, morphological, and electronic properties of the resulting composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ films. Figure 4 shows how the calcination temperature affects the PEC performance of the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode. This was done by measuring the photocurrent from the water oxidation process under the chopped visible-light illumination at an applied voltage of 1.0 V (versus Ag/AgCl).

PEC activities characteristics were not seen in composited $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes calcined at temperatures lower than 400 °C. We discovered that the electrodes had good reactive characteristics at rising sintering temperatures ranging from 400 °C to 450 °C, and that the reactive qualities decreased with increasing temperatures up to 500 °C. The aforementioned findings show the unique influence of the sintering temperature on the characteristics of the composited $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes in their as-prepared state in relation to thin film characteristics at various sintering temperatures.

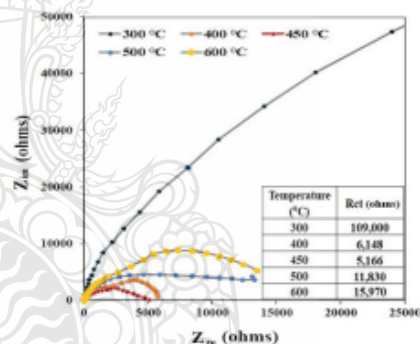


Figure 5 Nyquist diagrams and Ret value of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ prepared by the different calcination temperatures of 300 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, and 600 °C.

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) is a useful method for investigating the charge transfer mechanisms and interfacial properties of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ and gaining insight into its PEC behavior. Figure 5 illustrates the considerable changes in the Nyquist diagram of composite

WO₃-Bi₂WO₆ thin films recorded at different calcination temperatures. The composite WO₃-Bi₂WO₆ electrode that was heated to 450 °C had the smallest hemispherical radius Nyquist plot, which means it had the least charge transfer resistant (R_{ct}) properties at the electrode/electrolyte interface. Figure 5's inset shows that an electrode with the lowest R_{ct} value had the maximum photocurrent value at 450 °C, which may help to explain how the best electron transfer process is affected by proper sintering.

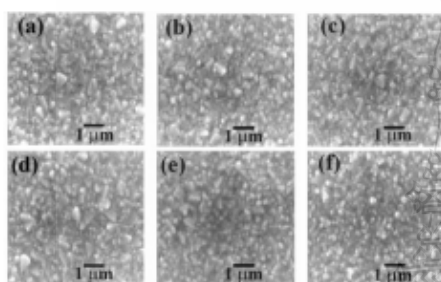


Figure 6 SEM micrographs of composite WO₃-Bi₂WO₆ electrodes prepared at various annealing temperatures: (a) 25 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C, (d) 450 °C, (e) 500 °C, and (f) 600 °C.

Figure 6 shows that morphological changes are dependent on increasing calcination temperature from 25 °C to 600 °C, whereas surface roughness and porosity of composite WO₃-Bi₂WO₆ thin films do not change significantly from 25 °C to 400 °C. At 450 °C, the arrangement of particles becomes uniform, resulting in an efficient electron transfer process. However, as temperatures rise to 500 °C and 600 °C, the particles begin to rearrange due to excessive high-temperature fusing and the influence of electron transfer. This result demonstrates that calcination at a high temperature of approximately 500 °C induces observable morphological changes, which influence the physical properties of composite WO₃-Bi₂WO₆ thin films. The optimal calcination temperature for porosity and roughness was determined to be 450 °C.

WO₃-Bi₂WO₆ photoanodes that were calcined at 450 °C exhibited good photoelectrocatalytic activity and electron transfer due to the fact that at that temperature there was a good crystal structure and appropriate morphology, resulting in a higher current value resulting from oxidation reactions at the electrode surface. Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) was used to determine the quantitative elemental analysis of composite WO₃-Bi₂WO₆ electrodes fabricated by cyclic voltammetry. It confirmed the adhesion of composite WO₃-Bi₂WO₆ to the electrode surface and quantified the elements present on the electrode surface. The elements W, Bi, and O were discovered to be placed to the electrode surface.

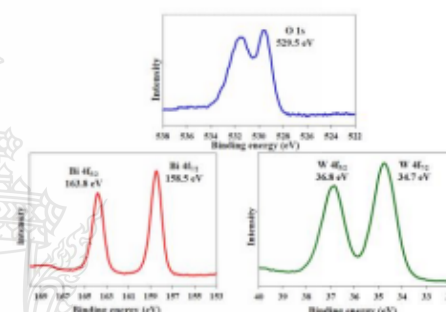


Figure 7 XPS spectra of composite WO₃-Bi₂WO₆ electrodes prepared by cyclic voltammetry.

X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) was employed to validate the oxidation states of individual elements present at the surface of the composite WO₃-Bi₂WO₆ electrode. Figure 7 illustrates the binding energies of several chemical compositions, namely element O1s at 529.5 eV, elements Bi 4f_{5/2} at 163.8 eV and Bi 4f_{7/2} at 158.5 eV, as well as elements W 4f_{5/2} at 36.8 eV and W 4f_{7/2} at 34.7 eV. The O²⁻, Bi³⁺, and W⁶⁺ oxidation numbers in the composite WO₃-Bi₂WO₆ electrode were confirmed (20).

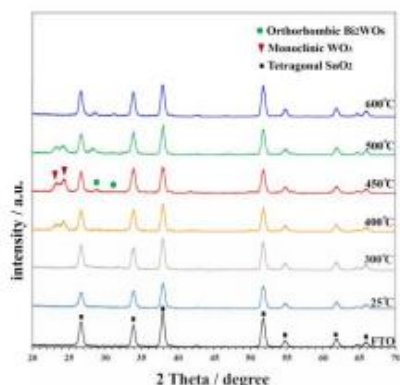


Figure 8 X-ray diffraction patterns of FTO and the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ with various calcination temperatures of 25 °C, 300 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, and 600 °C.

Figure 8 illustrates the XRD patterns of $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ composites prepared at various calcination temperatures. The result demonstrates that the XRD peak at 2θ of 23.2° and 24.5°, related to the monoclinic WO_3 crystal structure, was detected at the calcination temperature of the electrode between 400 and 500 °C (21). At the same calcination temperature range, we also observed XRD peaks at 29.0° and 31.0°, confirming the orthorhombic character of Bi_2WO_6 (22). This XRD result confirms that calcination processes at temperatures between 400 °C and 500 °C can contribute to the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$'s high photoelectrocatalytic properties.

3.3 Microbial elimination efficiency

Figure 9 shows the efficiency of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ photoanode performance for microbial elimination by PEC cell. It was found that the developed PEC cell can eliminate 96% of total microorganisms within 15 min. These investigations' findings support the performance of the produced electrodes in applications involving the removal of microorganisms from samples, and also show that they can be improved for use in water treatment.

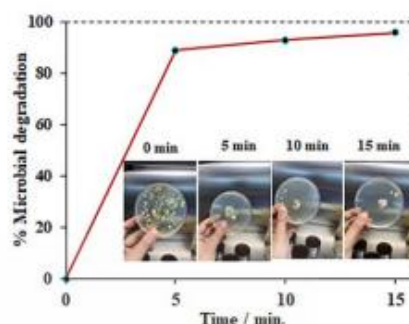


Figure 9 Efficiency of total microbial degradation utilizing a composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode and the PEC process.

4. Conclusions

This study demonstrates the successful fabrication of composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ coatings on FTO substrates using a cyclic voltammetry method. We were able to confirm the developed electrode characteristics along with the PEC properties for water oxidation. The temperature of calcination has a considerable effect on the characteristic and PEC properties of the developed composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrode. The composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes sintered at 450 °C have the highest PEC activity for water oxidation due to their superior crystalline structure and morphology. In accordance with the PEC mechanism, the composite $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ electrodes demonstrated a total microorganism degradation efficiency of 96%. This research is beneficial for the continued development of semiconductor electrodes for use in PEC cells for environmental and public health applications.

Acknowledgments

This work was supported by Research and Researchers for Industries (RRI) project, and Eagle Dream Company Limited (N41A640238).

Declaration of conflicting interests

The authors declared that they have no conflicts of interest in the research, authorship, and this article's publication.

References

1. Chatchai P, Murakami Y, Kishioka S-y, Nosaka AY, Nosaka Y. Efficient photocatalytic activity of water oxidation over $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ composite under visible light irradiation. *Electrochimica Acta*. 2009;54(3):1147-52.
2. ชัยชัย จุฑามาศ, จักรชัย พลเขียว, Development of photoelectrocatalysis techniques for phenolic compound degradation under solar light. *Progress in Applied Science and Technology*. 2015;5(1):1-8.
3. Liu Z, Wang Q, Tan X, Zheng S, Zhang H, Wang Y, et al. Solvothermal preparation of $\text{Bi}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ nanoparticles on TiO_2 NTs for the enhanced photoelectrocatalytic degradation of pollutants. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;815:152478.
4. Zhan S, Zhou F, Huang N, He Q, Zhu Y. Deactivating harmful marine microorganisms through photoelectrocatalysis by GO/ZnWO_4 electrodes. *Chemical Engineering Journal*. 2017;330:635-43.
5. Cho E-C, Hsiao Y-S, Huang J-H, Sung M-Y, Chen Y-L, Wu N-J, et al. Construction of $\text{BiVO}_4/\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{WO}_3$ heterojunctions with improved photocatalytic capability in elimination of dye and antibiotics and inactivation of *E. coli*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2023;149:104991.
6. Huang C, Chen L, Li H, Mu Y, Yang Z. Synthesis and application of Bi_2WO_6 for the photocatalytic degradation of two typical fluoroquinolones under visible light irradiation. *RSC advances*. 2019;9(48):27768-79.
7. Song Y, Zhou F, Chai Y, Zhan S. Study on high antibacterial $\text{RGO}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ microspheres combined with PEVE coating for marine sterilization under visible light. *Research on Chemical Intermediates*. 2021;47(6):2297-310.
8. Huang C, Chen L, Li H, Mu Y, Yang Z. Synthesis and application of Bi_2WO_6 for the photocatalytic degradation of two typical fluoroquinolones under visible light irradiation. *RSC Advances*. 2019;9(48):27768-79.
9. Yang W, Ma B, Wang W, Wen Y, Zeng D, Shan B. Enhanced photosensitized activity of a $\text{BiOCl}-\text{Bi}_2\text{WO}_6$ heterojunction by effective interfacial charge transfer. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2013;15(44).
10. Zhang J, Liu P, Zhang Y, Xu G, Lu Z, Wang X, et al. Enhanced performance of nano- Bi_2WO_6 -graphene as pseudocapacitor electrodes by charge transfer channel. *Sci Rep*. 2015;5:8624.
11. Hwang I-S, Mahadik MA, Song MS, Lee S-W, Oh B-T, Lee HH, et al. Influence of ultrafast microwave deposition on morphology and growth mechanism of WO_3 nanosheet photoanode for efficient bacterial inactivation and decomposition of organic pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(3):109985.
12. Li J, Liang Z, Guo L, Lei N, Song Q. Flower-like Bi_2WO_6 with oxygen vacancies achieving enhanced photoelectrocatalytic performance. *Materials Letters*. 2018;223:93-6.
13. Jian L, Peng R, He Y, Wang X, Guo W. One-step hydrothermal synthesis of urchin-like WO_3 with excellent ammonia gas sensing property. *Materials Letters*. 2023;336:133897.
14. Sun C, Wang Y, Su Q. Sol-gel synthesis of Bi_2WO_6 /graphene thin films with enhanced photocatalytic performance for nitric monoxide oxidation under visible light irradiation. *Chemical Physics Letters*. 2018;702:49-56.
15. Krüger LU, Cholant CM, Rodrigues MP, Gomez JA, Landarin DM, Lucio CS, et al. Photochromism of doped and undoped WO_3 sol-gel films: Determination and analysis of optical constants. *Optical Materials*. 2022;128:112357.
16. Zargazi M, Entezari MH. Pulsed sonoelectrodeposition of leaf-like Bi_2WO_6 film with exposed [001] facet as a photocathode with a remarkable high photovoltage in water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(28):10477-92.
17. Alfaifi BY, Tahir AA, Wijayantha KGU. Fabrication of Bi_2WO_6 photoelectrodes with enhanced photoelectrochemical and photocatalytic performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019;195:134-41.

18. Gao C, Guo X, Nie L, Wu X, Peng L, Chen J. A simple and rapid electrodeposition method to prepare seed layer of WO_x on the ITO glass for solvothermal synthesis of WO₃ nanowires film. *Materials Letters*. 2022;328:133136.
19. Lv Y, Yao W, Zong R, Zhu Y. Fabrication of Wide-Range-Visible Photocatalyst Bi₂WO₆-x nanoplates via Surface Oxygen Vacancies. *Scientific Reports*. 2016;6(1):19347.
20. Zhang M, Lai C, Li B, Huang D, Liu S, Qin L, et al. Ultrathin oxygen-vacancy abundant WO₃ decorated monolayer Bi₂WO₆ nanosheet: A 2D/2D heterojunction for the degradation of Ciprofloxacin under visible and NIR light irradiation. *J Colloid Interface Sci*. 2019;556:557-67.
21. Zhang C, Wu K, Liao H, Debliquy M. Room temperature WO₃-Bi₂WO₆ sensors based on hierarchical microflowers for ppb-level H₂S detection. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430:132813.
22. Zhang M, Lai C, Li B, Huang D, Liu S, Qin L, et al. Ultrathin oxygen-vacancy abundant WO₃ decorated monolayer Bi₂WO₆ nanosheet: A 2D/2D heterojunction for the degradation of Ciprofloxacin under visible and NIR light irradiation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;556:557-67.



สิทธิบัตรการประดิษฐ์ : เลขที่คำขอ 2301003584

“เซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับกำจัดสารอินทรีย์และเพิ่มออกซิเจนในอากาศ”



คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

แบบ สป/กษ/001-ก
หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า

สำเนา		สำหรับเจ้าหน้าที่	
วันที่รับคำขอ 13 ต.ย. 2558		เลขที่คำขอ	
วันยื่นคำขอ 13 ต.ย. 2558		2301003584	
สำนักงานคณะกรรมการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ			
ใช้กับแบบสิทธิบัตรประเภทผลิตภัณฑ์			
วันประกาศโฆษณา		เลขที่ประกาศโฆษณา	
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร		เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่			

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้เพื่อสำหรับกำจัดสารอินทรีย์และเพิ่มออกซิเจนในอากาศ

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอสำคัญที่ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ บุคคลธรรมดา ☐ นิติบุคคล ☒ หน่วยงานรัฐ ☐ มูลนิธิ ☐ อื่นๆ

ชื่อ นามสกุล/ชื่อและนามสกุลของนิติบุคคล **ดร. ชัยวัฒน์ ชื่นชูชัยกิจ**

ที่อยู่ 39 หมู่ 1 ถนนวิเศษนคร **อำเภอ/เขต** **ชัยภูมิ** **จังหวัด** **ปทุมธานี** **รหัสไปรษณีย์** **12110** **ประเทศ** **ไทย**

ตำแหน่ง **นายแพทย์** **อีเมล** **mayut.chai@u.ac.th**

☐ เลขประจำตัวประชาชน ☐ เลขทะเบียนนิติบุคคล ☒ เลขประจำตัวผู้เสียภาษี **0 9 4 0 0 0 1 5 3 1 8 0** ☒ เต็มเต็ม (ทั้งหมด)

ในกรณีที่มีการ สืบสวนกับท่าน ท่านจะใช้รหัส ☒ เป็นเลขตัว ☐ และเลขตัว ☐

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☒ ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ☐ ผู้รับโอน ☐ ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

ตามกฎหมายกระทรวง พ.ศ. 2522 **โดยขอรับสิทธิโดยเหตุอื่นและขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น**

5. ตัวแบบ (ถ้ามี)

ชื่อ **สำหรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และประมวลคำขอรับสิทธิบัตร**

ที่อยู่ **อำเภอ/เขต** **ชัยภูมิ** **จังหวัด** **ปทุมธานี** **รหัสไปรษณีย์** **12110** **ประเทศ** **ไทย**

ตำแหน่ง **นายแพทย์** **อีเมล** **mayut.chai@u.ac.th**

เลขประจำตัวประชาชน **0 9 4 0 0 0 1 5 3 1 8 0** ☐ เต็มเต็ม (ทั้งหมด)

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ☐ ชื่อและที่อยู่เกี่ยวกับผู้ขอ

ชื่อ นามสกุล/ชื่อและนามสกุลของนิติบุคคล **ดร. ชัยวัฒน์ ชื่นชูชัยกิจ**

ที่อยู่ **อำเภอ/เขต** **ชัยภูมิ** **จังหวัด** **ปทุมธานี** **รหัสไปรษณีย์** **12110** **ประเทศ** **ไทย**

ตำแหน่ง **นายแพทย์** **อีเมล** **mayut.chai@u.ac.th**

เลขประจำตัวประชาชน **0 9 4 0 0 0 1 5 3 1 8 0** ☒ เต็มเต็ม (ทั้งหมด)

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อยู่ในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในกรณีเกี่ยวกับคำขอรับสิทธิบัตร

เลขที่ **ไม่มี** เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ

☐ คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ☐ บุคคลอื่นอาจทำซ้ำโดยไม่เสียค่า ☐ ขอบเขตของคำขอเดิมไม่ชัดเจน

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่อาจระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบฉบับนี้โดยระบุรายละเอียดเกี่ยวกับข้อสงสัยเพิ่มเติมด้วย

สำหรับเจ้าหน้าที่	
จำนวนประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ กฎบัตร สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ศิลป) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ผลิตภัณฑ์)	☒ พหุคูณ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมี) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ฟิสิกส์) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ชีววิทยา) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เกษตร)
สิทธิบัตรการออกแบบ ☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1) ☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2) ☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)	อนุสิทธิบัตร ☐ อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม) ☐ อนุสิทธิบัตร (เคมี)

ระหว่างการศึกษาได้ไปเป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนที่มหาวิทยาลัยอิวาเตะ เมืองโมริโอกะ จังหวัด
อิวาเตะ ประเทศญี่ปุ่น เป็นระยะเวลา 2 เดือน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากทาง
Assoc. Prof. Dr. Katsuyuki Takahashi ที่ตอบรับการเป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนในครั้งนี้



岩手大学
IWATE UNIVERSITY



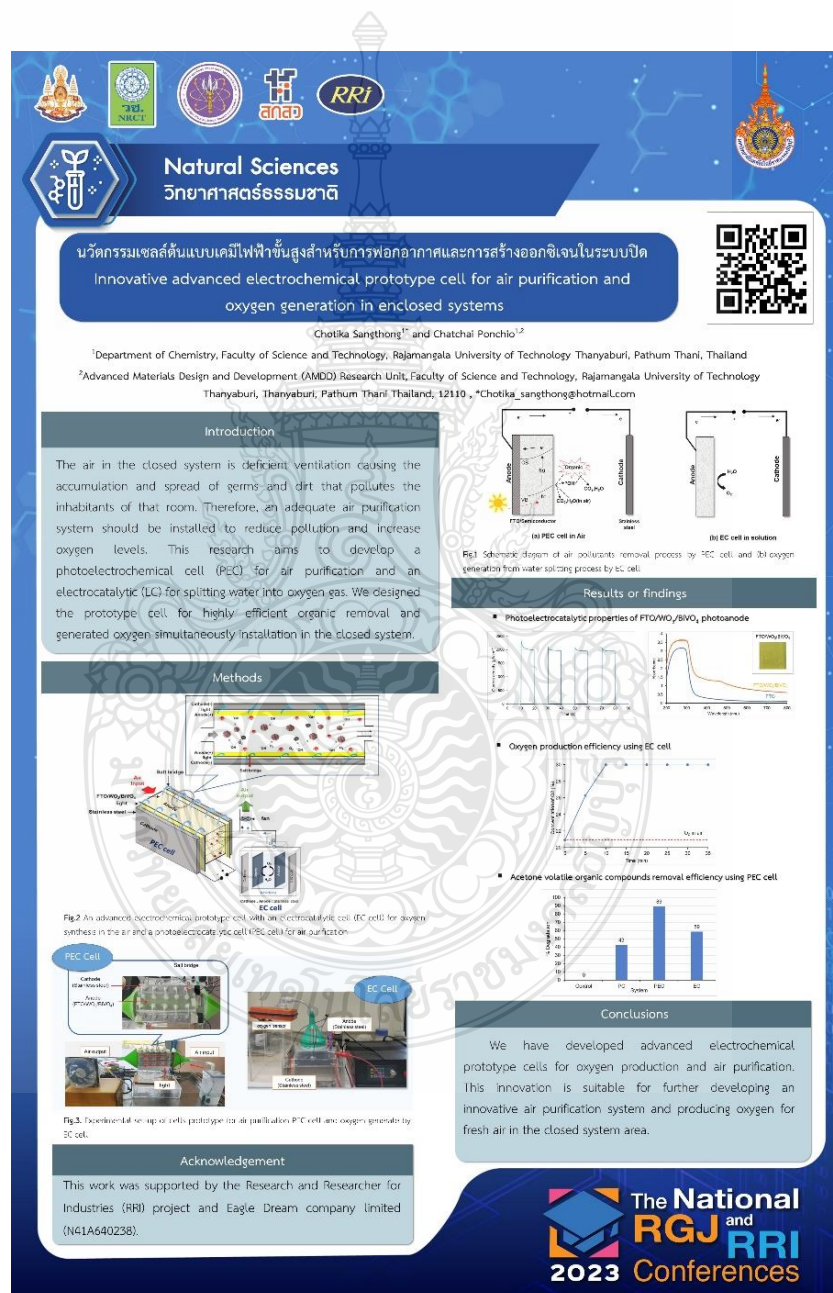
เข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The 7th International Symposium on Plasma & Fine Bubbles to Agriculture and Aquaculture (7th ISPFB 2023), embedded the international symposium of the East Asia Fisheries Technologists Association (EAFTA) and the Food Society of Modern International Lifestyle Education (FSMILE) ในรูปแบบ Oral presentation ซึ่งจัดที่มหาวิทยาลัยอิวาเตะ เมืองโมริโอกะ จังหวัดอิวาเตะ ประเทศญี่ปุ่น



เข้าร่วมการประกวดผลงานนวัตกรรมภาคนิทรรศการของกิจกรรมการประกวดผลงาน
นวัตกรรมสายอุดมศึกษา ประจำปี 2566 ระหว่างวันที่ 7 - 9 สิงหาคม 2566 ภายในงาน มหกรรม
งานวิจัยแห่งชาติ 2566 (Thailand Research Expo 2023) ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอก
คอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ ซึ่งได้รับรางวัลเหรียญเงิน



เข้าร่วมงานการนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติ ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ประจำปี 2566 (The National RJG and RRI Conferences 2023) ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ ในวันที่ 9-10 สิงหาคม 2566 ในรูปแบบ Poster presentation



ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล	นางสาวโชติกา สังข์ทอง
วัน เดือน ปีเกิด	21 กรกฎาคม 2542
ที่อยู่	28/2 หมู่ที่ 2 ตำบลบึงชำอ้อ อำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานี 12170
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	092 695 5520
อีเมล	chotika_sangthong@hotmail.com