

การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก
สำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์

DEVELOPMENT OF PHOTOELECTROCATALYTIC CELL PROTOTYPE
FOR HYDROPONICS SYSTEM

กัญญารัตน์ หมัด

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก
สำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์

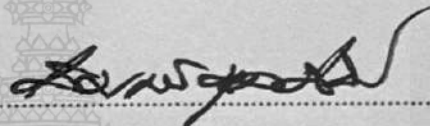
กัญญารัตน์ หมด

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

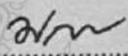
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์
Development of Photoelectrocatalytic Cell Prototype for Hydroponics
System

ชื่อ-นามสกุล นางสาวกัญญารัตน์ หมด
สาขาวิชา เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.
ปีการศึกษา 2566

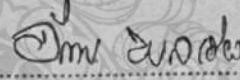
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์สมพร มุลมังมี, Ph.D.)

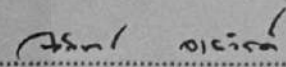
.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ปริยาภรณ์ ไชยสัจย์, Ph.D.)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพัทธ์ จงสวัสดิ์, ปร.ด.)

วันที่ 12 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกัญญารัตน์ หมัด
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ ประการแรกคือการพัฒนาขั้วไฟฟ้าโฟโตแอโนด $WO_3/BiVO_4$ ที่มีประสิทธิภาพในปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนที่สองคือการพัฒนาเซลล์ต้นแบบ PEC สำหรับการควบคุมโรคพืชและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบไฮโดรโปนิคส์

ส่วนแรกของการทดลองคือการพัฒนาวิธีการเคลือบแบบจุ่มอัตโนมัติเพื่อเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ บนกระจกนำไฟฟ้า ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเคลือบแบบจุ่มและขั้นตอนการเผาขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับเซลล์ PEC ได้วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ การดูดกลืนแสง สัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ส่วนที่สองคือการพัฒนาเซลล์ต้นแบบ PEC สำหรับกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ และการใช้งานจริงในระบบไฮโดรโปนิคส์ ได้ศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล และกลไกการเกิดปฏิกิริยาต่อการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์โดยเซลล์ PEC นอกจากนี้ยังได้ศึกษาประสิทธิภาพของการแตกตัวของปุ๋ยและการใช้เซลล์ PEC ต้นแบบกับการปลูกผักบุ้งในระบบไฮโดรโปนิคส์เปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม

งานวิจัยนี้สามารถปรับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการจุ่มเคลือบอัตโนมัติ $WO_3/BiVO_4$ และกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ได้ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำซ้ำได้ มีความทนทาน และสามารถปรับขนาดได้ ขั้วไฟฟ้า $WO_3/BiVO_4$ ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ได้ 100% ใน 10 นาที และกำจัด *E.coli* ได้ 99.9% ใน 60 นาที สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเซลล์ PEC ขนาด 60 ลิตรโดยใช้ขั้วไฟฟ้า $WO_3/BiVO_4$ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ KCl ความเข้มข้น 0.01 M อัตราการไหล 0.5 นาที/ลิตร ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 2 V สามารถกำจัดสีย้อมอินทรีย์ได้ 100% ใน 40 นาที นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยไนเตรตและฟอสเฟตได้มากขึ้น 15.45 และ 11.80% ตามลำดับที่สำคัญยังสามารถกำจัดโคลิฟอร์มทั้งหมดได้ 98% และเชื้อรา 90% ในตัวอย่างจริงได้ภายใน 180 นาที

ตามลำดับ งานวิจัยนี้เป็นการยืนยันความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ โดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ทนทาน และสามารถทำซ้ำและขยายขนาดได้ดี ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้กับเซลล์ PEC ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ เซลล์ต้นแบบ PEC ที่นำเสนอสามารถควบคุมการเกิดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบไฮโดรโปนิคส์เหมาะสำหรับการพัฒนาต่อยอด ขยายขนาด สำหรับระบบบำบัดน้ำในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำสำคัญ: เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ระบบไฮโดรโปนิคส์



Thesis Title	Development of Photoelectrocatalytic Cell Prototype for Hydroponics System
Name - Surname	Miss Kanyarat Hmud
Program	Applied Chemistry
Thesis Advisor	Associate Professor Chatchai Ponchio, D.Eng.
Academic Year	2023

ABSTRACT

The research has two main objectives: the first part is to develop a $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ photoanode effective in photoelectrocatalytic (PEC) reactions to remove organic substances and microorganisms. The second part is to develop a PEC prototype cell for plant disease control and to improve fertilizer dissociation efficiency in hydroponic systems.

The first part of the experiment is developing an automatic dip coating method to prepare $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ semiconductor thin films on conductive glass. The optimal conditions for the dip-coating and calcination process have been examined to determine which conditions are most effective for their PEC cell. An analysis was conducted on the physical attributes, light absorption, morphology, crystal structure, and electrochemical properties of the developed electrodes. The second part is the development of a PEC prototype cell for removing organic matter and microorganisms and its practical application in hydroponic systems. The effects of electrolyte solutions, applied potential, flow rate, and reaction mechanism on the capacity of PEC cells to eliminate organic substances and microorganisms were investigated. In addition, the efficiency of fertilizer dissociation and applying a PEC prototype cell to the hydroponic cultivation of ruby-cose vegetables compared to the conventional system were investigated.

This research can determine the optimal conditions for the automatic $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ dip coating and sintering process, resulting in highly efficient electrodes that

are also reproducible, durable, and scalable. The developed $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ electrodes are highly efficient at removing 100% organic compounds in 10 minutes and 99.9% of *E. coli* in 60 minutes. At the optimal conditions for a 60 L PEC cell with $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ electrodes, a 0.01 M KCl electrolyte solution, a flow rate of 0.5 min/L under catalytic light, an applied potential of 2 V, and 100% organic dye were eliminated in 40 minutes. It is also more effective at increasing nitrate and phosphate fertilizer dissociation by 15.45 and 11.80%, respectively. Importantly, it was also capable of eliminating 98% of total coliform and 90% of fungus in the actual sample within 180 minutes, respectively. This research confirms the successful preparation of $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ semiconductor thin films using the highly efficient automatic dip-coating technique for oxidation reactions in aqueous solutions. It is simple, durable, and can be reproduced and scaled up. The developed electrodes can be efficiently employed with PEC cells to remove microorganisms and organic materials. The proposed PEC prototype cells can control pathogen incidence and enhance fertilizer dissociation effectiveness in hydroponic systems. They are appropriate for further development, scalability, and commercial expansion of the water treatment system.

Keywords: Photoelectrocatalytic technique, $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ semiconductor thin film, Hydroponic system

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.ฉัตรชัย พลเชี่ยว อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ดร.สมพร มุลมั่งมี ประธานกรรมการสอบ และ รศ.ดร.ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์ กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการโฟโตอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มาซาชิ ฮาตาโมโตะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีนาโงะ จังหวัดนีกาตะ ประเทศญี่ปุ่น ที่ตอบรับผู้วิจัยในการเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยนทำให้ผู้วิจัยได้ประสบการณ์และความรู้ในการทำงานวิจัยเพิ่มมากยิ่งขึ้น รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือในการทำงานวิจัยภายใต้ทุนแลกเปลี่ยนระยะสั้นภายใต้งบ Reinventing ประจำปี 2565 และขอขอบคุณทุนวิจัย Fundamental fund และบริษัททีไอเกิ้ลตรึม จำกัด ที่สนับสนุนทุนงานวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี ทำให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ เสมอมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

กัญญารัตน์ หมัด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	5
กิตติกรรมประกาศ	7
สารบัญ.....	8
สารบัญตาราง.....	16
สารบัญภาพ	18
บทที่ 1 บทนำ.....	28
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	28
1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงเกษตรกรรม	28
1.1.2 ที่มาของการศึกษาเชิงลึก.....	29
1.2 วัตถุประสงค์.....	31
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	31
1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์	32
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	37
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
2.1 ความสำคัญและระบบการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์.....	38
2.1.1 ความสำคัญของระบบไฮโดรโปนิคส์	38
2.1.2 ระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์	39
2.2 การควบคุมค่า EC และ PH ที่เหมาะสม.....	42
2.3 โรคพืชต่าง ๆ ในระบบไฮโดรโปนิคส์และวิธีการป้องกัน	43
2.3.1 โรคพืชต่าง ๆ ในระบบไฮโดรโปนิคส์ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้.....	43
2.3.2 ปัจจัยเสี่ยงในการเกิดโรคในผักไฮโดรโปนิคส์.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2.1 <i>Pythium spp.</i>	45
2.3.2.2 <i>Escherichia coli (E. coli)</i>	46
2.3.3 การป้องกันและกำจัดเชื้อโรคในระบบน้ำของผักไฮโดรโปนิคส์	47
2.3.3.1 กำจัดเชื้อโรคในน้ำที่ก่อให้เกิดโรครากเน่า	47
2.3.3.2 วิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ด้วยการควบคุมทางกายภาพ	47
2.3.3.3 วิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ด้วยการใส่สารเคมี	48
2.4 ธาตุอาหารสำหรับไฮโดรโปนิคส์	48
2.4.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช	48
2.4.2 ผลของอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ต่อประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ย	51
2.5 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ แบคทีเรีย และเชื้อจุลินทรีย์	52
2.5.1 อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$)	52
2.5.2 กรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl)	53
2.5.3 ไฮโปคลอไรต์ ไอออน (OCl^-)	53
2.5.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุมูลอิสระ	53
2.5.5 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process)	54
2.5.5.1 กระบวนการโฟโตเคมี (Photochemical process)	54
2.5.5.2 กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process)	55
2.5.5.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)	55
2.5.5.4 กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic process)	56
2.6 การพัฒนาชีวไฟฟ้าแอนโนดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก	57
2.6.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง	57
2.6.2 การพัฒนาสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอน	60
2.6.2.1 การเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ	60
2.6.2.2 การใช้สารกึ่งตัวนำผสม	61
2.6.2.3 การเติมโลหะ	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การพัฒนาลักษณะผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า.....	63
2.7 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ	64
2.7.1 วิธีการตรึงแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering process).....	65
2.7.2 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process).....	66
2.7.3 วิธีการตรึงแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)	66
2.7.4 วิธีการตรึงแบบสเปรย์ไพโรลิซิส (Spray Pyrolysis)	67
2.7.5 วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	68
2.7.6 เทคนิคการจุ่มเคลือบ (Dip coating)	69
2.7.7 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process).....	69
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	70
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	73
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	73
3.1.1 สารเคมี.....	73
3.1.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์	76
3.2 การทดลอง	78
3.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด และขั้วไฟฟ้าแอโนด (FTO/WO ₃ /BiVO ₄)	78
3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)	78
3.2.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด (FTO/WO ₃ /BiVO ₄) ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ	78
3.2.2 ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกของขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยนำขั้วไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละพารามิเตอร์ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้	81
3.2.2.1 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้	81
3.2.2.2 ศึกษาสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า.....	81
3.2.2.3 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย.....	82
3.3.3.1	ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย.....	82
3.2.3.2	ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย.....	83
3.2.4	ศึกษาความเสถียรและความคงทนของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย (stability)	84
3.2.5	ศึกษาการเตรียมขั้วของขั้วไฟฟ้า.....	84
3.2.6	ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา.....	85
3.2.6.1	ศึกษาการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical; $\cdot\text{OH}$)	85
3.2.6.2	การศึกษาระยะทางการเกิดแอกทีฟคลอรีน (Active chlorine, Cl ₂).....	85
3.2.6.3	ศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแส (%IPCE).....	85
3.2.7	ศึกษาความคงทนของขั้วไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย	86
3.2.7.1	ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และค่า pH ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย	86
3.2.8	ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ	86
3.2.8.1	ศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	86
3.2.8.2	ศึกษาศักย์ไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> ที่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, และ 2.5 V.....	86
3.2.8.3	ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	86
3.2.8.4	ศึกษาการใช้ PEC ในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	86
3.2.8.5	ศึกษาการกำจัดเชื้อรวม.....	87
3.2.9	ศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเพื่อติดตั้งกับระบบไหลเวียนของน้ำในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์.....	87
3.2.9.1	การศึกษาลักษณะของสแตนเลส สตีล	88
3.2.9.2	การศึกษ้อัตราการไหลของสารละลาย	88
3.2.9.3	การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อกำจัดที่ย่อย.....	88
3.2.9.4	ผลการศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดที่ย่อย.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.9.5 การศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์	89
3.2.9.6 การศึกษาทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย	89
3.2.10 เปรียบเทียบการใช้งานจริงระหว่างการปลูกผักที่ใช้ระบบ PEC และระบบที่ไม่ใช่ PEC	89
3.2.10.1 การศึกษาการเจริญเติบโตของผัก	89
3.2.10.2 การกำจัดเชื้อ	89
3.2.10.3 การวิเคราะห์ลักษณะของรากพืชด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	89
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	90
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ , FTO/BiVO ₄ , และ FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ	90
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า	91
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า	91
4.1.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	92
4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า.....	94
4.1.5 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้า.....	95
4.1.6 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า	96
4.1.7 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	97
4.2 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	98
4.2.1 ผลการศึกษาสภาวะการอบ FTO/WO ₃ หลังกระบวนการจุ่มเคลือบของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	98
4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า	98
4.2.1.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	100
4.2.1.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า	102
4.2.2 ผลการศึกษาอนุกรมการเผาขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	103
4.2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า	103
4.2.2.2 ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลาย น้ำของขั้วไฟฟ้า.....	104
4.2.2.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	105
4.2.2.4 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า	106
4.2.2.5 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้า	108
4.2.2.6 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า.....	109
4.2.3 ผลการศึกษาระยะเวลาการเผาขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	110
4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า	110
4.2.3.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน สารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า	110
4.2.3.3 ศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	111
4.2.3.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า	113
4.2.3.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า.....	114
4.2.4 ผลการศึกษ้อัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าขึ้นในกระบวนการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ... 115	
4.2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า	115
4.2.4.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน สารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า	116
4.2.4.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	117
4.2.4.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า	118
4.2.5 ผลการศึกษาระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้า.....	119
4.2.5.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า	119

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.5.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสเฟต.....	120
4.2.5.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	121
4.2.6 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการจุ่มซัลไฟฟอสเฟต.....	122
4.2.6.1 ลักษณะทางกายภาพของซัลไฟฟอสเฟต.....	122
4.2.6.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสเฟต.....	123
4.2.6.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	124
4.2.7 ผลการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม.....	125
4.2.7.1 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม.....	125
4.2.7.2 ผลการศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม.....	126
4.2.8 ผลการศึกษาความเสถียรและความคงทนของซัลไฟฟอสเฟต FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม.....	128
4.2.9 ผลการศึกษาการทำซ้ำของซัลไฟฟอสเฟต (Reproducibility).....	129
4.2.10 ผลของกลไกการเกิดปฏิกิริยา.....	130
4.2.10.1 ผลการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล.....	130
4.2.10.2 ผลการศึกษาระยะเวลาทางการเกิดแอกทีฟคลอรีน (Active chlorine, Cl _{ac}).....	131
4.2.10.3 ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแสไฟฟ้า (%IPCE).....	132
4.3 ศึกษาความคงทนของซัลไฟฟอสเฟตในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม.....	133
4.3.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และค่า pH ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม.....	133
4.4 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์.....	137
4.4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	137
4.4.2 ผลการศึกษาศักย์ไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	138

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 ผลการศึกษากลไกในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	139
4.4.4 ผลการศึกษาการใช้ PEC ในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	140
4.4.5 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อรารวม	141
4.5 ผลการศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเพื่อติดตั้งกับระบบไหลเวียนของน้ำในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์	144
4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะของขั้วไฟฟ้าสแตนเลส สตีล	144
4.5.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลาย	145
4.5.3 ผลการศึกษากลไกในการกำจัดสีย้อม	146
4.5.4 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม	147
4.5.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์	148
4.5.6 ผลการศึกษาทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย	149
4.5.6.1 การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟต (Phosphate; PO_4^{3-})	149
4.5.6.2 ผลการศึกษาทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย	150
4.6 เปรียบเทียบการใช้งานจริงระหว่างการปลูกผักที่ใช้ระบบ PEC และระบบที่ไม่ใช้ PEC	151
4.6.1 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของผัก	151
4.6.2 ผลการควบคุมเชื้อ Total coliform ด้วยระบบ Control และระบบ PEC	154
4.6.3 ผลการวิเคราะห์ Optical microscope (OM)	155
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
บรรณานุกรม	159
ภาคผนวก ก การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ	170
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์เชื้อ	173
ภาคผนวก ค ผลงานเผยแพร่ทางวิชาการ	175
ประวัติผู้เขียน	184

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบเทคนิคแบบดั้งเดิมกับเทคนิคที่นำเสนอ (เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก) สำหรับประยุกต์การกำจัดและควบคุมการเกิดเชื้อโรคในน้ำของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์.....	34
ตารางที่ 2.1 แสดงค่า EC และค่า pH ที่เหมาะสมของพืชแต่ละชนิด.....	43
ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และสารอาหารรอง	49
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย	73
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย.....	76
ตารางที่ 3.3 แสดงการศึกษาคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า	82
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ , FTO/BiVO ₄ , และ FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	93
ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)	98
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยศึกษาสภาวะการอบ FTO/WO ₃	101
ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	106
ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน.....	112
ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยอัตราเร็วในการตั้งขั้วไฟฟ้าต่างกัน.....	117
ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าต่างกัน.....	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าต่างกัน	125
ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อนการกำจัดและหลังการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ความเข้มข้นและค่า pH ที่ต่างกัน	134
ตารางที่ 4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อนการกำจัดและหลังการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นและค่า pH ที่ต่างกัน	136
ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์เชื้อ <i>E.coli</i> ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 ⁶ CFU/ml โดยใช้เทคนิคโพโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ระยะเวลา 0 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที, 150 นาที, และ 180 นาที.....	141
ตารางที่ 4.12 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบ PEC, ระบบควบคุม (add 0.01 M KCl) และระบบควบคุม (without KCl) ที่ระยะเวลา 0 นาที และ 180 นาที.....	143
ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นของไนเตรต (NO ₃ ⁻) และค่าการนำไฟฟ้าในเซลล์ต้นแบบ PEC และระบบควบคุม	151
ตารางที่ 4.14 วิเคราะห์เชื้อ Total coliform ร่วมกับระบบ PEC และระบบ Control ขนาด 60 ลิตร	154

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 การเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายน้ำ โดยใช้เซลล์โฟโตอเล็กโตรคะตะไลติกภายใต้สภาวะการเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า	33
ภาพที่ 1.2 การออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคที่รากพืช และเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์	37
ภาพที่ 2.1 ลักษณะการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์	38
ภาพที่ 2.2 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT	39
ภาพที่ 2.3 แสดงระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT	40
ภาพที่ 2.4 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT	40
ภาพที่ 2.5 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DRFT	41
ภาพที่ 2.6 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ FAD	41
ภาพที่ 2.7 ลักษณะโรคที่เกิดกับใบของการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์ (A) โรคราแป้ง และ (B) โรคใบจุด.....	44
ภาพที่ 2.8 ลักษณะโรคที่เกิดกับรากของการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์	44
ภาพที่ 2.9 รูปร่างของเชื้อ <i>Pythium spp.</i>	45
ภาพที่ 2.10 รูปร่างและลักษณะของเชื้อ <i>E.coli</i>	46
ภาพที่ 2.11 เปรียบเทียบความแรงในการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกับแอกทิฟคลอรีน	54
ภาพที่ 2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก	55
ภาพที่ 2.13 ปริมาณแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์	58
ภาพที่ 2.14 กระบวนการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ	58
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบไฮโดรโปนิคส์.....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.16 การเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ (A) การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) และ (B) การเร่งการส่งผ่านช่องว่าง (h^+).....	61
ภาพที่ 2.17 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Z-scheme.....	61
ภาพที่ 2.18 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Straddling gap structure.....	62
ภาพที่ 2.19 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Staggered gap structure.....	62
ภาพที่ 2.20 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Broken gap structure.....	63
ภาพที่ 2.21 วิธีการตรึงแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering process).....	65
ภาพที่ 2.22 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process).....	66
ภาพที่ 2.23 วิธีการตรึงแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal).....	67
ภาพที่ 2.24 วิธีการตรึงแบบสเปรย์ไพโรลิซิส (Spray Pyrolysis).....	67
ภาพที่ 2.25 วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating process).....	68
ภาพที่ 2.26 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating process).....	69
ภาพที่ 2.27 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process).....	70
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบขั้วไฟฟ้า $WO_3/BiVO_4$ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ.....	80
ภาพที่ 3.2 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อโรคในระบบน้ำในโรงเรือนสำหรับไฮโดรโปนิคส์.....	88
ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3 , $FTO/BiVO_4$, และ $FTO/WO_3/BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	91
ภาพที่ 4.2 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3 , $FTO/BiVO_4$, และ $FTO/WO_3/BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	92
ภาพที่ 4.3 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3 , $FTO/BiVO_4$, และ $FTO/WO_3/BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	93
ภาพที่ 4.4 Absorbance spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3 , $FTO/BiVO_4$, และ $FTO/WO_3/BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ , FTO/BiVO ₄ , และ FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	95
ภาพที่ 4.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้า FTO, FTO/WO ₃ , FTO/BiVO ₄ , และ FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ	96
ภาพที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า (a) FTO, (b) FTO/WO ₃ , (c) FTO/BiVO ₄ , และ (d) FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	97
ภาพที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติโดยศึกษาสภาวะของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ ที่สภาวะการอบ (Dry), สภาวะการอบและเผา (Dry and calcination), และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature).....	99
ภาพที่ 4.9 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยศึกษาสภาวะของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ (a) สภาวะการอบ, (b) สภาวะการอบและเผา, และ (c) ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	100
ภาพที่ 4.10 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ โดยศึกษาสภาวะการอบ, สภาวะการอบและเผา, และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง.....	101
ภาพที่ 4.11 Absorbance spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่ศึกษาสภาวะการอบ, สภาวะการอบและเผา, และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง.....	102
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่ศึกษาสภาวะการอบ, สภาวะการอบและเผา, และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.13 ลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C.....	103
ภาพที่ 4.14 Amperograms ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C.....	104
ภาพที่ 4.15 กราฟ Nyquist plots ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ (a) 350 °C, (b) 400 °C, (c) 450 °C, (d) 500 °C, (e) 550 °C, และ (f) 600 °C..	105
ภาพที่ 4.16 Absorbance spectra ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C	107
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C.....	107
ภาพที่ 4.18 การศึกษาโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C	108
ภาพที่ 4.19 ลักษณะสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (a) โดยเผาหรืออุณหภูมิห้อง, (b) อบที่ 150 °C และที่อุณหภูมิการเผาต่าง ๆ นั้น , (c) 350 °C, (d) 400 °C, (e) 450 °C, (f) 500°C, (g) 550 °C, และ (h) 600 °C เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

- ภาพที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, และ 120 นาที..... 110
- ภาพที่ 4.21 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ (a) อุณหภูมิห้อง (RT), (b) 30 นาที, (c) 60 นาที, (d) 90 นาที, และ (e) 120 นาที..... 111
- ภาพที่ 4.22 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ (a) อุณหภูมิห้อง (RT), (b) 30 นาที, (c) 60 นาที, (d) 90 นาที, และ (e) 120 นาที..... 112
- ภาพที่ 4.23 Absorbance spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, และ 120 นาที..... 113
- ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, และ 120 นาที..... 114
- ภาพที่ 4.25 ลักษณะสัญญาณวิทยาของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมโดยระยะเวลาการเผาที่แตกต่างกัน (a) โดยไม่ต้องเผาหรืออุณหภูมิห้องและที่ระยะเวลาการเผาต่างกัน, (b) 30 นาที, (c) 60 นาที, (d) 90 นาที, และ (e) 120 นาที เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ..... 115
- ภาพที่ 4.26 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s..... 115

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.27 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s.....	116
ภาพที่ 4.28 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s	117
ภาพที่ 4.29 Absorbance spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s	118
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s	119
ภาพที่ 4.31 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0 วินาที, 5 วินาที, 10 วินาที, 15 วินาที, 20 วินาที, และ 25 วินาที.....	119
ภาพที่ 4.32 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 0 วินาที, (b) 5 วินาที, (c) 10 วินาที, (d) 15 วินาที, (e) 20 วินาที, และ (f) 25 วินาที.....	120
ภาพที่ 4.33 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 0 วินาที, (b) 5 วินาที, (c) 10 วินาที, (d) 15 วินาที, (e) 20 วินาที, และ (f) 25 วินาที.....	121
ภาพที่ 4.34 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s.....	122

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.35 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s.....	123
ภาพที่ 4.36 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s	124
ภาพที่ 4.37 ร้อยละการกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติโดยศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม	126
ภาพที่ 4.38 % การกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ โดยศึกษากลไกโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC), อิเล็กโทรคะตะไลติก (EC), โฟโตคะตะไลติก (PC), มีด, กลไกแสง	127
ภาพที่ 4.39 ผลการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม Ponceau 4 R โดยใช้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ที่เวลา 15 นาที จำนวน 20 รอบ.....	128
ภาพที่ 4.40 ผลการเตรียมซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ด้วยเทคนิค (A) การจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ (B) การจุ่มเคลือบแบบใช้มือ	129
ภาพที่ 4.41 A และ B ผลการทดสอบการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ([•] OH) ด้วยวิธีทางอ้อม โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมจากเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ.....	130
ภาพที่ 4.42 การเกิดแอกทีฟคลอรีนที่ระยะทาง 0, 3, 5, 7, และ 9 เมตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ (A) ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะทางต่าง ๆ (B) กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอกทีฟคลอรีน (C) ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่ระยะทางต่าง ๆ	131

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.43 ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแส (%IPCE) โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าFTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบ แบบอัตโนมัติ และเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ.....	132
ภาพที่ 4.44 ร้อยละการกำจัดสีย้อมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความ เข้มข้นต่าง ๆ และสารละลายอยู่ในสถานะที่เป็น (A) กรด (pH = 3), (B) กลาง (pH=7), และ (C) เบส (pH=11).....	133
ภาพที่ 4.45 ร้อยละการกำจัดสีย้อมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น ต่าง ๆ และสารละลายอยู่ในสถานะที่เป็น (A) กรด (pH = 3), (B) กลาง (pH=7), และ (C) เบส (pH=11)	135
ภาพที่ 4.46 ร้อยละการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค การจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ โดยศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการ กำจัดเชื้อที่ 0.0 M, 0.01 M, 0.025 M, 0.05 M, 0.075 M, และ 0.1 M	137
ภาพที่ 4.47 ร้อยละการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค การจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติโดยศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดเชื้อที่ 0.0 V, 0.5 V, 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V, และ 2.5 V.....	138
ภาพที่ 4.48 ร้อยละการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค การจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติโดยศึกษากลไกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้า ขั้วไฟฟ้า.....	139
ภาพที่ 4.49 การกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 ⁶ CFU/ml โดยใช้เทคนิค โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ระยะเวลา (A) 0 นาที, (B) 30 นาที, (C) 60 นาที, (D) 90 นาที, (E) 120 นาที, (F) 150 นาที, และ (G) 180 นาที.....	140
ภาพที่ 4.50 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบ PEC ที่ระยะเวลา (A) 0 นาที และ (B) 180 นาที.....	142
ภาพที่ 4.51 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบควบคุม (add 0.01 M KCl) ที่ระยะเวลา (A) 0 นาที และ (B) 180 นาที.....	142

สารบัญญภาพ (ต่อ)

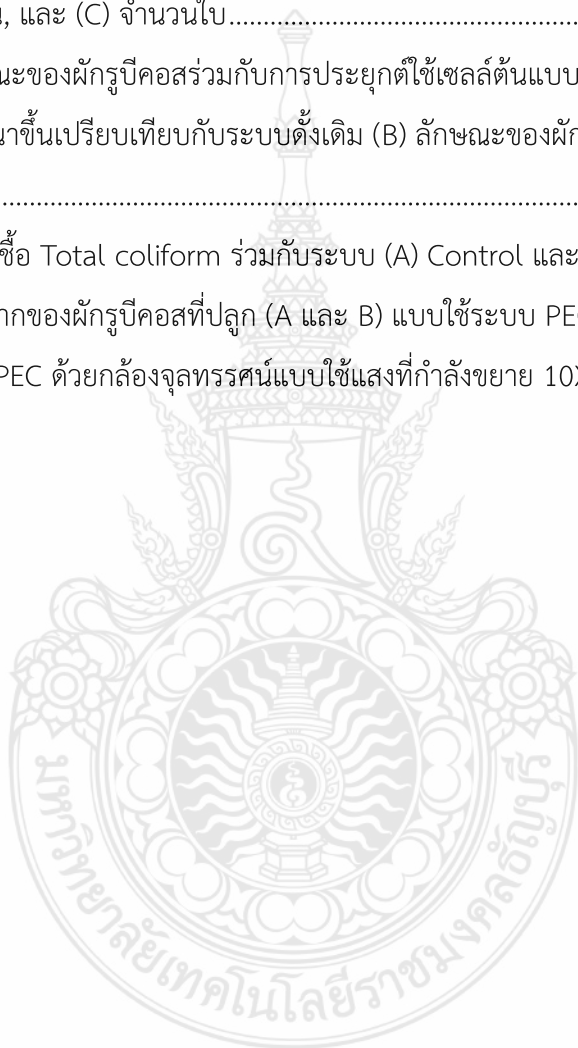
หน้า

ภาพที่ 4.52 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบควบคุม (without KCl) ที่ระยะเวลา (A) 0 นาที และ (B) 180 นาที	143
ภาพที่ 4.53 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ศึกษาขนาดรูของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสแบบเรียบและแบบมีรูขนาด 2 มิลลิเมตร	144
ภาพที่ 4.54 ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄	145
ภาพที่ 4.55 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ ศึกษากลไกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม	146
ภาพที่ 4.56 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ โดยศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า	147
ภาพที่ 4.57 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO ₃ /BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า	148
ภาพที่ 4.58 การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟต (Phosphate; PO ₄ ³⁻) (a) 0 mgP/L, (b) 0.1 mgP/L, (c) 0.2 mgP/L, (d) 0.4 mgP/L, (e) 0.6 mgP/L, (f) 0.8 mgP/L, และ (g) 1.0 mgP/L	149
ภาพที่ 4.59 ความเข้มข้นของฟอสเฟต (PO ₄ ³⁻) ในเซลล์ต้นแบบ PEC และระบบควบคุมที่วัดด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี	150
ภาพที่ 4.60 ขั้นตอนการปลูกผักบุ้งคอส	151

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.61 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของผักบุ้งคอสเป็นระยะเวลา 49 วัน ในระบบที่ปลูกแบบใช้เซลล์ต้นแบบ PEC เปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม (A) ความสูงของราก, (B) ความสูงของลำต้น, และ (C) จำนวนใบ.....	152
ภาพที่ 4.62 (A) ลักษณะของผักบุ้งคอสร่วมกับการประยุกต์ใช้เซลล์ต้นแบบโฟโตอิลีกโตรคะตะไลติกที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม (B) ลักษณะของผักบุ้งคอสที่ปลูกในระบบดั้งเดิม.....	153
ภาพที่ 4.63 วิเคราะห์เชื้อ Total coliform ร่วมกับระบบ (A) Control และ (B) PEC.....	154
ภาพที่ 4.64 ลักษณะรากของผักบุ้งคอสที่ปลูก (A และ B) แบบใช้ระบบ PEC (C และ D) แบบที่ไม่ใช้ระบบ PEC ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 10X.....	155



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงเกษตรกรรม

ในปัจจุบันนี้ ภาคการเกษตรของประเทศไทยเป็นตัวขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศและเป็นรากฐานของการสร้างความมั่นคงทางอาหารของประเทศและของโลก ดังนั้นการพัฒนาภาคเกษตรกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้เพียงพอกับความต้องการอาหารในอนาคต การพัฒนาวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน สอดคล้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับภาคเกษตรกรรมให้สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาลไทย จากเกษตร 2.0 สู่ เกษตร 4.0 และ BCG Economy Model ซึ่งจะช่วยต่อยอดจุดแข็งของประเทศให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้นในด้านความหลากหลายทางชีวภาพ ซึ่งหนึ่งในแนวทางการพัฒนานวัตกรรมในภาคการเกษตร คือการทำการเกษตรรูปแบบใหม่ในระบบปิด ทั้งที่แบบใช้แสงธรรมชาติและแบบแสงเทียม (Indoor with sunlight and artificial Lighting) โดยเฉพาะเทคโนโลยีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินหรือไฮโดรโปนิคส์เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับและพัฒนาอย่างแพร่หลายโดยมีแนวความคิดผสมผสานระหว่าง smart farming ในปัจจุบันกับเทคโนโลยีด้านการเกษตรสมัยใหม่ เช่น ด้านนาโนเทคโนโลยี ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงและสม่ำเสมอ มีความแข็งแรง ปราศจากโรค แมลง สารเคมีปนเปื้อน และมีเสถียรภาพในการผลิต โดยไม่ขึ้นกับฤดูกาลแห่งผลผลิตและปัจจัยของธรรมชาติ โดยชนิดพืชที่เหมาะสมในการปลูกด้วยระบบการปลูกแบบนี้ ได้แก่ พืชที่มีมูลค่าสูง เช่น สตรอว์เบอร์รี แดงญี่ปุ่น พืชสมุนไพรที่มีสารสกัดพิเศษ และผักที่ใช้สำหรับทำสลัด เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ซึ่งใช้ระบบการให้ปุ๋ยผ่านระบบไหลเวียนของน้ำที่มีแร่ธาตุผ่านระบบดูดซึมผ่านรากของพืชนั้น ๆ ยังพบปัญหาหลักคือการเกิดโรคที่ระบบราก ส่วนลำต้นและใบที่เป็นรอยต่อระหว่างพืชกับน้ำและอากาศ ซึ่งการเกิดโรคดังกล่าวส่งผลต่อผลผลิตที่จะได้ต่ำลง มีค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้สารเคมีในการแก้ปัญหา และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ เช่น เชื้อเอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*, *E.coli*) ซึ่งเป็นเชื้อที่เป็นอันตรายซึ่งถึงการปนเปื้อนของอุจจาระที่อาจติดมากับมือของเกษตรกรแล้วเกิดการปนเปื้อนในสารละลายน้ำสำหรับปลูกผักได้ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สามารถใช้กำจัดเชื้อโรคหรือควบคุมการเกิดเชื้อโรคในระบบไฮโดรโปนิคส์ได้ อีกทั้งยังต้องเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปลอดภัย และไม่ต้องใช้สารเคมี ซึ่งเทคนิคที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

(Photoelectrocatalytic, PEC) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม เชื้อจุลินทรีย์ และเชื้อโรค โดยอาศัยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำร่วมกับการเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้า

1.2.2 ที่มาของการศึกษาเชิงลึก

เทคนิคเชิงเคมีไฟฟ้าขั้นสูงที่กำลังเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม คือเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic technique) หรือเรียกย่อๆ ว่า PEC เป็นเทคนิคที่มีการตรึงสารกึ่งตัวนำที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า และอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างการเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปลอดภัยเพราะไม่ต้องใช้สารเคมี และยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ ป้องกันเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อโรค[1-3] แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวยังต้องมีการพัฒนาในระดับสเกลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง การพัฒนาเทคนิค PEC ในงานวิจัยนี้มีหลักในการพัฒนาอยู่สองส่วนคือ

1) การพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ บนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorene dope tin oxide) ให้มีประสิทธิภาพ เสถียร คงทน ใช้งานได้อย่างต่อเนื่องและสามารถขยายสเกลขนาดใหญ่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

2) การพัฒนาออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกให้มีขนาดกะทัดรัด สะดวก และมีประสิทธิภาพสูงเหมาะสำหรับควบคุมการเกิดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือการนำเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกมาประยุกต์ใช้กับการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์รูปคอส ซึ่งเป็นพืชที่มีราคาแพงและกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน แต่ยังมีปัญหาเรื่องโรคที่เกิดกับระบบรากทำให้ผลผลิตลดต่ำลง ซึ่งต้องดูแลควบคุมมิให้เกิดการระบาดตั้งแต่เนิ่น ๆ โดยผู้วิจัยมีแนวความคิดในการพัฒนาวัสดุโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกเพื่อใช้กับเซลล์ต้นแบบสำหรับการจัดการระบบน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้ปุ๋ยแก่พืชและการควบคุมการเกิดโรคพืชที่มากับระบบน้ำซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคที่เกิดกับราก โดยได้พัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ตอบสนองในช่วงแสงธรรมชาติคือทังสเตนออกไซด์ (Tungsten oxide, WO_3) และบิสมัทวานาเดต (Bismuth vanadate, $BiVO_4$) บนวัสดุรองรับกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide, FTO) ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติที่

สามารถควบคุมประสิทธิภาพการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี โดยเน้นการศึกษาและพัฒนาฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดและป้องกันเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคในระบบรากผักไฮโดรโปนิคส์ เน้นความสามารถในการผลิตซ้ำและสามารถขยายขนาดสเกลได้ โดยได้พัฒนาข้าวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำให้มีสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า ในการกำจัดเชื้อโรคและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้น ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าข้าวไฟฟ้า ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ ออกแบบและสร้างเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำโรงเรือนเกษตร ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวนี้จะสามารถเพิ่มผลผลิตของการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์ด้วยการควบคุมเชื้อโรคต่าง ๆ ที่จะเกิดในส่วนรากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่และให้ผลผลิตมากขึ้นและยังสามารถเพิ่มผลกำไรด้วยการลดต้นทุนของการใช้สารเคมีได้เป็นอย่างดี และนอกจากนี้จะเป็นการเพิ่มงานวิจัยและสร้างนวัตกรรมเพื่อตอบโจทย์ท้าทายของสังคม เพื่อเป็นการเพิ่มผลผลิตเทคโนโลยีทางการเกษตร และสร้างเทคโนโลยีภายในประเทศ ซึ่งเป็นการใช้ความรู้จากการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อจัดการกับปัญหาท้าทายเร่งด่วนสำคัญของประเทศในด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การเกษตรให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยจะสามารถเพิ่มจำนวนองค์ความรู้ เทคโนโลยี และนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ที่ชัดเจนในการแก้ไขปัญหาหรือยกระดับการพัฒนาอย่างยั่งยืนเพื่อตอบโจทย์ท้าทายของสังคมได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ และเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก และมีความสามารถในการเตรียมซ้ำ มีความคงทนและสามารถขยายสเกลได้เป็นอย่างดี

1.2.2 เพื่อศึกษาคูณลักษณะต่างๆ สมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ที่พัฒนาขึ้น และศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *E.coli*

1.2.3 เพื่อพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับควบคุมการเกิดโรคพืชและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาและพัฒนากการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นบนกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide, FTO) ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้า เช่น อัตราเร็วในการจุ่มลง ระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้า อัตราเร็วในการดึงขึ้น อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ พร้อมทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพ การดูดกลืนแสง สัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก สมบัติเชิงเคมีไฟฟ้า และสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า อีกทั้งได้ศึกษากลไกต่าง ๆ ที่ใช้ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กลไกที่ศึกษาประกอบไปด้วย การเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้า (EC) การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (PC) การเร่งปฏิกิริยาทั้งศักย์ไฟฟ้าและแสง (PEC) และกลไกควบคุม (Control) การเกิดสารสำคัญต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *E.coli* เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการควบคุมการเกิดโรคในระบบน้ำในโรงเรือนสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์ในขั้นต่อไป

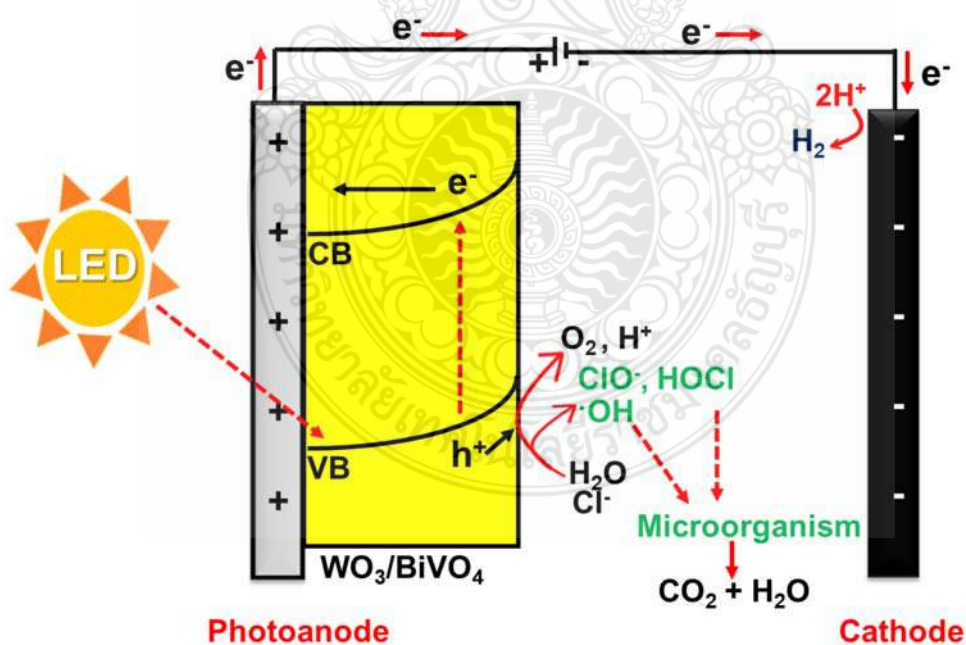
1.3.2 ศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/ $WO_3/BiVO_4$ ที่พัฒนาขึ้นกับเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับควบคุมการเกิดโรคและเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้งอัตราการไหลของสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กลไกต่างๆ ที่ใช้ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อควบคุมการเกิดโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์ให้มากที่สุด อีกทั้งได้นำเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานจริงในการปลูกผักบุ้งคอสโดยเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิมและได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและทดสอบการแตกตัวของปุ๋ยร่วมด้วย

1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้มีแนวความคิดจากนโยบายของรัฐบาลไทยจากเกษตร 2.0 สู่ เกษตร 4.0 และ BCG Economy Model ซึ่งจะช่วยต่อยอดจุดแข็งของประเทศให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้นทั้งในด้านความหลากหลายทางชีวภาพและความหลากหลายทางวัฒนธรรม โดยอาศัยกลไกวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม เพื่อผลิตสินค้าและบริการที่มีมูลค่าสูง ผู้วิจัยมีความสนใจพัฒนานวัตกรรมวัสดุเพื่อใช้กับปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ซึ่งเป็นพืชที่มีราคาแพง การเพาะปลูกให้ผลตอบแทนสูง โดยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยการใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีการพัฒนาวัสดุฟิล์มบางโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดการพัฒนางานวิจัยแบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ WO_3 และ $BiVO_4$ บนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติให้ฟิล์มบางมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ สามารถเตรียมซ้ำและขยายสเกลได้ดี มีความคงทนต่อสภาพการใช้งานต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหลัก 2 ขั้ว คือขั้วไฟฟ้า $FTO/WO_3/BiVO_4$ ที่พัฒนาขึ้นเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและใช้ขั้วไฟฟ้าสแตนเลส สตีล เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งแสดงหลักการทำงานของขั้วไฟฟ้าในเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายน้ำ ดังภาพที่ 1.1 เมื่อมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ จะทำให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอน (electron; e^-) และช่องว่างที่มีประจุบวก (hole; h^+) โดย e^- จะเคลื่อนที่จากชั้นวาเลนซ์ (valence band; VB) ไปที่ชั้นการนำ (conduction band; CB) และจะเกิด h^+ ที่ชั้นวาเลนซ์ ซึ่ง h^+ ที่เกิดขึ้นนี้จะมีสมบัติที่มีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์น้ำที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $\cdot OH$) ซึ่ง $\cdot OH$ ที่เกิดขึ้นนี้มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำและยังสามารถแพร่กระจายมายังบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของสารละลายเพื่อออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยากับสารที่อยู่ในน้ำและเกิดกระบวนการป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ที่จะทำให้เกิดโรคในรากพืชของผักไฮโดรโปนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้จาก

กระบวนการดังกล่าวที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ายังสามารถออกซิไดซ์คลอไรด์ไอออน(Cl^-) ซึ่งเป็นสารประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้กลายเป็นสารแอกทีฟคลอรีน (Active chlorine, Cl_{ac}) ในรูปฟอร์มของคลอไรต์ไอออน (Chlorite ion, OCl^-) หรือกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous, HOCl) ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย ซึ่งมีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์จุลินทรีย์และสารอินทรีย์ได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นตัวออกซิไดส์ที่เกิดขึ้นทั้งสองตัวนี้จะช่วยส่งเสริมการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งคือการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าทางบวกที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ เพื่อเร่งการส่งผ่านและเหนี่ยวนำการไหลของ e^- ที่ชั้น CB ให้ไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งจะช่วยลดปรากฏการณ์การรวมกันของ e^- และ h^+ หรือเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ว่า Recombination effect และจะเรียกเทคนิคที่มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยการให้แสงแก่ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำและศักย์ไฟฟ้าว่าเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากกว่าเทคนิคที่มีการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพียงอย่างเดียวหรือที่เรียกว่าเทคนิคโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic; PC) และเทคนิคที่มีการเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวหรือเรียกว่าเทคนิคอิเล็กโทรคะตะไลติก (Electrocatalytic; EC)



ภาพที่ 1.1 การเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายน้ำ โดยใช้เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ภายใต้สภาวะการเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า

ดังนั้นจุดเด่นของเทคนิค PEC เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาแบบดั้งเดิมในการกำจัดเชื้อโรคหรือป้องกันการเกิดเชื้อโรคในน้ำที่ส่งผลให้เกิดโรครากเน่า เช่น การใช้สารเคมีพบว่าเทคนิค PEC ล้วนมีข้อดีที่เหนือกว่าการใช้สารเคมีเพราะจากหลักการของเทคนิค PEC ที่กล่าวมาแล้วนั้นพบว่าเทคนิค PEC มีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำเพื่อควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ที่จะทำให้เกิดโรคในรากพืชของผักไฮโดรโปนิคส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมการเกิดเชื้อโรคได้ตลอดเวลาซึ่งมีความปลอดภัยและประหยัดเพราะไม่ใช้สารเคมีอันตรายในระบบ และนอกจากนี้เทคนิค PEC ยังมีจุดเด่นที่เหนือกว่าวิธีการแก้ปัญหาทางชีวภาพและการเปลี่ยนน้ำในระบบบ่อยๆ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบเทคนิคแบบดั้งเดิมกับเทคนิคที่นำเสนอ (เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก) สำหรับประยุกต์การกำจัดและควบคุมการเกิดเชื้อโรคในน้ำของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

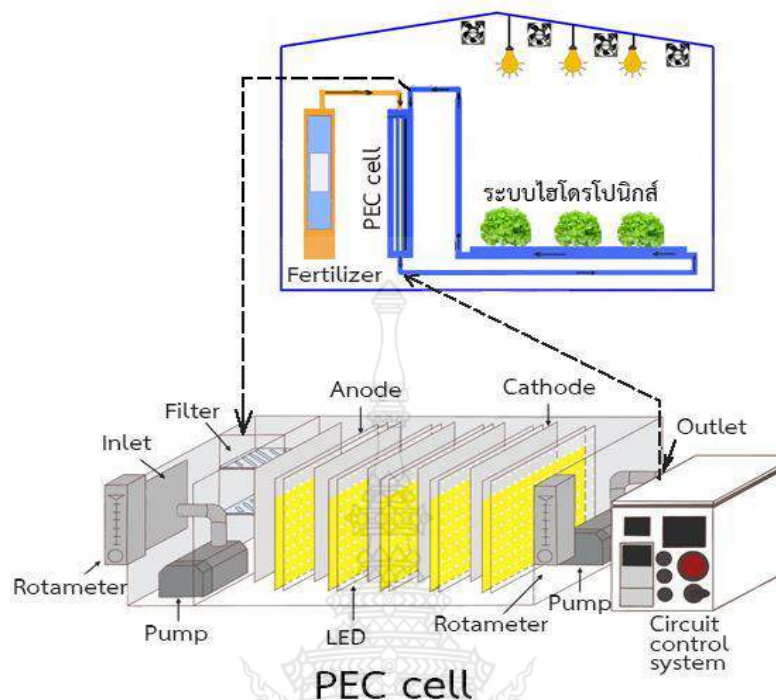
หัวข้อ เปรียบเทียบ	เทคนิคที่นำเสนอ	เทคนิคดั้งเดิม		
	เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก	การเปลี่ยนน้ำในระบบบ่อยๆ	การใช้สารชีวภาพ (แบคทีเรีย เชื้อรา)	การใช้สารเคมี
หลักการกำจัดเชื้อโรค	ผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) แอกทีฟคลอรีน (HOCl และ $\cdot\text{OCl}$) ซึ่งมีศักยภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้มากกว่าเทคนิคดั้งเดิม สามารถออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้	เปลี่ยนน้ำเพื่อชะสปอร์ของเชื้อราออกบางส่วนเท่านั้น ซึ่งเป็นแค่การเจือจางเชื้อจุลินทรีย์	สารชีวภาพที่มีส่วนประกอบของเชื้อราซึ่งเชื้อราปฏิปักษ์ จะยับยั้งการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคด้วยการแย่งที่อยู่อาศัย สารอาหารที่จำเป็น และสร้างสารปฏิชีวนะที่เป็นอันตรายต่อเชื้อก่อโรค	ใช้สารเคมีที่ออกฤทธิ์ในการกำจัดเชื้อที่ก่อให้เกิดโรค

หัวข้อ เปรียบเทียบ	เทคนิคที่นำเสนอ	เทคนิคดั้งเดิม		
	เซลล์โฟโตอิเล็กโตร คะตะไลติก	การเปลี่ยนน้ำใน ระบบบ่อยๆ	การใช้สารชีวภาพ (แบคทีเรีย เชื้อรา)	การใช้สารเคมี
ประสิทธิภาพ	มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากสามารถควบคุมการเกิดเชื้อและการเจริญเติบโตของเชื้อโรคได้ตลอดเวลาที่มีการไหลเวียนของน้ำในระบบ ทำให้ควบคุมเชื้อโรคต่างๆที่จะเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบดั้งเดิมที่ต้องคอยสังเกตอาการของพืชก่อนแล้วค่อยใช้สาร เคมี หรือสารชีวภาพกำจัดทีหลังซึ่งอาจจะไม่ทันต่อการระบาดของโรคได้	มีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้สารเคมี, การใช้สารชีวภาพ และงานวิจัยที่พัฒนา ขึ้น	มีประสิทธิภาพน้อยกว่างานวิจัยที่พัฒนา ขึ้น	มีประสิทธิภาพน้อยกว่างานวิจัยที่จะพัฒนา ขึ้น
ความปลอดภัย	ไม่มีสารพิษตกค้าง	ไม่มีสารพิษตกค้าง	ไม่มีสารพิษตกค้าง	มี สาร เคมี ตก ค้าง หลัง กระบวนการใช้
ราคา	ราคาอยู่ที่วัสดุอุปกรณ์การทำชุดต้นแบบครั้งแรก ซึ่งสามารถใช้ได้นาน และใช้ซ้ำได้	มีค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้น้ำมาก	ราคาสูง ไม่สามารถใช้ซ้ำได้ ใช้แล้วหมดไป	ราคาสูง ไม่สามารถใช้ซ้ำได้ ใช้แล้วหมดไป

ส่วนที่สองของงานวิจัยคือการออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับควบคุมการเกิดโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำโรงเรือนเกษตร ดังแสดงในภาพที่ 1.2 เซลล์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้มีขนาด 60 ลิตร ภายในเซลล์ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ที่พัฒนาขึ้นและขั้วไฟฟ้าแคโทดสแตนเลส สตีล (Stainless Steel) ภายใต้การควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้า แสง และปั๊มควบคุมอัตราการไหลผ่านระบบควบคุมวงจรไฟฟ้าอัตโนมัติ เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของสารละลายระหว่างระบบไฮโดรโปนิคส์และเซลล์ต้นแบบตลอดเวลา ทำให้เกิดการควบคุมโรคพืชและการแตกตัวของปุ๋ยได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีพารามิเตอร์ที่ได้ศึกษาคือลักษณะของสแตนเลส สตีล อัตราการไหลของสารละลาย กลไกต่างๆ ที่ใช้ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การแตกตัวของปุ๋ย ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ และการประยุกต์ใช้งานจริงโดยเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักที่ปลูกแบบใช้ระบบ PEC และระบบที่ไม่ใช่ PEC

งานวิจัยนี้สามารถสร้างเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคที่รากพืชและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำโรงเรือนเกษตรของระบบไฮโดรโปนิคส์ได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถสร้างนวัตกรรมเพื่อตอบโจทย์ท้าทายสังคม เพิ่มผลผลิตเทคโนโลยีการเกษตร และสร้างเทคโนโลยีภายในประเทศได้เป็นอย่างดี





ภาพที่ 1.2 การออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคที่รากพืช และเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ต้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่ง่าย มีประสิทธิภาพสูง สามารถเตรียมซ้ำและขยายสเกลได้ดี

1.5.2 ต้องค์ความรู้ใหม่จากการประยุกต์ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์

1.5.3 ได้เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค และเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์ที่สามารถต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้

1.5.4 ได้ผลงานอนุสิทธิบัตรหรือสิทธิบัตรและการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญและระบบการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์

2.1.1 ความสำคัญของระบบไฮโดรโปนิคส์

ไฮโดรโปนิคส์ (hydroponics) เป็นคำที่มาจากภาษากรีก 2 คำ คือคำว่า hydro แปลว่าน้ำ และคำว่า ponos แปลว่าทำงาน เมื่อรวมกันจึงมีความหมายว่าการทำงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำ[4] ดังนั้น การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์เป็นการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแต่ใช้น้ำที่มีธาตุอาหารพืชละลายอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ส่วนใหญ่จะนิยมปลูกผักกินใบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสั้นๆ เช่น ผักกาดหอม กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค กรีนคอส รูบีคอส[5] ซึ่งความสำคัญของการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์คือสามารถปลูกพืชได้ต่อเนื่องตลอดทั้งปี ใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อย ได้ผลผลิตสูง และที่สำคัญคือสามารถลดการทำลายหน้าดินได้เพราะไม่ต้องไถพรวน ไม่ต้องคำนึงถึงสภาพภูมิอากาศ คุณภาพดิน สามารถดูแล ควบคุมได้อย่างทั่วถึง ระบบไฮโดรโปนิคส์ที่นิยมปลูกแบ่งได้เป็น 5 ระบบตามลักษณะการไหลของน้ำและการวางตำแหน่งของแปลงผักซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2



ภาพที่ 2.1 ลักษณะการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

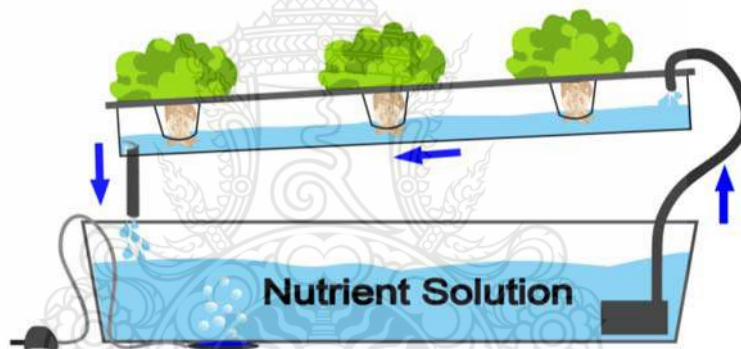
ที่มา: <https://www.indiamart.com/proddetail/hydroponics-systems-22730894833.html>

และ <https://greenphilaquaponics.wixsite.com/greenphil/aquaponics-system>

2.1.2 ระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์

ระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ แบ่งได้เป็น 5 ระบบ ตามลักษณะการไหลของน้ำและการวางตำแหน่งของแปลงผักได้ดังนี้

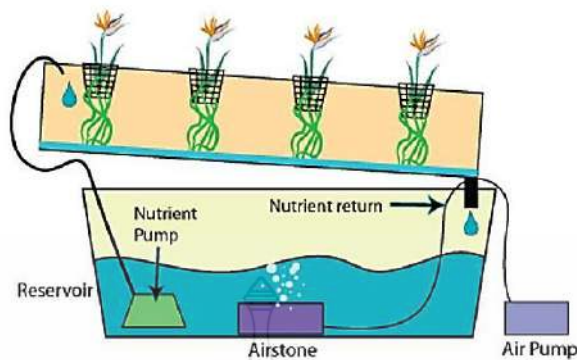
1. NFT (Nutrient Film Technique) เป็นการปลูกแบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางๆ บนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง โดยรางปลูกมีความกว้าง 5-35 เซนติเมตร สูงประมาณ 5 เซนติเมตร ยาว 5-10 เมตร ไม่ควรยาวเกิน 10 เมตร เพราะจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่หัวรากและท้ายรางมีความแตกต่างกัน ลักษณะของ NFT แสดงดังภาพที่ 2.2 และนอกจากนี้การปลูกพืชในระบบนี้จะพบข้อเสียคือมีราคาค่อนข้างสูงถ้าเทียบกับระบบการปลูกแบบอื่น ๆ และหากไฟฟ้าดับติดต่อกันเป็นเวลานาน ปื้มจะหยุดทำงาน ทำให้ต้นไม้ตาย เนื่องจากรางจะแห้งเร็วมาก[6, 7]



ภาพที่ 2.2 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT

ที่มา: <https://www.nosoilsolutions.com/nutrient-film-technique-nft-hydroponics/>

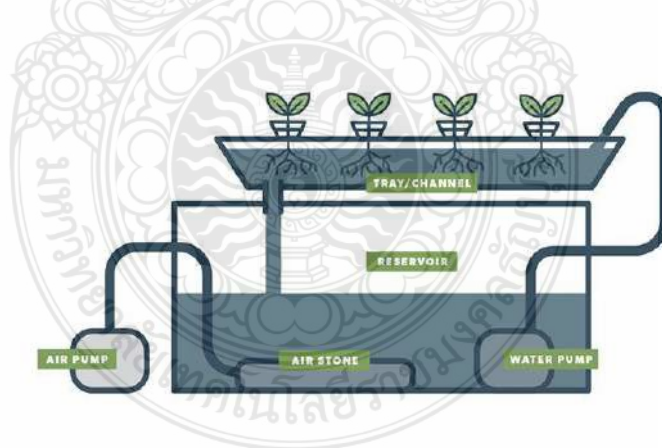
2. NFLT (Nutrient Flow Technique) เป็นการปลูกแบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นหนา ๆ บนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง โดยมีระดับความลึกของสารละลายประมาณ 5-10 มิลลิเมตร การปลูกพืชแบบ NFLT นี้รากพืชจะได้รับออกซิเจนตลอดเวลาที่น้ำไหลผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT

ที่มา: <https://cannabisnow.com/hydroponic-how-to-nutrient-flow-technique/>

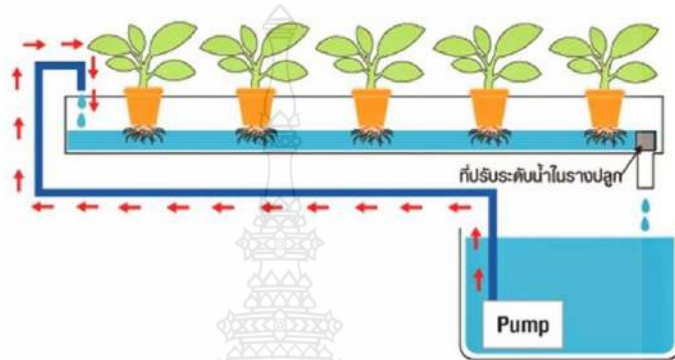
3. DFT (Deep Flow Technique) คือระบบที่รากปลูกไม่มีความลาดเอียง เป็นการปลูกแบบให้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายที่มีความลึกประมาณ 15- 20 เซนติเมตร โดยจะปลูกพืชไว้บนวัสดุที่ลอยน้ำได้เพื่อยึดลำต้น เช่น แผ่นโฟม แต่จะปล่อยให้รากเป็นอิสระในน้ำ นอกจากนี้มีการเพิ่มออกซิเจนให้ระบบโดยการใช้ปั๊มดูดสารละลายจากถังพักขึ้นมาใช้เพื่อให้เกิดการหมุนเวียน การปลูกพืชแบบ DFT ปริมาณน้ำจะมีมากกว่า NFT [8] ลักษณะของ DFT แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

ที่มา: <https://www.agritechtomorrow.com/article/2020/08/how-deep-flow-technique-dft-hydroponic-systems-work/12311>

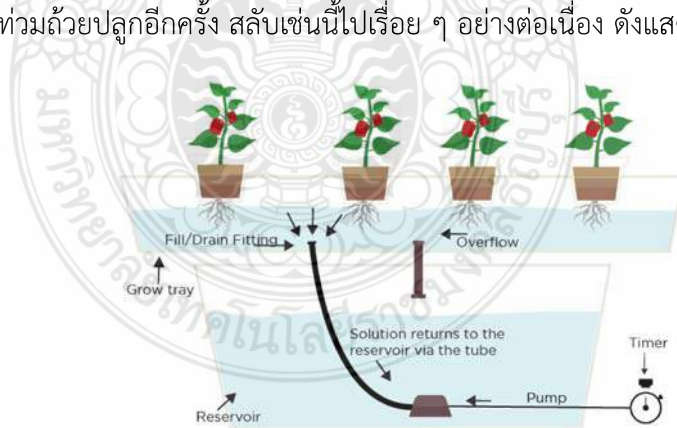
4. DRFT (Dynamic Root Floating Technique) เป็นการปลูกโดยให้อากาศไหลวนผ่านรากพืชที่แช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารโดยตรงอย่างต่อเนื่อง มีความลึกประมาณ 4 เซนติเมตร โดยสารละลายธาตุอาหารจะไหลลงสู่ถังบรรจุและจะไหลเวียนขึ้นไปในถาดปลูกด้วยปั้มน้ำ โดยด้านหัวของรางปลูกจะมีหัวพ่นอากาศเพื่อเติมอากาศให้สารละลายและด้านท้ายของรางปลูกจะมีที่ปรับระดับความสูงต่ำของสารละลาย[8] ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DRFT

ที่มา: <https://zen-hydroponics.blogspot.com/2014/11/blog-post.html>

5. FAD (Food and Drain) เป็นการปลูกพืชแบบผสมผสานระหว่างระบบ NFT และระบบ DFT โดยให้สารละลายธาตุอาหารท่วมถาดปลูกพืชและท่วมรากพืชอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วค่อย ๆ ระบายออกแล้วให้สารละลายท่วมถาดปลูกอีกครั้ง สลับเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ FAD

ที่มา: <https://www.trees.com/gardening-and-landscaping/ebb-and-flow-hydroponics>

ระบบที่นิยมปลูกในประเทศไทยคือ DFT (Deep Flow Technique) และ NFT (Nutrient Film Technique)

2.2 การควบคุมค่า EC และ pH ที่เหมาะสม

การปลูกผักด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นระบบที่รากของผักจะสัมผัสกับน้ำอยู่ตลอดเวลา ซึ่งน้ำจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอาหารของพืช ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนในสารละลายธาตุอาหาร ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) และความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) จึงมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตเป็นอย่างมาก ซึ่งผักแต่ละชนิดจะมีค่า EC และ pH ที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปในระบบไฮโดรโปนิคส์การวัดความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารโดยรวมจะวัดจากค่า Electrical Conductivity (EC) มีหน่วยเป็นมิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (mS/cm) หรือไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ($\mu\text{S/cm}$) ยิ่งค่า EC มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่าในสารละลายมีความเข้มข้นของธาตุอาหารที่สูงด้วย ค่า EC ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1 – 4 mS/cm ซึ่งค่า EC จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ถ้าในสารละลายมีค่า EC ต่ำ (น้อยกว่า 1.0 mS/cm) จะทำให้ผักสลัดมีรสชาติอร่อย ไม่ขม อ่อนนุ่ม แต่ถ้าผักที่ปลูกเป็นมะเขือเทศจะทำให้คุณภาพและรสชาติของผลผลิตไม่ดีเนื่องจากอ่อนนุ่มเกินไป นอกจากนี้ยังมีอายุการเก็บที่สั้น แต่เมื่อเพิ่มค่า EC ให้สูงขึ้นจะทำให้คุณภาพผลผลิตดีขึ้น พืชมีความแข็งแรงและมีการเจริญเติบโตเร็วขึ้น แต่ถ้าค่า EC สูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อรสชาติของผักได้ เช่นทำให้ผักสลัดมีรสขมและเกิดอาการยอดไหม้ได้ นอกจากค่า EC ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของผักแล้ว ค่า pH ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของผักได้เช่นกัน เนื่องจากค่า pH คือค่าความเป็นกรดหรือความเป็นด่างของสารละลายน้ำกับธาตุอาหารของพืช โดยค่า pH มีช่วงการวัดอยู่ที่ 1 – 14 โดยจะนับ 7 เป็นค่ากลาง ต่ำกว่า 7 เป็นกรด และสูงกว่า 7 ขึ้นไปเป็นเบส สำหรับการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์ค่า pH มีส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอาหารที่ใช้เลี้ยงพืช ถ้าน้ำที่ใช้ผสมธาตุอาหารพืชมีความเป็นกรดจะทำให้ธาตุอาหารพืชละลายตัวได้ดี พืชสามารถดูดซึมไปใช้งานได้ง่าย แต่ถ้าเป็นกรดสูงเกินไปรากพืชอาจถูกกรดกัดกร่อนจนทำให้รากพืชอ่อนแอส่งผลให้เชื้อโรคเข้าทำลายได้ง่าย แต่ถ้าใช้น้ำที่ใช้ผสมธาตุอาหารพืชมีความเป็นเบสสูงจะทำให้ธาตุอาหารพืชตกตะกอนจนพืชไม่สามารถดูดซึมไปใช้งานได้ ส่วนใหญ่วิธีลดค่า pH จะนิยมใช้กรดไนตริก (Nitric Acid; HNO_3) และกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid; H_3PO_3) เนื่องจากกรดทั้งสองชนิดนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นอนุมูลย่อยที่เป็นไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักของพืช และวิธีเพิ่มค่า pH จะนิยมใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium Carbonate) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) ซึ่งต่างทั้ง 2 ชนิดนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นอนุมูลย่อยที่เป็นโพแทสเซียม (K) ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักของพืชเช่นกัน โดยพืชที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์จะชอบความเป็นต่างเล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า EC และค่า pH ที่เหมาะสมของพืชแต่ละชนิด

ที่มา: <http://www.smartfarmdiys.com/article/ค่า-ph-และค่า-ec>

ชนิดพืช	ค่า EC	ค่า PH
กวางตุ้ง, ฮ่อเต้	1.5 - 2.5	6.0 - 7.0
กะหล่ำดอก	1.5 - 2.0	6.5 - 7.0
บล็อกเคอรี่	2.8 - 3.5	6.0 - 6.8
บลูเบอร์รี่	1.8 - 2.0	4.0 - 5.0
บ๊วย	1.8 - 5.0	6.0 - 6.5
ผักขม	1.8 - 2.3	6.0 - 7.0
มะเขือเทศ	2.0 - 4.0	6.0 - 6.8
สตรอเบอร์รี่	1.8 - 2.2	6.0 - 6.8
สลัด	1.1 - 1.7	6.0 - 7.0

2.3 โรคพืชต่าง ๆ ในระบบไฮโดรโปนิคส์และวิธีการป้องกัน

ระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นการปลูกพืชแบบใช้สารละลายธาตุอาหารหมุนเวียนมีข้อดีในการป้องกันแมลงศัตรูพืชและวัชพืช จึงสามารถขจัดปัญหาเรื่องการเกิดโรคพืชและแมลงที่อยู่ในดินได้ แต่ก็ยังพบปัญหาการเกิดโรคเนื่องจากเชื้อโรคอาจติดมากับสารละลายธาตุอาหารซึ่งสามารถแพร่กระจายได้หากมีการดูแลและการจัดการที่ไม่ดีพอ

2.3.1 โรคพืชต่าง ๆ ในระบบไฮโดรโปนิคส์ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1) โรคที่เกิดกับใบ (Foliar diseases) เกิดจากเชื้อที่แพร่ระบาดทางอากาศหรือเกิดจากแมลงที่เป็นพาหะ เช่น โรคราแป้ง และโรคใบจุด พบมากในฟาร์มหรือโรงเรือนที่เป็นระบบเปิดเนื่องจากเชื้อสามารถแพร่ระบาดได้ง่าย อาจปลิวมากับลมและในช่วงฤดูฝนสามารถเกิดโรคร่งง่ายมากเพราะเชื้อโรคจะเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีความชื้น เชื้อที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดโรคใบจุดคือ เชื้อ *Alternaria spp.*, *Cercospora spp.* และ *Septoria spp.* ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะโรคที่เกิดกับใบของการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์ (A) โรคราแป้ง และ (B) โรคใบจุด
ที่มา: <http://samphran.nakhonpathom.doae.go.th/ข่าวการระบาด/โรคราแป้ง.pdf>
และ <https://www.thairath.co.th/content/493829>

2) โรคที่เกิดกับราก (Root diseases) เกิดจากเชื้อที่ปนเปื้อนเข้าไปในระบบจ่ายสารละลายธาตุอาหาร อาจติดมาจากวัสดุที่ใช้ปลูก น้ำสำหรับใช้เตรียมสารละลายธาตุอาหาร ตลอดจนปลิวมากับละอองอากาศ เมื่อเชื้อตกสู่สารละลายธาตุอาหารจะสามารถแตกสปอร์ได้อย่างรวดเร็วและเมื่อเชื้อเข้าสัมผัสกับรากพืชก็จะก่อให้เกิดโรครากเน่าได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 2.8 เชื้อที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรครากเน่าคือเชื้อ *Pythium spp.*[9] ซึ่งสามารถเข้าทำลายรากพืชได้ตั้งแต่ระยะเพาะกล้าจนโตเต็มที่ และเมื่อใดก็ตามที่เชื้อดังกล่าวได้รับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเกิดโรค หรือเมื่อต้นพืชอ่อนแอ ก็จะสามารถพัฒนาเป็นระยะก่อโรคได้ จึงพบเสมอว่าโรครากเน่าในผักจะพบมากในช่วงฤดูร้อนและฟาร์มที่มีการจัดการไม่ดีพอ



ภาพที่ 2.8 ลักษณะโรคที่เกิดกับรากของการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์

ที่มา: <http://www.H2Ohydrogarden.com/ความรู้เบื้องต้น/สาเหตุสำคัญของโรคที่เกิดกับราก.html>

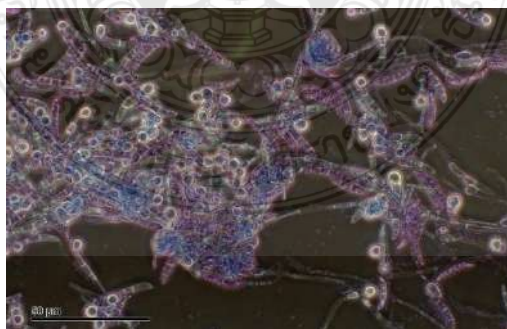
และนอกจากนี้ในสารละลายน้ำอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ เช่น เชื้อเอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli, E. coli*) ที่อาจติดมากับมือของเกษตรกรแล้วเกิดการปนเปื้อนในสารละลายน้ำสำหรับปลูกผักได้ ซึ่งถ้ามีการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในสารละลายน้ำจริงก็สามารถส่งผลต่อมนุษย์ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องหาเทคโนโลยีเข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว

2.3.2 ปัจจัยเสี่ยงในการเกิดโรคในผักไฮโดรโปนิิกส์

ปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดโรคในผักไฮโดรโปนิิกส์มีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมที่มีการจัดการ การดูแล และมีอากาศถ่ายเทที่ไม่ดี การปลูกในระบบเปิดหรือกลางแจ้งย่อมมีโอกาสเกิดโรคมกกว่า สภาพโรงเรือนปิดและที่สำคัญการเกิดโรคส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการปนเปื้อนของเชื้อโรคในน้ำ เชื้อโรคต่าง ๆ ได้แก่ เชื้อ *Pythium spp.* ที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรครากเน่า (ข้อมูลของเชื้อ *Pythium spp.* จะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2.1) และเชื้อ *E. coli* ที่จะก่อให้เกิดโรคในมนุษย์ซึ่งเชื่อนี้อาจติดมากับมือของเกษตรกรแล้วเกิดการปนเปื้อนในสารละลายน้ำสำหรับปลูกผักได้ (ข้อมูลของเชื้อ *E. coli* จะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2.2)

2.3.2.1 *Pythium spp.*

Pythium spp. เป็นสกุลของเชื้อราหรือที่เรียกว่า oomycetes ซึ่งส่วนใหญ่พบในสภาพแวดล้อมทางน้ำและดิน โดยเฉพาะในสภาพชื้นหรือมีน้ำขัง สิ่งมีชีวิตเหล่านี้อยู่ในกลุ่ม *Stramenopiles* ซึ่งรวมถึงจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น สาหร่ายและไดอะตอม ลักษณะโดยทั่วไปของเชื้อ *Pythium spp.* คือเป็นจุลินทรีย์ที่มีเส้นใยและไม่สังเคราะห์แสง สามารถผลิตเส้นใยแตกแขนง ไม่มีสี และมีนิวเคลียสหลายนิวเคลียสที่สามารถบุกรุกเนื้อเยื่อพืชได้ นอกจากนี้ *Pythium spp.* ยังเป็นที่รู้จักกันดีในเรื่องการทำให้เกิดโรคในพืชคือโรครากและลำต้นเน่า เนื่องจากเชื้อ *Pythium spp.* เป็นเชื้อก่อโรคพืชและสามารถทำให้เกิดโรคในพืชได้หลายชนิด ทั้งผัก ผลไม้ ไม้ประดับ หรือแม้แต่หญ้า ส่งผลให้ผลผลิตพืชลดลงและมีค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้สารเคมี อาการของการติดเชื้อ *Pythium spp.* ในพืชคือ ใบเหี่ยวแห้ง ใบเหลือง การเจริญเติบโตแคระแกรน รากเน่าและมีสีเหลืองดำ ลักษณะของเชื้อ *Pythium spp.* แสดงดังภาพที่ 2.9



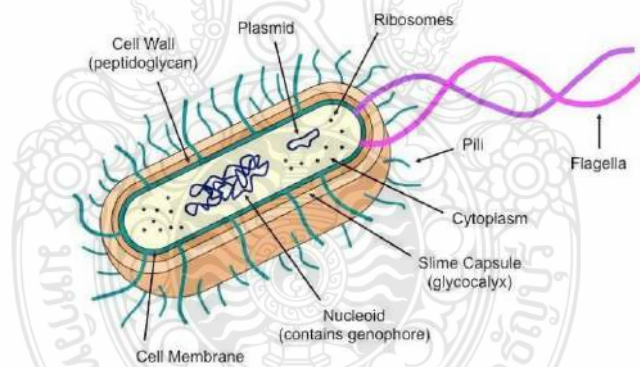
ภาพที่ 2.9 รูปร่างของเชื้อ *Pythium spp.*

ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pythium>

2.3.2.2 *Escherichia coli* (*E. coli*)

Escherichia coli มักเรียกสั้น ๆ ว่า *E. coli* เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่เราพบได้ทั่วไปในลำไส้ของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น มีบทบาทในการย่อยอาหารที่รับประทานเข้าไปและผลิตวิตามินบางชนิด แต่เชื้อ *E. coli* บางชนิดอาจทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยในมนุษย์ได้ เช่น การบริโภคน้ำหรืออาหารที่มีการปนเปื้อนของเชื้ออาจทำให้เกิดอาการป่วยในระบบทางเดินอาหาร เช่น ท้องเสีย ปวดท้อง และในกรณีที่รุนแรงอาจเกิดกลุ่มอาการเม็ดเลือดแดงแตก (HUS) ซึ่งอาจทำให้ไตวายและเป็นอันตรายถึงชีวิตได้

ลักษณะและรูปร่างของเชื้อ *E. coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria) ที่มีรูปร่างเป็นแท่ง (rod shape) สามารถเคลื่อนที่โดยใช้แฟลกเจลลาที่มีอยู่รอบตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ไม่สร้างสปอร์ เป็น facultative anaerobe ที่สามารถเจริญได้ทั้งที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนและเป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์ม (coliform) ประเภท fecal coliform ซึ่งเป็นโคลิฟอร์มที่พบในอุจจาระของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น รอบๆ เซลล์จะมีแคปซูลบางๆ ห่อหุ้มเซลล์ไว้จึงส่งผลให้เชื้อ *E. coli* ทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น กรด-ด่าง และที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี



ภาพที่ 2.10 รูปร่างและลักษณะของเชื้อ *E. coli*

ที่มา: <https://www.vedantu.com/question-answer/is-e-coli-a-eukaryotic-class-11-biology-cbse-60ead339db227069aa3f8138>

2.3.3 การป้องกันและกำจัดเชื้อโรคในระบบน้ำของผักไฮโดรโปนิคส์

ในปัจจุบันมีวิธีการกำจัดเชื้อโรคในน้ำที่ก่อให้เกิดโรครากเน่าและการกำจัดเชื้อ *E.coli* ที่เป็นเพื่อนในสารละลายน้ำหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยที่ต่างกัน ดังนี้

2.3.3.1 กำจัดเชื้อโรคในน้ำที่ก่อให้เกิดโรครากเน่า

- การเปลี่ยนน้ำในระบบบ่อยๆ

การเปลี่ยนน้ำเพื่อชะสปอร์ของเชื้อราออกบางส่วนเท่านั้น แต่ไม่สามารถกำจัดเชื้อได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย แต่สิ้นเปลืองน้ำและมีค่าใช้จ่ายจากการใช้น้ำที่สูงมาก

- วิธีการแก้ปัญหาทางชีวภาพ

การใช้เชื้อราปฏิปักษ์ยับยั้งการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคด้วยการแย่งที่อยู่อาศัย สารอาหารที่จำเป็น และสร้างสารปฏิชีวนะที่เป็นอันตรายต่อเชื้อก่อโรคซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อจำกัดด้านการใช้งานและระยะเวลาในการใช้และต้องคอยสังเกตอาการพืชก่อนแล้วใช้สารทางชีวภาพในการกำจัดซึ่งอาจจะไม่ทันต่อการระบาดของโรคได้

- วิธีการแก้ปัญหาโดยใช้สารเคมี

ใช้สารเคมีที่ออกฤทธิ์ในการกำจัดเชื้อที่ก่อให้เกิดโรค ส่วนใหญ่ต้องคอยสังเกตอาการพืชก่อนแล้วใช้สารเคมีในการกำจัด ซึ่งอาจจะไม่ทันต่อการระบาดของโรคได้ จุดเด่นของวิธีนี้คือเป็นวิธีที่ ง่าย สะดวกในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพ แต่อาจมีสารเคมีตกค้างในระบบหลังกระบวนการนำมาใช้ได้ ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมาก

2.3.3.2 วิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ด้วยการควบคุมทางกายภาพ

- การใช้ความร้อน

แหล่งที่มาของความร้อนพบได้หลายแหล่ง เช่นการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิสูง การต้มน้ำให้เดือดที่อุณหภูมิ 100 °C และการใช้ไอน้ำภายใต้ความดันโดยใช้หม้อนิ่งความดัน (Autoclave) ซึ่งวิธีการใช้ความร้อนนี้สามารถทำลายเชื้อได้ 50-80% เท่านั้น ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่นิยมแต่ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ความร้อนสำหรับถนอมอาหาร

- การใช้รังสี

โดยปกติรังสีที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีพลังงานที่มาก และมีอำนาจทะลุทะลวงสูงสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งรังสีที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้มี 2 ชนิดคือ

1) รังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือรังสียูวี เป็นรังสีที่นิยมใช้ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์มาก โดยจะเข้าทำลายโครงสร้างของเซลล์จุลินทรีย์ เช่น โปรตีน DNA RNA และสารอินทรีย์ต่าง แต่รังสีนี้มีอำนาจทะลุทะลวงที่ต่ำ

2) รังสีที่มีการแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing radiation) รังสีนี้มีอำนาจทะลุทะลวงสูงสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์ได้ และไม่ทำให้เกิดความร้อน เช่นรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์

- การใช้คลื่นเสียง

คลื่นเสียงสามารถทำลายผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ได้ โดยจะทำให้ผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์แตกและของเหลวภายในเซลล์ (Cytoplasm) ไหลออกมา

- การใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง

เป็นการใช้ความเร็วในการทำให้จุลินทรีย์ตกตะกอนแยกออกจากของเหลว ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับแยกจุลินทรีย์มากกว่าการทำลายจุลินทรีย์

2.3.3.3 วิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ด้วยการใช้สารเคมี

สารเคมีที่มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์ได้ โดยจะทำให้โปรตีนและกรดนิวคลีอิกเสียสภาพ เช่นคลอรีน (Chlorine) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ไอโอดีน (Iodine) พอร์มอลดีไฮด์ (Formaldehyde) และเอทิล แอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)

ดังนั้นระบบไฮโดรโปนิคส์ยังต้องมีกระบวนการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการเกิดโรคต่างๆ รวมถึงการควบคุมการแตกตัวของปุ๋ยในสารละลายน้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตของการปลูกพืชในระบบไฮโดรโปนิคส์

2.4 ธาตุอาหารสำหรับไฮโดรโปนิคส์

2.4.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช

ปุ๋ยสำหรับการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์เป็นสารละลายธาตุอาหารสูตรพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อให้มีองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืชในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีดิน ปุ๋ยไฮโดรโปนิคส์มีหลากหลายสูตรและหลายประเภทขึ้นอยู่กับความต้องการของพืชที่ปลูก ซึ่งปุ๋ยทุกชนิดจะมีธาตุอาหารไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) เป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็น

สำหรับการเจริญเติบโตของพืช และนอกจากนี้พืชยังมีส่วนประกอบของธาตุอาหารรองที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชเช่นกัน ธาตุอาหารรองที่พบ เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และซัลเฟอร์ (S) อีกทั้งพืชยังต้องการสารอาหารรองในปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โบรอน (B) และโมลิบดีนัม (Mo) สำหรับกระบวนการทางชีวเคมีต่าง ๆ หน้าที่ของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และสารอาหารรองแสดงดังตารางที่ 2.2

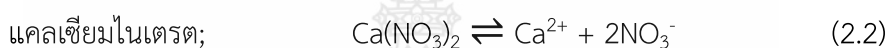
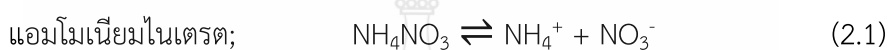
ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และสารอาหารรอง

ที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki/สารอาหารสำหรับพืช>

ชื่อธาตุอาหาร	ขาด/เกิน	อาการที่สังเกตได้
ไนโตรเจน (N)	ขาด	ใบเหลือง การเติบโตของพืชและผลไม่ดี
	เกิน	ใบเขียวเข้ม พืชอาจไม่ค่อยให้ผล
ฟอสฟอรัส (P)	ขาด	ใบอาจเป็นสีม่วง; การเติบโตของพืชช้า
	เกิน	ขาดจุลสารอาหาร เช่น เหล็ก หรือ สังกะสี
โปแตสเซียม (K)	ขาด	ใบแก่จะเหลืองแล้วใบจะตาย และผลเติบโตไม่ปกติ
	เกิน	เกิดอาการขาดแมกนีเซียม หรืออาจขาดแคลเซียมด้วย
แคลเซียม (Ca)	ขาด	พืชเติบโตช้าลง หน่อใหม่ตาย และผลเติบโตไม่ดี
	เกิน	เกิดอาการขาดแมกนีเซียมหรือโปแตสเซียม
แมกนีเซียม (Mg)	ขาด	ใบแก่จะเหลืองระหว่างเส้นใบ ผลเติบโตไม่ดีและออกน้อย
	เกิน	พืชเติบโตช้า
กำมะถัน (S)	ขาด	เหลืองที่ใบอ่อน
	เกิน	ใบร่วงก่อนเวลา
เหล็ก (Fe)	ขาด	จุดเหลืองหรือขาวตามเส้นใบของใบอ่อน
	เกิน	ใบเป็นสีน้ำตาล หรือ เป็นจุดสีน้ำตาลขึ้น
แมงกานีส (Mn)	ขาด	ใบแก่จะมีวงด่างสีเหลืองหรือขาวขึ้น และ อาจมีจุดสีน้ำตาลขึ้นอยู่ในวงต่างด้วย
	เกิน	ใบอ่อนจะเหลืองระหว่างเส้นใบและใบจะมีขนาดเล็กกว่าปกติ
สังกะสี (Zn)	ขาด	อาการเหลืองระหว่างเส้นใบในใบอ่อน และใบมีขนาดเล็กกว่าปกติ
	เกิน	เกิดอาการเหล็กได้

ในการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์ ธาตุอาหารหลักที่สำคัญที่สุด 3 ชนิดต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) โดยทั่วไปธาตุอาหารเหล่านี้จะได้รับการนำมาในรูปแบบของปุ๋ยและการแยกตัวของธาตุอาหารเหล่านี้หมายถึงกระบวนการที่ทำให้ธาตุอาหารอยู่ในรูปไอออนิกเพื่อการดูดซึมของพืช

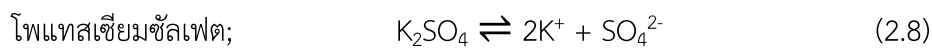
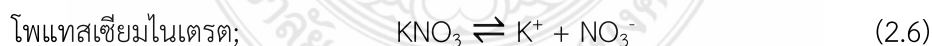
- ไนโตรเจน (N) ในระบบไฮโดรโปนิคส์มักอยู่ในรูปไอออนไนเตรต (NO_3^-) หรือแอมโมเนียม (NH_4^+) สามารถนำไปใช้ผ่านรากของพืชได้โดยตรง ตัวอย่างสมการการแตกตัวของปุ๋ย N แสดงดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2



- ฟอสฟอรัส (P) โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แต่อย่างไรก็ตาม ไอออนฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ตัวอย่างสมการการแตกตัวของปุ๋ย P แสดงดังสมการที่ 2.3 – 2.5



- โพแทสเซียม (K) เป็นโพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่งเป็นไอออนที่พร้อมสำหรับการดูดซึมของพืช ตัวอย่างสมการการแตกตัวของปุ๋ย K แสดงดังสมการที่ 2.6 – 2.8



2.4.2 ผลของอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ต่อประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ย

อนุมูลไฮดรอกซิลเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการทำลายสารประกอบอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม เมื่ออนุมูลไฮดรอกซิลสัมผัสกับโมเลกุลอินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารอินทรีย์นั้นนำไปสู่การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในที่สุด เช่น ตัวอย่างของปุ๋ย การมีอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสารละลายธาตุอาหารสามารถเร่งการสลายตัวของส่วนประกอบอินทรีย์ในปุ๋ยได้ผ่านกระบวนการที่เรียกว่าการออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล การสลายตัวนี้สามารถปล่อยสารอาหารและสารประกอบอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ ดังสมการปฏิกิริยาการแยกตัวของปุ๋ยที่ได้มาจากไฮดรอกซิลที่ 2.9 และ 2.10

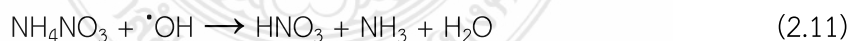


สมการข้างต้นแสดงถึงปฏิกิริยาแบบง่ายแต่ในความเป็นจริงปุ๋ยอินทรีย์จะประกอบด้วยโมเลกุลอินทรีย์ต่างๆ และอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับส่วนต่างๆ ของโมเลกุลเหล่านี้ นำไปสู่ผลิตภัณฑ์ย่อยสลายต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอื่นๆ และปุ๋ยอิสระที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลย

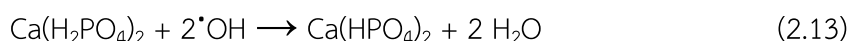


ในสมการนี้ R-CH_3 แสดงถึงสารประกอบอินทรีย์ที่พบในปุ๋ย ปฏิกิริยานี้เกี่ยวข้องกับอนุมูลไฮดรอกซิลที่ดึงอิเล็กตรอนจากสารประกอบอินทรีย์ ทำให้เกิดกรดคาร์บอกซิลิก (R-COOH) และน้ำ (H_2O) สมการที่ 2.11 – 2.15 แสดงตัวอย่างการแตกตัวของธาตุอาหารหลักในสภาวะที่สารละลายธาตุอาหารมีส่วนประกอบของ $\cdot\text{OH}$

สารประกอบไนโตรเจน (เช่น แอมโมเนียมไนเตรต):



สารประกอบฟอสฟอรัส (เช่น ซูเปอร์ฟอสเฟต):



2.5 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ แบบที่เรีย และเชื้อจุลินทรีย์

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ แบบที่เรีย และเชื้อจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกจะเกิดปฏิกิริยาในสารละลายน้ำอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อเกิดกระบวนการออกซิเดชันของน้ำกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radicals) หรือสารแอกทีฟจากไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (unpaired electron) อยู่ในวงโคจรวงนอกสุด ทำให้ไม่เสถียร มีความไม่คงตัว และมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นได้สูง โดยอนุมูลอิสระหรือสารแอกทีฟดังกล่าวจะไปแย่งจับหรือดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่น ๆ เพื่อให้ตัวมันเองเสถียรมากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงหรือโมเลกุลที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปนั้นเกิดการสลายตัวหรือโครงสร้างถูกทำลายไป ซึ่งอนุมูลอิสระและสารที่สามารถเกิดจากกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีคลอไรด์ละลายในน้ำ ตัวอย่างเช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$) กรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl) และไฮโปคลอไรต์ ไอออน (OCl^-) ซึ่งมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

2.5.1 อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$)

อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$) เป็นสารอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่แรงสูง (reactive oxygen species, ROS) ซึ่งเป็นตัวที่มีความไวสูงสุดในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ สารชีวโมเลกุลต่างๆ องค์ประกอบของเซลล์ เช่นสามารถทำให้โครงสร้างดีเอ็นเอ (DNA) โปรตีน และไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์เสียหายได้ นอกจากนี้ $\cdot\text{OH}$ ยังสามารถแพร่ผ่านโครงสร้างผนังเซลล์ชั้นนอกของแบคทีเรียเข้าสู่ชั้นเมมเบรนและจะออกซิไดซ์ชั้นของเมมเบรนโดยการดึงอิเล็กตรอนจึงทำให้แบคทีเรียนั้นถูกทำลายและตายลงในที่สุด ดังนั้นกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียเกิดจาก $\cdot\text{OH}$ ที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงจะเข้าไปดึงอิเล็กตรอนของสารประกอบต่าง ๆ ของสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ และแบคทีเรียทำให้โครงสร้างของสารประกอบเหล่านั้นถูกทำลายและย่อยสลายไปในที่สุด[10] แต่อย่างไรก็ตาม $\cdot\text{OH}$ มีอายุ (life time) ค่อนข้างสั้นอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาที ซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อจำกัดคือข้อดีอนุมูล $\cdot\text{OH}$ ไม่เกิดการตกค้างหรือสะสมในระบบถือว่าเป็นเทคโนโลยีสะอาด (clean technology) ได้เป็นอย่างดี ส่วนข้อจำกัดคือการเกิดปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกผ่านกลไก $\cdot\text{OH}$ จะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้า

ชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ดังนั้นการออกแบบระบบให้สารอินทรีย์หรือเชื้อจุลินทรีย์ได้สัมผัสผิวหน้าชีวไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบ

2.5.2 กรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl)

เป็นสารประกอบทางเคมีที่เป็นกรดอ่อน นิยมใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส และจุลินทรีย์อื่น ๆ โดย HOCl จะไปทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์และโปรตีนของเชื้อโรคเหล่านี้ ทำให้โครงสร้างถูกทำลาย ย่อยสลายและตายลงไปในที่สุด

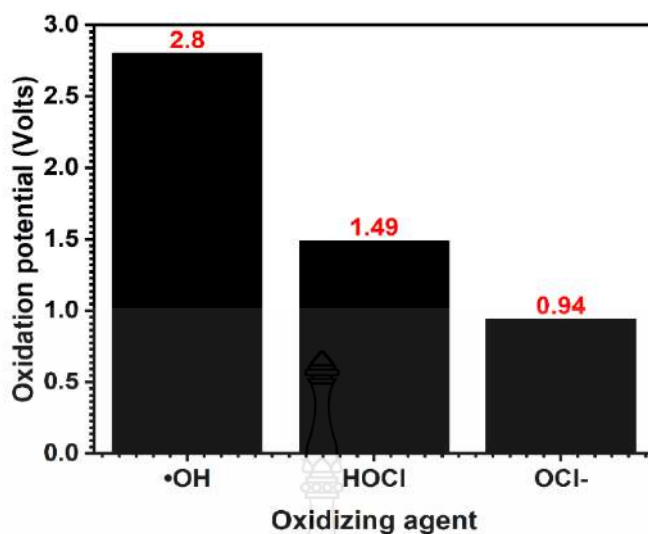
2.5.3 ไฮโปคลอไรต์ ไอออน (OCl^-)

ไฮโปคลอไรต์ ไอออน เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ออกฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรีย โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เกิดการออกซิไดซ์ทำให้เซลล์ถูกทำลายและตายอย่างรวดเร็ว ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษจะใช้เป็นสารฟอกขาว แต่มีข้อควรระวังคือเป็นสารที่มีความคงตัวต่ำ มีความเสถียรน้อย เมื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะปลดปล่อยแก๊สคลอรีน (Cl_2) ออกมาจนเกิดอันตรายต่อผู้สูดดมได้

แอกทีฟคลอรีนสามารถอยู่ในฟอร์ม HOCl และ OCl^- ขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย ถ้าค่า pH ต่ำ (สถานะที่เป็นกรด) จะมี HOCl มากขึ้น ในขณะที่ค่า pH สูง (สถานะที่เป็นด่าง) จะมี OCl^- มากขึ้น

2.5.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุมูลอิสระ

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุมูลอิสระ $\cdot\text{OH}$ กับ สารประกอบแอกทีฟคลอรีนคือ กรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl) และ ไฮโปคลอไรต์ไอออน (Hypochlorite ion, OCl^-) ที่ค่าความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidation potential) พบว่า $\cdot\text{OH}$ มีค่าศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ HOCl 1.49 โวลต์ และ OCl^- 0.94 โวลต์ ตามลำดับ ดังนั้น $\cdot\text{OH}$ จึงมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงที่สุด แสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 เปรียบเทียบความแรงในการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกับแอกทีฟคลอรีน

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเสถียรของอนุมูลอิสระ $\cdot\text{OH}$ กับ สารประกอบแอกทีฟคลอรีนแล้วพบว่า $\cdot\text{OH}$ มีอายุการใช้งานสั้นมาก โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาทีในสารละลายที่เป็นน้ำ เนื่องจากมีปฏิกิริยาสูง ส่วน HOCl มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าในสารละลายที่เป็นน้ำเมื่อเทียบกับ $\cdot\text{OH}$ ทำให้มีความคงทนมากกว่า และ OCl^- มีอายุการใช้งานยาวนานในสารละลายที่เป็นน้ำเมื่อเทียบกับ $\cdot\text{OH}$ และ HOCl ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในสารละลายที่เป็นน้ำ OCl^- มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า HOCl และ $\cdot\text{OH}$ ตามลำดับ

2.5.5 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process)

ในงานวิจัยนี้สนใจกระบวนการผลิตอนุมูลอิสระ $\cdot\text{OH}$ และแอกทีฟคลอรีน คือ HOCl และ OCl^- ที่สามารถเกิดได้จากกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีคลอไรด์ไอออน (Chloride ion, Cl^-) ซึ่งมีหลายกระบวนการดังนี้

2.5.5.1 กระบวนการโฟโตเคมี (Photochemical process)

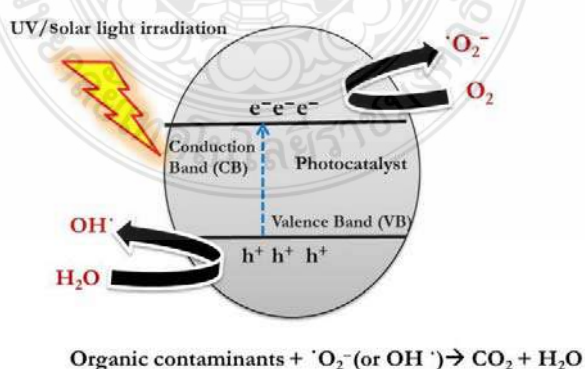
กระบวนการโฟโตเคมีหรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในการกระตุ้นเพื่อสร้างสารอนุมูลอิสระ[11] แสงจะถูกดูดซับด้วยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ทำให้เกิดเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเคมีในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ และบำบัดน้ำเสียยังมีข้อจำกัด เช่นความเข้มของแสง และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า [12, 13]

2.5.5.2 กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเคมีไฟฟ้าแต่ไม่มีการเติมสารเคมีลงไป ในกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้าสารอินทรีย์หรือเชื้อจุลินทรีย์จะถูกกำจัดด้วยวิธี anodic oxidation และถูกทำลายจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อจำกัดคือสิ้นเปลืองพลังงานมาก[14, 15]

2.5.5.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)

กระบวนการที่อาศัยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงซึ่งสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงาน (band gap energy, E_g) เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานแถบของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ จะทำให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอน (electron; e^-) และช่องว่างที่มีประจุบวก (hole; h^+) โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากชั้นวาเลนซ์ (valence band; VB) ไปที่ชั้นการนำ (conduction band; CB) ซึ่งอิเล็กตรอนที่แถบการนำจะรีดิวซ์ออกซิเจน (O_2) ให้กลายเป็นอนุมูลของซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot O_2^-$) และจะเกิด h^+ ที่ชั้นวาเลนซ์ ซึ่ง h^+ ที่เกิดขึ้นนี้จะมีสมบัติที่มีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์น้ำที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $\cdot OH$) ซึ่ง $\cdot OH$ ที่เกิดขึ้นนี้มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงได้เป็นอย่างดี[16] ดังแสดงในภาพที่ 2.12 แต่กระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (recombination effect) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง



ภาพที่ 2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก[17]

2.5.5.4 กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic process)

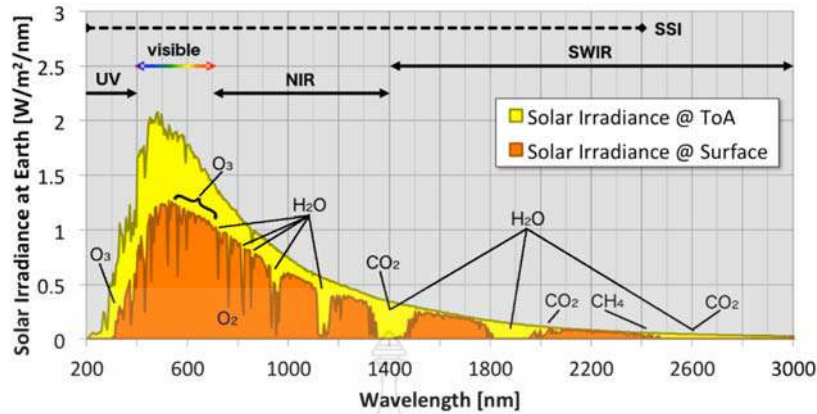
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกเป็นกระบวนการที่พัฒนาต่อยอดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเพื่อลดข้อจำกัดปรากฏการณ์ Recombination effect โดยการตรึงสารกึ่งตัวนำที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแอโนดและเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าทางบวกเมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานแถบของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ จะทำให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอน (electron; e^-) และช่องว่างที่มีประจุบวก (hole; h^+) โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากชั้นวาเลนซ์ (valence band; VB) ไปที่ชั้นการนำ (conduction band; CB) และจะเกิด h^+ ที่ชั้นวาเลนซ์ ซึ่ง h^+ ที่เกิดขึ้นนี้จะมีสมบัติที่มีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์น้ำที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $\cdot OH$) ซึ่ง $\cdot OH$ ที่เกิดขึ้นนี้มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และยังสามารถแพร่กระจายมายังบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของสารละลายเพื่อออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยากับสารที่อยู่ในน้ำและเกิดกระบวนการป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งคือการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าทางบวกที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อเร่งการส่งผ่านและเหนี่ยวนำการไหลของอิเล็กตรอนที่ชั้น CB ให้ไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งจะช่วยลดปรากฏการณ์การรวมกันของ e^- และ h^+ ซึ่งเทคนิคนี้ถือว่าเป็นวิธีที่ง่าย มีประสิทธิภาพ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารอินทรีย์หรือเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี [18, 19] แต่อย่างไรก็ตามยังต้องมีการพัฒนาในระดับสเกลที่สามารถใช้งานได้จริง โดยงานวิจัยนี้มีหลักในการพัฒนาสองส่วน คือ 1. พัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ บนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorine dope tin oxide) ให้มีประสิทธิภาพ เสถียร คงทน ใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถขยายสเกลขนาดใหญ่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง และ 2. การพัฒนาออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกให้มีขนาดกะทัดรัด สะดวก และมีประสิทธิภาพสูงเหมาะสำหรับควบคุมการเกิดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์

2.6 การพัฒนาข้าวไฟฟ้าแอนตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก

สำหรับการพัฒนาข้าวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกนั้นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี ดังต่อไปนี้

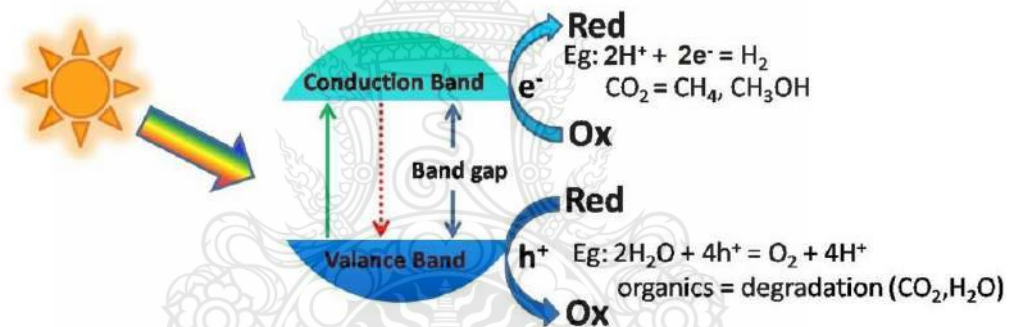
2.6.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง

แสงธรรมชาติที่พบมากที่สุดบนโลกนี้คือแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบไปด้วยแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation; UV) ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นในช่วง 1 - 400 nm มีปริมาณ 3% ของรังสีอาทิตย์ทั้งหมดที่ระดับผิวโลก ซึ่งเป็นรังสีมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือช่วง UV-A, UV-B และช่วง UV-C แสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible radiation) มีค่าความยาวคลื่นในช่วง 400 - 700 nm มีปริมาณ 44% ของรังสีอาทิตย์ทั้งหมดที่ระดับผิวโลกและแสงช่วงอินฟราเรด (Infrared radiation; IR) ที่แผ่จากดวงอาทิตย์มาถึงโลกจะมีความยาวคลื่นในช่วง 750-100,000 nm มีปริมาณ 53% ของรังสีอาทิตย์ทั้งหมดที่ระดับผิวโลก โดยมีบางส่วนถูกสะท้อนออกนอกโลก บางส่วนที่ทะลุผ่านเข้าชั้นบรรยากาศจะถูกดูดกลืน (absorption) และกระเจิงออก (scattering) ด้วยอนุภาคก๊าซชนิดต่างๆ ในชั้นบรรยากาศ โดยมีไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอนุภาคสารที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดไว้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีผลทำให้บรรยากาศของโลกมีความอบอุ่นขึ้น รังสีอินฟราเรดมีชื่อเรียกอีกชื่อว่า รังสีใต้แดงหรือรังสีความร้อน พบว่าแสงช่วงที่ตามองเห็นมีปริมาณของแสงต่อพื้นที่สูงที่สุด ดังแสดงส่วนประกอบของแสง (Spectral irradiance) ตามช่วงความยาวคลื่นแสงในแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าแสงช่วงที่ตามองเห็นมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับแสงในช่วงยูวี และอินฟราเรด ดังนั้นเพื่อให้สารกึ่งตัวนำมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงธรรมชาติได้มากที่สุดจึงจำเป็นต้องเลือก กึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของข้าวไฟฟ้าให้ตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.13 ปริมาณแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์

ที่มา: <https://sunclimate.gsfc.nasa.gov/article/solar-irradiance>



ภาพที่ 2.14 กระบวนการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ

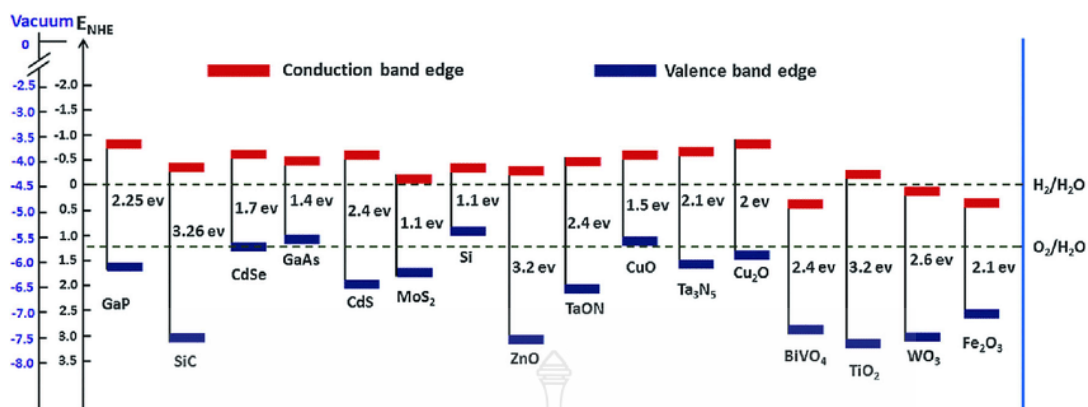
ที่มา: <https://chemistrydocs.com/photocatalysis-types-mechanism-and-applications/>

ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับการการพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำคือ ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงาน (Band gap energy, E_g) เป็นค่าที่แสดงความต่างของระดับชั้นพลังงานของแถบวาเลนซ์ (valence band, VB) กับแถบนำไฟฟ้า (conduction band, CB) ของสารกึ่งตัวนำ [20] จากภาพที่ 2.14 แสดงการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสงทำให้เกิดการแยกกันของประจุระหว่าง e^- และ h^+ โดย e^- ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำจะต้องใช้ค่าพลังงานแสง พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Band gap energy; E_g) จนมีพลังงานสูงพอที่จะส่งผลทำให้ e^- เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้และเกิดการนำไฟฟ้าหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไป โดยสมการที่ 2.16 นี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงาน (E_g) ของสารกึ่งตัวนำกับค่าความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ (λ)

ซึ่งผู้วิจัยสามารถใช้สมการนี้ในการทำนายความสามารถในการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดในช่วงความยาวคลื่นแสงได้

$$E_g \text{ (eV)} = 1,240/\lambda \text{ (nm)} \quad (2.16)$$

จากสมการข้างต้นนี้ ผู้วิจัยสามารถทำนายได้ว่าสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นคือในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ควรมีความห่างระหว่างแถบพลังงานน้อยกว่า 3.1 eV และนอกจากนี้ระดับชั้นพลังงานของแถบวาเลนซ์และแถบการนำก็มีความสำคัญในการพิจารณาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แบบที่เรีย และสารอินทรีย์ ดังภาพที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันของน้ำ เน้นการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค โดยมีหลักการคือถ้าต้องการให้สารกึ่งตัวนำเกิดปฏิกิริยารีดักชันน้ำ สารกึ่งตัวนำชนิดนั้นควรมีระดับแถบการนำที่สูงกว่าหรือไปทางลบ (more negative potential) มากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (0 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน Normal Hydrogen Electrode ; NHE) แต่ถ้าต้องการให้สารกึ่งตัวนำเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้ำ สารกึ่งตัวนำชนิดนั้นควรมีแถบวาเลนซ์ที่ต่ำกว่าหรือไปทางบวกมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้ำ (more positive potential) ปกติค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำเท่ากับ 1.23 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน NHE เช่นถ้าต้องการที่จะกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคจะต้องใช้สารที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ เช่น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical ; $\cdot\text{OH}$) ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้ควรมีแถบวาเลนซ์ที่ต่ำกว่าหรือไปทางบวกมากกว่า 2.8 V จึงจะสามารถเกิดการออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็น $\cdot\text{OH}$ ได้ ซึ่ง $\cdot\text{OH}$ เป็นสารที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถออกซิไดซ์จุลินทรีย์ แบบที่เรีย ที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคในรากพืชได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบไฮโดรโปนิคส์[21]

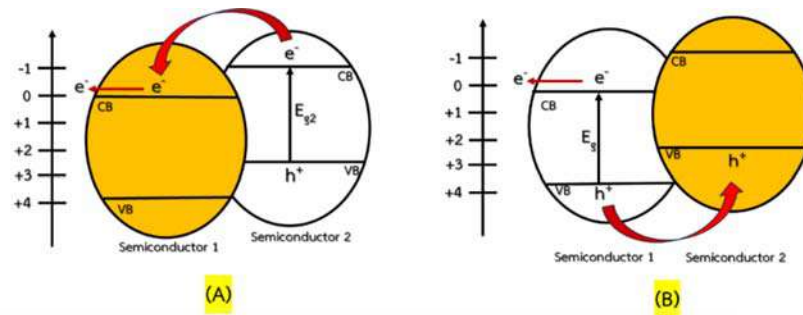
2.6.2 การพัฒนาสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอน

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสง พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนที่มีค่าพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy; E_g) ของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการแยกกันของประจุระหว่างอิเล็กตรอน (electron; e^-) และช่องว่างที่มีประจุบวก (hole; h^+) โดย e^- จะเคลื่อนที่ไปที่แถบการนำ และเกิด h^+ ที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งในแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปจะคงสภาพในช่วงเวลาสั้นๆ ก่อนที่อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานถ้าไม่มีการถ่ายโอนประจุที่เกิดขึ้นไปและเกิดการตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิมหรือที่เรียกว่า Recombination effect ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าลดลง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกของขั้วไฟฟ้าสามารถทำได้โดยพัฒนากระบวนการส่งผ่านประจุที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งถือว่ามีสำคัญยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ซึ่งมีหลากหลายวิธี ดังต่อไปนี้

2.6.2.1 การเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ

- การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) ทำได้โดยการเพิ่มสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานที่แถบการนำ (CB) ต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำเดิม ทำให้อิเล็กตรอนไหลจากสารกึ่งตัวนำตัวที่เพิ่มไปหาสารกึ่งตัวนำตัวเดิมเพื่อเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน แสดงดังภาพที่ 2.16A

- การเร่งการส่งผ่านโฮล (h^+) สามารถทำได้โดยการตรึงสารกึ่งตัวนำที่มีค่าระดับพลังงานที่แถบวาเลนซ์ (VB) สูงกว่าแถบวาเลนซ์สารกึ่งตัวนำตัวเดิม เพื่อเร่งการส่งผ่านโฮล ดังแสดงในภาพที่ 2.16B

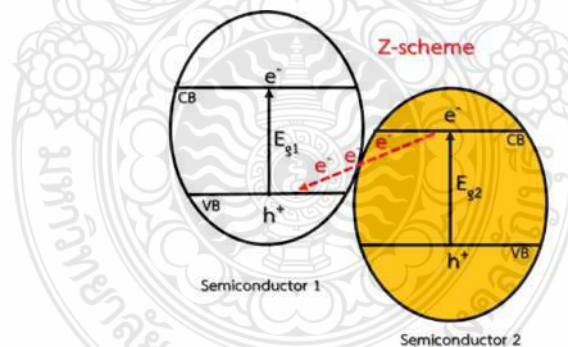


ภาพที่ 2.16 การเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ (A) การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) และ (B) การเร่งการส่งผ่านช่องว่าง (h^+)

2.6.2.2 การใช้สารกึ่งตัวนำผสม

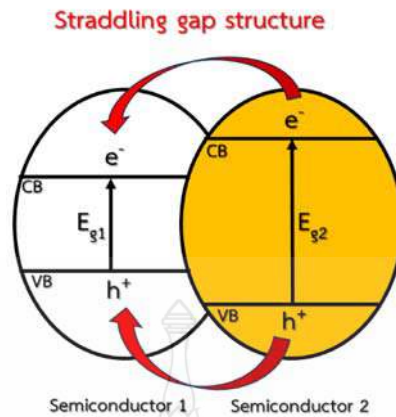
การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกันสามารถจัดกลไกได้หลายหลายแบบ เช่น Z-scheme junctions, n-n junctions, และ p-n junctions ตามรูปแบบของการพิจารณาค่าแถบพลังงาน ดังนี้

- การผสมสารกึ่งตัวนำแบบ Z-scheme คือสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 มีค่าพลังงานของแถบวาเลนซ์ต่ำกว่าค่าแถบการนำของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากชั้นแถบการนำของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ไปรวมกับโฮล (h^+) ที่ชั้นแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 2.17



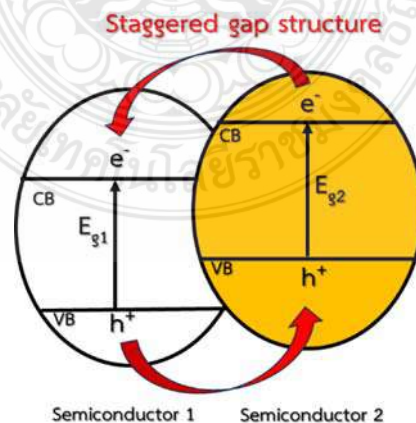
ภาพที่ 2.17 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Z-scheme

- การผสมสารกึ่งตัวนำแบบ Straddling gap structure คือสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 ที่มีค่าแถบการนำ (CB) ที่ต่ำกว่า และมีค่าแถบวาเลนซ์ (VB) ที่สูงกว่ากึ่งตัวนำตัวที่ 2 ทำให้อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 เคลื่อนที่มารวมกันในชั้นพลังงานทั้งสองของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า recombination effect ส่งผลให้ลดประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของสารกึ่งตัวนำผสมดังกล่าว ซึ่งเป็นรูปแบบการผสมสารกึ่งตัวนำที่ไม่ควรทำ ดังแสดงในภาพที่ 2.18



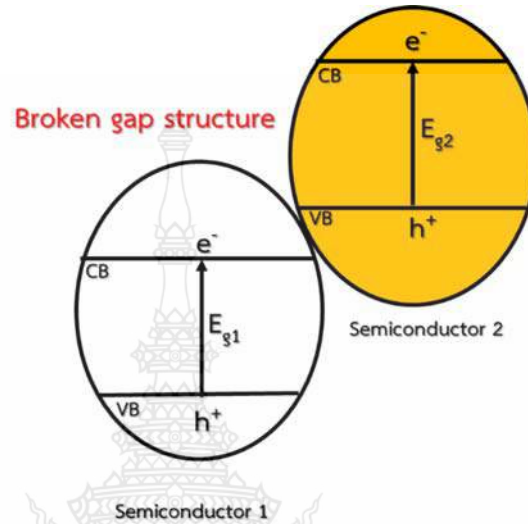
ภาพที่ 2.18 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Straddling gap structure

- การผสมสารกึ่งตัวนำแบบ Staggered gap structure คือสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 จะมีค่าแถบการนำไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบมากกว่า (more negative potential) ค่าแถบการนำของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ไปยังสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 ในขณะเดียวกันสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 จะมีค่า VB ไปทางศักย์ไฟฟ้าด้านบวกมากกว่า (more positive potential) ค่า VB ของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ทำให้ h^+ ที่เกิดขึ้นที่สารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 เคลื่อนที่ไปยังสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ทำให้เกิดการแยกกันของ e^- และ h^+ ที่เกิดขึ้นที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองได้ ซึ่งสามารถลดผลการเกิด recombination effect ได้เป็นอย่างดี และทำให้เกิดประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Staggered gap structure

- การผสมสารกึ่งตัวนำแบบ Broken gap structure คือสารกึ่งตัวนำตัวที่ 1 มีค่าแถบการนำและแถบวาเลนซ์ต่ำกว่าแถบการนำและแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ทำให้ไม่เกิดการส่งผ่านประจุที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองได้ ซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การผสมสารกึ่งตัวนำต่างชนิดเข้าด้วยกัน Broken gap structure

2.6.2.3 การเติมโลหะ

การเติมโลหะลงบนสารกึ่งตัวนำ เช่น ทอง (Au), เงิน (Ag) และ ทองคำขาว (Pt) เป็นต้น โดยให้ตำแหน่งของระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ของโลหะอยู่ต่ำกว่าชั้นแถบการนำของสารกึ่งตัวนำเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น

2.6.3 การพัฒนาลักษณะผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

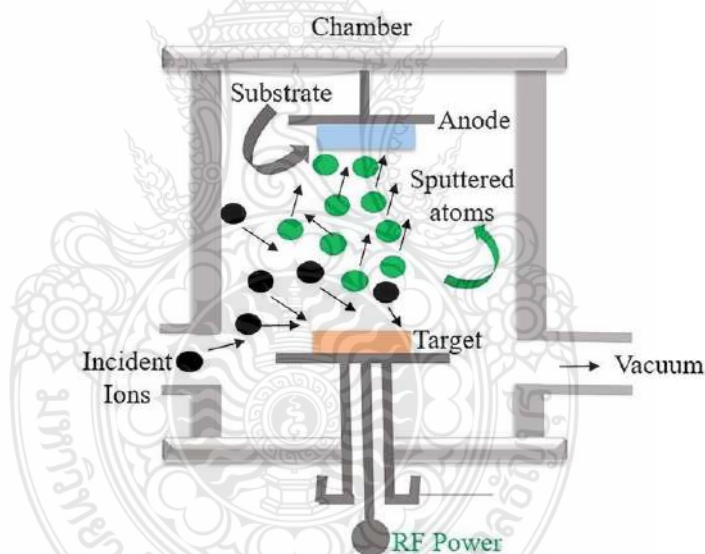
อีกหนึ่งหัวข้อสำคัญสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแอโนดคือการพัฒนาลักษณะผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำให้มีความขรุขระหรือมีพื้นที่ผิวมาก เพื่อให้มีการเกาะติดของสารที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี และเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้า การปรับปรุงพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่นการพัฒนาขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการยึดติดของฟิล์มได้ดีมากขึ้น หรือพัฒนาการเตรียมสารกึ่งตัวนำให้มีลักษณะฟิล์มต่างๆ เช่น ลักษณะเป็นท่อนาโนซีท นาโนดอท เป็นต้น หรือแม้แต่การตรึงสารกึ่งตัวนำร่วมกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

2.7 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

การพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำลงบนพื้นผิวรองรับ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของเทคนิคโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก ซึ่งเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ดีต้องได้ฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา มีความเสถียรและต้องมีขั้นตอนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน ใช้สารเคมีที่ไม่มาก ไม่เป็นอันตราย และสามารถขยายขนาดสเกลเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ในการใช้งานจริง ซึ่งในปัจจุบันมีหลายเทคนิคที่นักวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนวัสดุรองรับ เช่น วิธีการตรึงแบบสปัตเตอริง (Sputtering process) [19, 22-24] วิธีการตรึงด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process)[19] วิธีการตรึงแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)[25] วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) [26-29] และวิธีการตรึงแบบสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) [30-33] ซึ่งเทคนิคเหล่านี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดคือมีความซับซ้อน มีหลายขั้นตอน ใช้สารเคมีและเครื่องมือที่ราคาแพง และยากต่อการขยายขนาดสเกล เทคนิคการจุ่มเคลือบ (Dip coating) เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อลดข้อจำกัดของเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางข้างต้นเพราะมีกระบวนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยาก สะดวก และสามารถขยายขนาดสเกลได้ดี [18, 23, 34-37] แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบดั้งเดิมที่ใช้คนจุ่มนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เนื่องจากการใช้คนในการจุ่มเคลือบจึงไม่สามารถควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มได้ ไม่สามารถควบคุมมุมในการวางวัสดุรองรับ อัตราเร็ว และระยะเวลาในการจุ่มขั้วไฟฟ้าลงในสารละลายตั้งต้น (precursor solution) ให้เท่ากันได้ตลอดทุกครั้ง และเมื่อต้องการจุ่มวัสดุรองรับที่มีขนาดใหญ่การจุ่มเคลือบโดยใช้คนก็ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip-coating machine) เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นนี้ เพราะเทคนิคการจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติสามารถควบคุมอัตราเร็วในการจุ่ม ระยะเวลาในการจุ่ม อัตราเร็วในการดึงขึ้นของขั้วไฟฟ้าได้ ซึ่งจะสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มบางได้ และสามารถจุ่มวัสดุรองรับที่มีขนาดใหญ่เมื่อต้องการขยายขนาดสเกลได้เป็นอย่างดี โดยรายละเอียดการเตรียมฟิล์มบางแต่ละเทคนิคแสดงดังนี้

2.7.1 วิธีการตรึงแบบสปัตเตอริง (Sputtering process)

เป็นกระบวนการสะสมไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition process; PVD) จะดำเนินการในห้องสุญญากาศ ใช้หลักการส่งผ่านโมเมนตัม โดยการปล่อยให้ผิวหน้าของของแข็ง (Target) ถูกยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานจลน์สูง อะตอมหรือโมเลกุลที่ผิวของแข็งจะหลุดกระเด็นออกมาเนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคพลังงานและอะตอมที่ผิว ซึ่งอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของแข็งนี้จะไปควบแน่นและก่อตัวบนชิ้นงาน (Substrate) เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้นตามต้องการ เทคนิคนี้สามารถปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ เช่น ระยะเวลาในการสปัตเตอริง (Sputtering time) กำลังและแรงดันแก๊สเพื่อควบคุมคุณสมบัติของฟิล์มที่ต้องการ ดังนั้นจุดเด่นของเทคนิคนี้คือเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ ความสามารถในการยึดเกาะและความเสถียรของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดคือมีความซับซ้อน มีหลายขั้นตอน ใช้สารเคมี และเครื่องมือที่ราคาแพง การตรึงแบบสปัตเตอริงแสดงดังภาพที่ 2.21

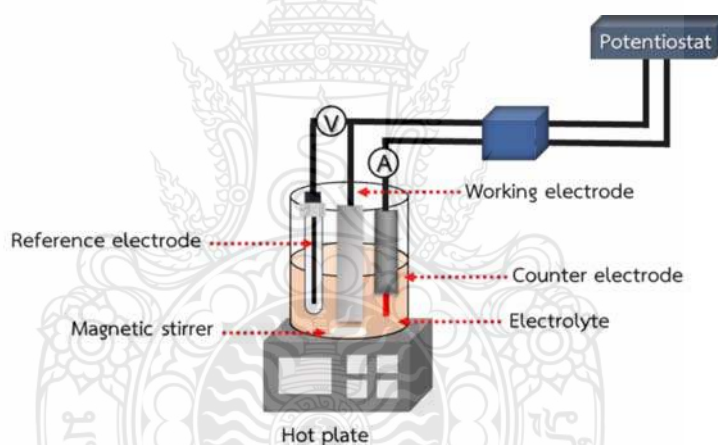


ภาพที่ 2.21 วิธีการตรึงแบบสปัตเตอริง (Sputtering process)

ที่มา: <https://www.intechopen.com/chapters/84564>

2.7.2 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process)

เป็นกระบวนการเคลือบพื้นผิวของวัสดุโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี การทำให้โลหะหรือสารกึ่งตัวนำไปพอกพูนบนผิวหน้าของชิ้นงานโดยการให้กระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายให้กับเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไอออนของโลหะจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยไอออนบวกของโลหะจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าลบและเปลี่ยนสภาพเป็นอะตอมโลหะของแข็งที่สะสมอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าลบดังกล่าว ในเวลาเดียวกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยที่อะตอมของโลหะจะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนของโลหะและปล่อยออกสู่สารละลาย จุดเด่นของวิธีนี้เป็นวิธีการที่แม่นยำ ราคาไม่แพง และสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดคือ มีขั้นตอนและกระบวนการที่ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญและความรู้พื้นฐานของผู้ใช้ ที่สำคัญคือไม่สามารถใช้ตรึงสารได้ทุกตัวโดยสามารถตรึงสารที่ตอบสนองทางไฟฟ้า (Electroactive) เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.22

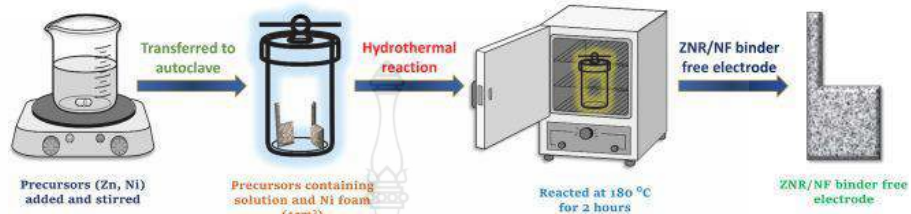


ภาพที่ 2.22 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process)

2.7.3 วิธีการตรึงแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

เป็นกระบวนการตรึงด้วยความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์หม้อน้ำ ความดันภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความดันสูง โดยสารจะผสมกับน้ำหรือตัวทำละลายที่เหมาะสมในหม้อน้ำ ความดัน ซึ่งหม้อน้ำความดันจะถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่เหนือจุดเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ แรงดันสูงภายในหม้อน้ำความดันจะป้องกันไม่ให้น้ำเดือดที่อุณหภูมิต่ำและทำให้น้ำค้างอยู่ในสถานะของเหลว ปฏิกิริยาเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี การตกผลึก การละลาย และการก่อตัวของสารประกอบใหม่ นอกจากนี้เทคนิคนี้ทำให้เกิดโครงสร้าง

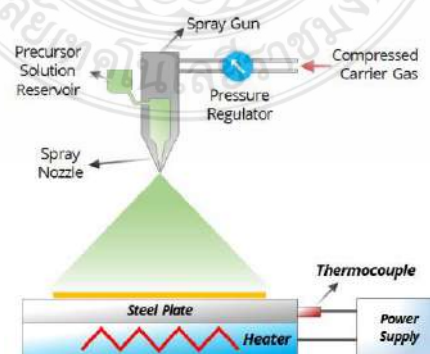
ฟิล์ม รูปร่างต่างๆ เช่น นาโนทิวบ์ นาโนซีต[38] ดังแสดงในภาพที่ 2.23 เทคนิคดังกล่าวนี้มีจุดเด่นคือสามารถสร้างผลึกและทำให้วัสดุมีความบริสุทธิ์ได้ดี และเกิดความหลากหลายของสัณฐานของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดคือเป็นเทคนิคที่ใช้เวลาในการตรึง ใช้พลังงานที่เยอะ อีกทั้งไม่สามารถเห็นกระบวนการสร้างฟิล์มได้ และที่สำคัญคือมีข้อจำกัดในการขยายขนาดสเกล



ภาพที่ 2.23 วิธีการตรึงแบบไฮโดรเทอมอล (Hydrothermal)[39]

2.7.4 วิธีการตรึงแบบสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis)

เป็นเทคนิคการตกตะกอนสะสมของฟิล์มบางด้วยสเปรย์โดยการพ่นสารละลายตั้งต้นหรือสารแขวนลอยที่ถูกทำให้เป็นละอองลงบนพื้นผิวโดยใช้หัวฉีดสเปรย์ พื้นผิวที่พ่นจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิสูงในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนตัวทำละลายจะระเหยออกไปและสารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลให้เกิดการสะสมของวัสดุแข็งบนพื้นผิวซึ่งความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้โดยการปรับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราการพ่น ระยะห่างของหัวฉีดถึงพื้นผิว ขนาดหยด เวลาในการสะสม และปริมาณของสารละลายฉีดพ่น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส [30, 40, 41] ดังแสดงในภาพที่ 2.24 นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังมีจุดเด่นคือสามารถควบคุมความหนาของฟิล์ม และสามารถขยายขนาดสเกลได้ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดคือมีความซับซ้อน มีหลายขั้นตอน ใช้สารเคมีและเครื่องมือที่ราคาแพง

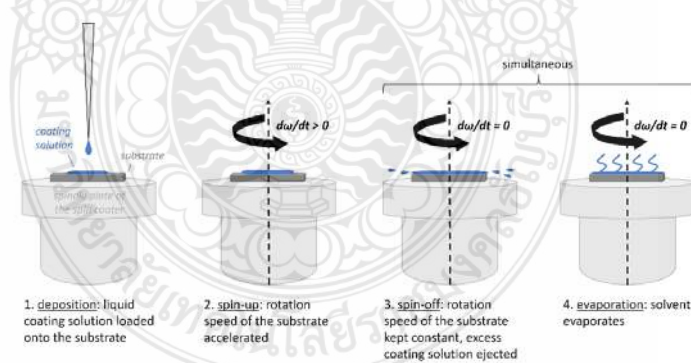


ภาพที่ 2.24 วิธีการตรึงแบบสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis)[42]

2.7.5 วิธีการทรีงแบบหมุนเหวียง (Spin coating)

การเคลือบแบบหมุนเหวียง เป็นวิธีการเคลือบฟิล์มด้วยสารเคลือบที่เป็นสารละลายของเหลวหรือสารแขวนลอยโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง เมื่อหยดสารเคลือบลงตรงกลางของพื้นผิวชิ้นงาน พื้นผิวชิ้นงานและสารเคลือบจะถูกหมุนด้วยความเร็วสูง แรงเหวียงจะกระจายสารเคลือบออกจากศูนย์กลางไปยังขอบของพื้นผิวชิ้นงาน การแพร่กระจายนี้ส่งผลให้เกิดฟิล์มของเหลวบาง ๆ บนพื้นผิวชิ้นงานในขณะเดียวกันตัวทำละลายในสารเคลือบก็เริ่มระเหยเนื่องจากการหมุน กระบวนการกำจัดตัวทำละลายทำให้เกิดชั้นฟิล์มบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของสารเคลือบที่ความหนืด (Viscosity) ที่ต่างกัน ความเข้มข้นของสารละลาย คุณสมบัติของตัวทำละลาย และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนกับเวลาในการหมุน ซึ่งวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวียง มี 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2.25 ดังนี้

1. (Deposition) การหยดสารเคลือบลงตรงกลางของพื้นผิวชิ้นงานที่วางบนแท่นเคลือบ
2. (Spin-up) พื้นผิวชิ้นงานและสารเคลือบจะถูกหมุนด้วยความเร็วสูงโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนกับระยะเวลาในการหมุนเพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ
3. (Spin-off) หยุดหมุนพื้นผิวชิ้นงานตามเวลาที่กำหนดในขั้นตอนนี้สารเคลือบจะกระจายทั่วผิวชิ้นงาน
4. (Evaporation) ขั้นตอนการระเหยตัวทำละลายและสารประกอบอื่น ๆ ออกไป เพื่อให้โมเลกุลของสารเกิดการพอร์มตัวโดยปกติจะใช้ความร้อนในการช่วยการระเหย



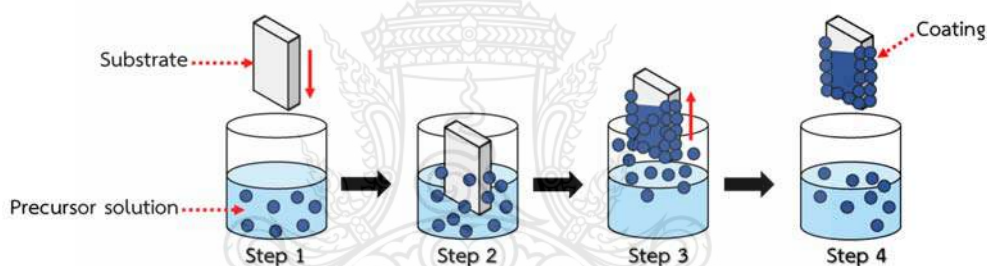
ภาพที่ 2.25 วิธีการทรีงแบบหมุนเหวียง (Spin coating process)

ที่มา: <https://wiki.aalto.fi/display/SSC/Spin+coating>

ข้อดีของการเคลือบแบบหมุนเหวียงคือ เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ดี แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังยากต่อการขยายขนาดสเกลของฟิล์มบางได้

2.7.6 เทคนิคการจุ่มเคลือบ (Dip coating)

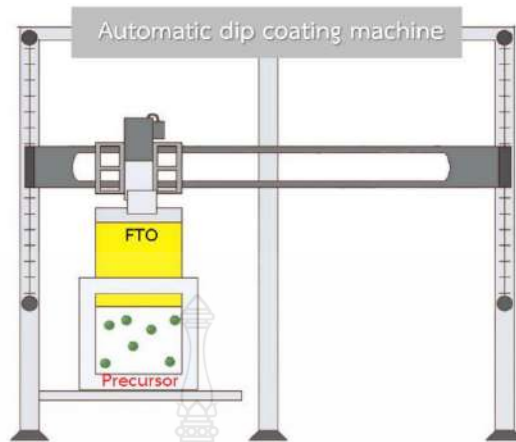
กระบวนการเคลือบแบบจุ่มเป็นเทคนิคที่เรียบง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายในการเตรียมฟิล์มบาง โดยจะจุ่มซับสเตรตลงในสารเคลือบที่เป็นของเหลวแล้วดึงออก เมื่อพื้นผิวถูกดึงออกสารเคลือบส่วนเกินจะระบายออกจากซับสเตรตและตัวทำละลายจะเริ่มระเหย ฟิล์มของเหลวที่เหลืออยู่บนพื้นผิวของซับสเตรตเริ่มแข็งตัว นำแผ่นฟิล์มไปให้ความร้อนเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกไปจนหมด และสารเคลือบจะเกาะติดกับซับสเตรตอย่างแน่นหนา ขั้นตอนในการจุ่มเคลือบ มี 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2.26 ดังนี้ 1. เป็นการนำวัสดุที่ต้องการเคลือบมาจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ (Immersion) ซึ่งความเร็ว มุมของการจุ่มลง และระยะเวลาในการแช่ซับสเตรตในสารเคลือบ (immersion time) สามารถส่งผลต่อความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มที่ได้ 3. เป็นการดึงวัสดุที่จุ่มในขั้นที่ 2 ขึ้นจากสารละลาย (Pull-up) ซึ่งความเร็วและมุมของการดึงขึ้นสามารถส่งผลต่อความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มที่ได้เช่นกัน 4. การเกาะติด (Deposition) และการระเหย (Evaporation) สารละลายที่ไม่สามารถเกาะติดผิววัสดุจะไหลออกจากผิววัสดุ และตัวทำละลายจะเริ่มระเหยออกไป



ภาพที่ 2.26 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating process)

2.7.7 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process)

วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เป็นเทคนิคพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อลดข้อจำกัดของวิธีการจุ่มเคลือบ และทำให้กระบวนการเคลือบแบบจุ่มมีความแม่นยำ มีประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอมากขึ้น อาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวขรุขระ โดยจุ่มซับสเตรตลงในสารเคลือบที่เป็นของเหลวด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติที่สามารถควบคุมอัตราเร็วในการจุ่ม (immersion speed) ระยะเวลาการจุ่ม (immersion time) และอัตราเร็วในการดึงขึ้น (Pull-up speed) ได้จากโปรแกรมของเครื่องจุ่มเคลือบ ดังแสดงในภาพที่ 2.27 เทคนิคนี้มีจุดเด่นคือสะดวก รวดเร็ว สามารถขยายขนาดสเกลได้ดี ต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มและความสม่ำเสมอของการเตรียมชั้นไฟฟ้าแต่ละครั้งได้ดี



ภาพที่ 2.27 วิธีการตั้งแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำเกษตรกรรมในยุคที่มีการแข่งขันทางการค้าสูง การนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ในการเพาะปลูกเป็นแนวทางในการพัฒนาการเกษตรกรรมเพื่อเพิ่มโอกาสและศักยภาพทางการแข่งขัน การทำการเพาะปลูกในระบบโรงปลูกพืช หรือ Plant factory เป็นนวัตกรรมในการทำการเกษตรรูปแบบใหม่เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงและสม่ำเสมอ และมีเสถียรภาพในการผลิต โดยไม่ขึ้นกับฤดูกาลของผลผลิตและปัจจัยธรรมชาติ โดยเป็นระบบการเพาะปลูกที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก ได้แก่ แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแร่ธาตุ ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตสูงและสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับการปลูกพืชแบบ Soilless culture หรือ Hydroponics งานวิจัยนี้มีแนวความคิดในการพัฒนาวัสดุเพื่อประยุกต์ใช้กับโรงเรือนระบบปิดสำหรับใช้ปลูกผักไฮโดรโปนิคส์รูปลูกอส ที่ใช้ระบบแสงธรรมชาติและแสงเทียม โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวัสดุฟิล์มบางโพโตอิเล็กทรอนิกส์สำหรับกำจัดเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับรากในระบบน้ำโรงเรือนเกษตรแนวใหม่[43-47] ซึ่งมีหลักการคือการพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติการตอบสนองกับแสงในช่วงตามองเห็นลงบนกระจกนำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่แสงสามารถผ่านได้ดี เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงแสงธรรมชาติ [19, 22, 48-50] โดยพัฒนาทั้งเทคนิคการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติเพื่อให้ได้สมบัติของฟิล์มบางที่สามารถเตรียมซ้ำกันได้ดี และสามารถขยายขนาดได้ง่าย [18] พัฒนาด้านการออกแบบลำดับการตั้งชั้นสารกึ่งตัวนำเพื่อเร่งการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า[51] โดยประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อสร้างเซลล์ต้นแบบสำหรับใช้เป็นในระบบไหลเวียนของน้ำสำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์เพื่อประโยชน์ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่จะทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับ

รากในผักไฮโดรโปนิคส์ เซลล์ต้นแบบที่ได้พัฒนาจะมีกระบวนการเร่งชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นด้วยแสงที่มีพลังงานที่มากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอน (e^-) และช่องว่าง (hole, h^+) ซึ่ง h^+ ที่เกิดขึ้นที่ชั้นวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำจะมีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (เชื้อแบคทีเรีย และเชื้อรา ที่จะทำให้เกิดโรคพืชได้) [23, 51] ที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้าโดยตรงและอีกทางคือในระบบที่มีน้ำที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ h^+ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะสามารถออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot OH$) ซึ่งจะเกิดการแพร่ออกจากผิวหน้าชีวไฟฟ้าและกระจายไปในระบบน้ำและทำให้เกิดการกำจัดเชื้อเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่จะทำให้เกิดโรคพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ [52] ในขณะเดียวกันกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้าด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้าจะสามารถเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ชั้นการนำของสารกึ่งตัวนำเพื่อทำให้เกิดการแยกกันของ e^-/h^+ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้มีจำนวน h^+ ที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้าจำนวนมากส่งเสริมทำให้เกิดการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้มีประสิทธิภาพ [53]

จากการสืบค้นสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรทั้งในและต่างประเทศ พบว่ามีการพัฒนาเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการประยุกต์ใช้ที่หลากหลาย ดังนี้ อนุสิทธิบัตรไทยเลขที่ 18344 (2566) กระบวนการพัฒนาเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับเพิ่มปริมาณออกซิเจน และกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ อนุสิทธิบัตรไทยเลขที่ 19383 (2562) กระบวนการกำจัดน้ำมันในน้ำด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก อนุสิทธิบัตรไทยเลขที่ 20065 (2564) กระบวนการผลิตเซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับแยกโลหะทองคำและเงินจากสารละลาย อนุสิทธิบัตรไทย เลขคำขอ 2003003195 (2563) กระบวนการผลิตเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับปฏิกิริยาเมทานอลออกซิเดชัน สำหรับงานประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์มีรายงานการยื่นจดรับรองทรัพย์สินทางปัญญา ดังนี้ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ไทย เลขคำขอ 2101000835 ระบบการจัดการแปลงผักไฮโดรโปนิคส์ผ่านเทคโนโลยีไอโอที สิทธิบัตรไทย เลขที่ 8101 (2556) ชุดอุปกรณ์โต๊ะปลูกพืชไร้ดิน ระบบไฮโดรโปนิคส์ สิทธิบัตรไทย เลขที่ 17467 (2563) กรรมวิธีการผลิตน้ำเย็น อากาศขึ้น และการเติมออกซิเจนในน้ำ สำหรับโรงปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ สำหรับรายงานการประดิษฐ์ต่างประเทศเกี่ยวกับเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการบำบัดน้ำเสีย เช่น สิทธิบัตรประเทศจีน เลขที่ 108862773 ได้พัฒนาระบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกผสมผสานกับถ่านหินสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันน้ำเสีย สิทธิบัตรประเทศเกาหลี เลขที่ 1020160060191 ได้พัฒนาระบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกโดยใช้ชีวไฟฟ้าที่ตรงด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กระดับนาโนเมตรโดยใช้วัสดุรองรับเป็นไทเทเนียมเพื่อใช้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา

เลขที่ 20140231241A1 ได้พัฒนาวิธีการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก โดยใช้หลักการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบออกไซด์ของไนโอเบียมและสตรอนเชียม สำหรับงานประดิษฐ์ต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์มีรายงานดังนี้คือ สิทธิบัตรประเทศจีน 105712779 ได้ศึกษาการเสริมแร่ธาตุหลักสำหรับปลูกผักใบแบบไฮโดรโปนิกส์โดยใช้หลักการโฟโตคะตะไลซิสด้วยการในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับการบำบัดน้ำประปา ก่อนนำมาใช้กับการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ สิทธิบัตรประเทศจีนเลขที่ 208175801 ได้พัฒนาระบบไหลเวียนเชื่อมต่อกันระหว่างระบบเลี้ยงสัตว์น้ำและระบบการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ โดยการเพิ่มระบบบำบัดน้ำเสียและฆ่าเชื้อโรคจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้าและทำน้ำสะอาดสำหรับระบบพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ สิทธิบัตรประเทศญี่ปุ่นเลขที่ 2011188841 ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ด้วยการใช้สารละลายที่เร่งการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชเพื่อเร่งการเจริญเติบโตและใช้น้ำอิเล็กโทรไลต์เพื่อฆ่าเชื้อโรคในพืช



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)	Analytical reagent	Univar Australia
2. เอทานอล (Ethanol; CH ₂ CH ₃ OH)	Analytical reagent	ACL Labscan Thailand
3. กรดทังสติก (Tungstic acid; H ₂ WO ₄)	Analytical reagent	Sigma-aldrich Japan
4. บิสมัท (III) ไนเตรท เฮกซะไฮเดรต (Bismuth (III) nitrate hexahydrate; Bi(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O)	Analytical reagent	Univar Australia
5. วาเนเดียม (IV) ออกไซด์ อะเซทิลอะซิโตน (Vanadium (IV) oxide acetylacetonate; C ₁₀ H ₁₄ O ₅ V)	Analytical reagent	Merck Germany
6. กรดอะซิติก (Acetic acid; CH ₃ COOH)	Analytical reagent	RCI Labscan Thailand
7. อะเซทิลอะซิโตน (Acetylacetone; CH ₃ COCH ₂ COCH ₃)	Analytical reagent	Panreac Spain

8. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH)	Analytical reagent	Panreac Germany
9. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)	Analytical reagent	Univar Australia
10. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride; KCl)	Analytical reagent	Univar Australia
11. โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate; KNO_3)	Analytical reagent	Univar Australia
12. ดีเทอร์เจน (Detergent)	-	Teepol pure
13. โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite)	Analytical reagent	TCL Japan
14. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide)	Analytical reagent	Univar Australia
15. โซเดียมอะซิเตต (Sodium acetate)	Analytical reagent	Loba chemie India
16. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)	Analytical reagent	ACL Labscan Thailand
17. โรดาบิน บี (Rhodamine B)	Analytical reagent	Sigma-aldrich

18. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)	Analytical reagent	Univar Australia
19. แอมโมเนียม โมลิบเดต (Ammonium molybdate)	Analytical reagent	Univar Australia
20. โพแทสเซียมแอนติโมนิทาร์เตรต (Potassium Antimony tartrate)	Analytical reagent	Univar Australia
21. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid)	Analytical reagent	Univar Australia
22. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)	Analytical reagent	Loba chemie India
23. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium Dihydrogen phosphate)	Analytical reagent	Kemaus Australia
24. กรด 2,3-ไดไฮดรอกซิลเบนโซอิก (2,3-Dihydroxybenzoic Acid)	Analytical reagent	TCl Japan
25. กรด 2,3-ไดไฮดรอกซิลเบนโซอิก (2,5-Dihydroxybenzoic Acid)	Analytical reagent	Sigma-Aldrich

3.1.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
1. กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped tin oxide; FTO)	-	Bangkok Solar Co., Ltd. Thailand.
2. สายไฟลวดทองแดง (Copper wire)	-	-
3. อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy resin)	DURO 20	Pettex
4. ตู้อบ (Oven)	-	Memmert
5. เตาเผา (Furnace)	-	Wisd
6. ตู้ดูดควัน (Hood)	-	Vatigul
7. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)	MSH-20A	Wisd Korea
8. เครื่องชั่งสาร (Balance)	AZ series	Sartorius Germany
9. เครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical analysis)	Versa STAT 3	Ametek

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
10. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)	Ag/AgCl	-
11. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode)	Pt	-
12. หลอด LED (LED lamp)	-	Panasonic
13. เครื่องวัดค่า pH (pH meter)	FG2-I	Mettler Toledo
14. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)	UV-1601	SHIMADZU Japan
15. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)	TTRAX III	Rigaku Japan
16. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)	S-500	Hitachi Japan
17. เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ Solar Simulator	16S-300-2.2-AM	Avantes

3.2 การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งหัวข้อในการศึกษาออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

หัวข้อที่ 1 เป็นการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็น ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้า เช่น อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้า โดยศึกษาคุณสมบัติต่างๆของขั้วไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้น และศึกษาพัฒนาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าในระดับสเกลห้องปฏิบัติการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้การเร่งด้วยแสง เพื่อป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ ต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุการเกิดโรคพืชในน้ำที่หมุนเวียนในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ รวมถึงนำขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *E.coli* และหัวข้อที่ 2 ศึกษาออกแบบเซลล์ต้นแบบเพื่อติดตั้งกับระบบไหลเวียนของน้ำในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคพืช และเชื้อก่อโรคที่ส่งผลต่อมนุษย์หากมีการปนเปื้อนเข้ามาในสารละลาย

3.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด และขั้วไฟฟ้าแอโนด (FTO/WO₃/BiVO₄)

3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สแตนเลส สตีล (Stainless steel) เกรด 316 L เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดเพราะเป็นเกรดที่ทนต่อการกัดกร่อน และทนต่อความเป็นกรด-เบส ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมมีดังนี้ 1) นำขั้วไฟฟ้าสแตนเลส สตีล ขนาด 2*3 เซนติเมตร ไปทำความสะอาดโดยล้างด้วยสารละลายดีเทอร์เจนท์ (Detergent) และล้างออกด้วยน้ำสะอาด ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง 2) กำหนดพื้นที่บนกระจกนำไฟฟ้าขนาด 2*2 เซนติเมตร และส่วนที่เหลือนำไปบัดกรีกับสายไฟ แล้วทาทับด้วยกาวอีพอกซี (Epoxy resin) เพื่อป้องกันการสัมผัสน้ำบริเวณรอยต่อดังกล่าว และตรวจสอบการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์

3.2.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด (FTO/WO₃/BiVO₄) ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

3.2.1.2.1 การเตรียมสารเคมี

- การเตรียมสารละลาย 0.1 M ทังสแตนออกไซด์ (WO₃)

เตรียมสารละลาย 0.1 M WO₃ จากกรดทังสติก (H₂WO₄)

1.2493 กรัม ละลายใน 30% Ammonia (NH₄OH) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายไป

Reflux ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขณะ Reflux ต้องควบคุมปริมาตรให้คงที่ตลอดเวลาโดยการเติม 30% NH_4OH เมื่อ Reflux เสร็จแล้ว นำสารละลายที่ได้ไปอัลตราโซนิกส์เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายสีขาวขุ่น ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานได้ต้องตั้งทิ้งไว้ 1 คืนให้สารละลายกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสีจึงสามารถนำไปใช้งานได้

- การเตรียมสารละลาย 0.05 M BiVO_4

เตรียมสารละลาย 0.05 M BiVO_4 จาก 0.1 M $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.2127 กรัม ใน Acetic acid 25 มิลลิลิตร ละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน และ 0.1 M $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_5\text{V}$ 0.6622 กรัม ในสารละลาย Acetyl acetone 25 มิลลิลิตร ละลายจนได้สารละลายสีเขียว จากนั้นนำสารละลายทั้งสองมาผสมกันจะได้ 0.05 M BiVO_4 แล้วนำไปกวน 10 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปอัลตราโซนิกส์เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายสีเขียวอมฟ้า

3.2.1.2.2 การทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า

กระจกนำไฟฟ้าที่ใช้คือกระจกฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide : FTO) มีด้านนำไฟฟ้าแค่ด้านเดียวเท่านั้น ก่อนการใช้งานต้องตรวจสอบด้านการนำไฟฟ้าของกระจกด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ การทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าสามารถทำได้ดังนี้ (1) วัดขนาดของกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้ (งานวิจัยนี้ใช้ขนาด 2*3 เซนติเมตร) (2) ทำความสะอาดโดยใช้สารละลายดีเทอร์เจนท์ (Detergent) นำไป Sonicate เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น (Deionized Water) แล้วนำไปแช่ในสารละลาย 3 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นำไป Sonicate เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไป Sonicate ในสารละลายเอทานอล เป็นเวลา 10 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่น ขั้นตอนสุดท้ายนำไป Sonicate ในน้ำกลั่นอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำให้แห้ง (3) ตรวจสอบการนำไฟฟ้าของกระจกนำไฟฟ้า FTO เพื่อความถูกต้องในการเลือกใช้ด้านที่นำไฟฟ้า จากนั้นกำหนดพื้นที่บนกระจกนำไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับตรึงสารกึ่งตัวนำ ขนาดที่ใช้คือ 2*2 เซนติเมตร และส่วนที่เหลือไว้สำหรับบัดกรีและทาหุ้มด้วยกาวอีพอกซี (Epoxy resin)

3.2.1.2.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

1) เทสารละลาย 0.1 M WO_3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 ml จากนั้นใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติจุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในสารละลายดังกล่าว ซึ่งสามารถตั้งค่าความเร็วในการจุ่มลง ความเร็วในการดึงขึ้น และระยะเวลาที่ผิวหน้ากระจกสัมผัสสารได้จากโปรแกรมของเครื่องจุ่มเคลือบ ซึ่งในขั้นตอนการเตรียม FTO/WO_3 จะตั้งค่าให้กระจกนำไฟฟ้าจุ่มลงในสารละลาย 0.1 M WO_3 เมื่อ

ผิวหน้ากระจกสัมผัสสารละลายเครื่องจุ่มเคลือบจะควบคุมให้กระจกตั้งขึ้นทันที ซึ่งขั้นตอนการเตรียม
ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 จากนั้นวางชั้นไฟฟ้า
FTO/WO₃ ที่งัวที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ชั้นไฟฟ้าแห้ง

2) เทสารละลาย 0.05 M BiVO₄ ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 ml จากนั้น
ใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติจุ่มชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ ลงในสารละลาย 0.05 M BiVO₄ โดยขั้นตอนการ
เตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ นี้จะตั้งค่าให้ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ แขนในสารละลาย BiVO₄ เป็นเวลา
5 วินาทีแล้วดึงชั้นไฟฟ้านี้ขึ้น

3) นำชั้นไฟฟ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้ว
นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 90 นาที ก็จะได้ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ จากนั้นนำชั้นไฟฟ้า
FTO/WO₃/BiVO₄ มาเชื่อมต่อกับสายไฟทองแดงด้วยการบัดกรี แล้วทาทับด้วยกาวอีพอกซี
(Epoxy resin) และตรวจสอบการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบชั้นไฟฟ้า WO₃/BiVO₄ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการเตรียมชั้นไฟฟ้า
FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติเพื่อให้มีสมบัติ
โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำ (Water Oxidation) โดยมี
พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการศึกษา ดังนี้

1. ศึกษาผลของสภาวะการอบชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃
2. ศึกษาอุณหภูมิการเผา FTO/WO₃/BiVO₄

ได้ศึกษาอุณหภูมิการเผาชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่อุณหภูมิห้อง, 350, 400, 450, 500,
550 และ 600 °C ที่ระยะเวลาการเผา 60 นาที

3. ศึกษาระยะเวลาการเผา $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ที่อุณหภูมิการเผา $500\text{ }^\circ\text{C}$
ได้ศึกษาระยะเวลาการเผาชั้นไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ที่อุณหภูมิการเผา $500\text{ }^\circ\text{C}$
4. ศึกษาอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าขึ้น
ได้ศึกษาอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าขึ้นที่ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 cm/s ที่ระยะเวลาการจุ่มชั้นไฟฟ้า FTO/WO_3 ในสารละลาย 0.05M BiVO_4 15 วินาที และมีอัตราเร็วในการจุ่มลงเท่ากับ 2.0 cm/s
5. ศึกษาระยะเวลาการจุ่มชั้นไฟฟ้า
ได้ศึกษาระยะเวลาการจุ่มชั้นไฟฟ้า FTO/WO_3 ในสารละลาย 0.05 M BiVO_4 ที่ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 วินาที ที่มีอัตราเร็วในการจุ่มลงและดึงขึ้นเท่ากับ 2 cm/s
6. ศึกษาอัตราเร็วในการจุ่มชั้นไฟฟ้าลง
ได้ศึกษาอัตราเร็วในการจุ่มชั้นไฟฟ้าลงที่ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/s ที่ระยะเวลาการจุ่มชั้นไฟฟ้า FTO/WO_3 ในสารละลาย 0.05 M BiVO_4 5 วินาที และมีอัตราเร็วในการจุ่มขึ้นเท่ากับ 2.0 cm/s

3.2.2 ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกของชั้นไฟฟ้าแอโนด โดยนำชั้นไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละพารามิเตอร์ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้าที่เตรียมได้

นำชั้นไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง $200\text{-}800\text{ nm}$ และคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy, E_g) จากสมการ $E_g = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$ โดยกำหนดให้ E_g ค่าแถบช่องว่างพลังงาน และ λ คือค่าความยาวคลื่นแสงมีหน่วยเป็นนาโนเมตร (nm)

3.2.2.2 ศึกษาสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า

ในการศึกษาความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้านี้จะยืนยันสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าชั้นไฟฟ้ากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ชั้นไฟฟ้าทั้งหมด 3 ชั้น ประกอบไปด้วยชั้นไฟฟ้าทำงาน (working electrode) คือ $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ชั้นไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) คือ Ag/AgCl และชั้นไฟฟ้าช่วย (counter electrode) คือ Pt นำชั้นไฟฟ้าทั้งสามนี้มาเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า Electrochemical analysis และศึกษาหาความต้านทานและความจุทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

3.2.2.3 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 3 ขั้ว ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) คือ FTO/WO₃/BiVO₄ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) คือ Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) คือ Pt โดยการนำขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มาทดสอบด้วยเทคนิคโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M NaCl ด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.0 V (Amperometry) เป็นเวลา 90 วินาที โดยสลับสถานะให้แสงและไม่ให้แสงทุกๆ 10 วินาที จนครบตามเวลา

นอกจากนี้ยังได้นำขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากเครื่อง Automatic Dip-coating machine ไปศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของขั้วไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงการศึกษาคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า

Parameters	Instrument
ศึกษาโครงสร้างผลึก	X-ray diffractometer (XRD)
ศึกษาลักษณะสัณฐานของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า	Scanning Electron Microscope (SEM)
ศึกษาการดูดกลืนแสง	UV-Vis spectrophotometer
ศึกษาสมบัติโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก	Potentiostat (Amperometry)
ศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า	Potentiostat (EIS)

3.2.3 ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

3.3.3.1 ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม โดยศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้ (1) โพแทสเซียมคลอไรด์ (2) โซเดียมคลอไรด์ (3) โพแทสเซียมไนเตรต โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าและแสงเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คือ 1.5 โวลต์ โดยต่อขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เป็นสแตนเลส สตีล เข้าด้วยกัน ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกจุ่มในสารละลายอิเล็กโทร

ไลต์ที่ต้องการศึกษา และใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ โดยทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่าง ทุกๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.3.2 ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ โดยศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีการเร่งปฏิกิริยาในแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการทำนายและออกแบบเซลล์ที่ใช้ให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อโรค แบคทีเรีย จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรครากเน่าในผักไฮโดรโปนิคส์ ซึ่งกลไกที่ศึกษาประกอบไปด้วยดังนี้

ศึกษาสภาวะการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis; PC)

เป็นกลไกที่ใช้แสงเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ไม่ใช้ศักย์ไฟฟ้า โดยต่อขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เป็นสแตนเลส สตีล เข้าด้วยกันซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ ในระบบจะมีการไหลเวียนของน้ำผ่านขั้วไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา โดยทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

ศึกษาสภาวะการเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalysis; EC)

เป็นกลไกที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ไม่ใช้แสง ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คือ 1.5 โวลต์ โดยต่อขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เป็นสแตนเลส สตีล เข้าด้วยกัน ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ ในระบบจะมีการไหลเวียนของน้ำผ่านขั้วไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา โดยทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

ศึกษาสภาวะการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalysis; PEC)

เป็นกลไกที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าและแสงเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คือ 1.5 โวลต์ โดยต่อขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เป็นสแตนเลส สตีล เข้าด้วยกันซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ ในระบบจะมีการไหลเวียนของน้ำผ่านขั้วไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา โดยทดลอง

เป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

ศึกษาสภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การเร่งด้วยแสง (Light)

เป็นกลไกที่ใช้แสงเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ไม่ใช้ศักย์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าแอโนด และขั้วไฟฟ้าแคโทด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ ในระบบจะมีการไหลเวียนของน้ำผ่านขั้วไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา โดยทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

ศึกษาสภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การไม่มีแสง (Dark)

เป็นกลไกที่ไม่ใช้ศักย์ไฟฟ้า ไม่ใช้แสง ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ ในระบบจะมีการไหลเวียนของน้ำผ่านขั้วไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา โดยทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.4 ศึกษาความเสถียรและความคงทนของขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม (stability)

ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 M โดยใช้เทคนิคโพโตอิเล็กโทรคะตะไลติกภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V ในการศึกษาใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนด คือ $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ จำนวน 1 ขั้ว ซ้ำ 20 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที โดยติดตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมในน้ำด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.5 ศึกษาการเตรียมขั้วของขั้วไฟฟ้า

เตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ซ้ำทั้งหมด 7 ครั้ง โดยเตรียมจากสองเทคนิค คือเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ และเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือติดตามผลการทดสอบจากค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

3.2.6 ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อได้สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ แล้วจะนำขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุดมาศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

3.2.6.1 ศึกษาการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical; $\cdot\text{OH}$)

ศึกษาการเกิด $\cdot\text{OH}$ บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry[54] โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ที่ความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 10 ml ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นใส่ 15 ml ของ 0.0003 M SA ตามด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 1.8638 กรัม คนให้ละลายแล้วปรับปริมาตรเป็น 50 ml ด้วย DI water จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO₃/BiVO₄ และขั้วไฟฟ้าแคโทดสแตนเลส สตีล มาเชื่อมต่อกันและศึกษาการเกิด $\cdot\text{OH}$ ภายใต้การให้แสงและศักย์ไฟฟ้า 1.5 V เป็นเวลา 60 นาที

3.2.6.2 การศึกษาระยะทางการเกิดแอกทีฟคลอรีน (Active chlorine, Cl_{ac})

ทดสอบการเกิดแอกทีฟคลอรีน (Active chlorine, Cl_{ac}) ในรูปฟอร์มของคลอไรต์ไอออน ($\cdot\text{OCl}$) หรือกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous, HOCl) ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย โดยใช้วิธี Spectrophotometric [55] มีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้ เติมน้ำ 1 ml กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ 1 ml โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เขย่าให้เข้ากันจากนั้นเติม 0.5 ml สีย้อมโรดามีน บี (Rhodamin B) ตามด้วย 2 ml โซเดียมอะซิเตต (NaCH₃COO) เขย่าให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 ml ด้วยสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy แล้วคำนวณความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่เกิดขึ้น โดยศึกษาระยะทางการเกิดแอกทีฟคลอรีน ที่ 0, 3, 5, 7, และ 9 เมตร โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.02 M KCl ให้แสงและศักย์ไฟฟ้า 2.0 V และอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที

3.2.6.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแส (%IPCE)

ศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแสด้วยเครื่อง Solar simulation และ monochromator ใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นโดยเทคนิคการจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นโดยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ สภาวะที่ใช้ทดสอบคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M โพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มแสง 1 sun และค่าศักย์ไฟฟ้า 1 V

3.2.7 ศึกษาความคงทนของขั้วไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย

3.2.7.1 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และค่า pH ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย

ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยโดยใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 2.0 V ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิดคือ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, และ 3.0% ภายใต้สภาวะที่มีค่า pH ต่างกัน คือ 3, 7, และ 11 โดยทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer นอกจากนี้ก็ติดตามค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเจนในสารละลายน้ำ และลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการทดสอบร่วมด้วย

3.2.8 ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ

ศึกษาการกำจัดเชื้อ *E.coli* และเชื้อ Total mold โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้น ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสง โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาแสดงดังนี้

3.2.8.1 ศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในการกำจัดเชื้อ *E.coli*

ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ศึกษาคือ 0.00, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, และ 0.1 M ติดตามการลดลงของเชื้อ *E.coli* เป็นเวลา 30 นาที ด้วยวิธีสเปกโตรเมต

3.2.8.2 ศึกษาศักย์ไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อ *E.coli* ที่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, และ 2.5 V

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ศึกษาคือ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 V ติดตามการลดลงของเชื้อ *E.coli* เป็นเวลา 30 นาที ด้วยวิธีสเปกโตรเมต

3.2.8.3 ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อ *E.coli*

กลไกที่ศึกษาประกอบด้วย PEC, EC, PC, Control(KCl), และ Control (without KCl) ติดตามการลดลงของเชื้อ *E.coli* เป็นเวลา 60 นาที ด้วยวิธีสเปกโตรเมต

3.2.8.4 ศึกษาการใช้ PEC ในการกำจัดเชื้อ *E.coli*

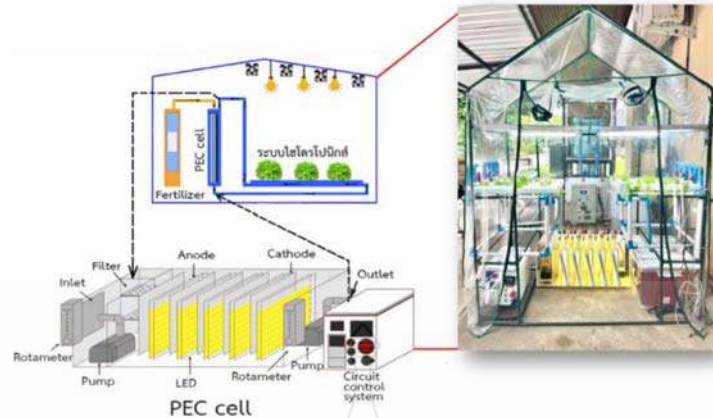
ติดตามการลดลงของเชื้อ *E.coli* เป็นเวลา 180 นาที ด้วยวิธีทรอป เมต

3.2.8.5 ศึกษาการกำจัดเชื้อรารวม

กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาประกอบด้วย ประกอบด้วย PEC, Control (KCL) และ Control (without KCL) ติดตามการลดลงของเชื้อรารวมเป็นเวลา 180 นาที ด้วยวิธีทรอปเพลต

3.2.9 ศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเพื่อติดตั้งกับระบบไหลเวียนของน้ำในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

ศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้ากับเซลล์ต้นแบบ PEC สำหรับป้องกันการเกิดเชื้อโรคในระบบน้ำโรงเรือนสำหรับผักไฮโดรโปนิคส์ ใช้ขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าสแตนเลส สตีล เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยศึกษาในระดับสเกลห้องปฏิบัติการจนได้ประสิทธิภาพสูงสุด ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรค แบคทีเรีย จุลินทรีย์ และสารอินทรีย์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้สำหรับการขยายขนาดสเกล เพื่อใช้จริงต่อไป โดยเซลล์ต้นแบบ PEC ที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฮโดรโปนิคส์ มีส่วนประกอบแสดงดังภาพที่ 3.2 เซลล์ต้นแบบ PEC ที่ออกแบบขึ้นมีขนาด กxยxส = 28x75x32 เซนติเมตร หนักประมาณ 50 กิโลกรัม ซึ่งภายในเซลล์ต้นแบบประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้แผงหลอดไฟฟ้าไดโอดเปล่งแสง (LED) และการควบคุมศักย์ไฟฟ้าเพื่อทำงานร่วมกับขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode) สแตนเลส สตีล ผ่านระบบควบคุมวงจรไฟฟ้า (Circuit control system) มีปั๊ม (Pump) ทำหน้าที่ควบคุมการไหลเวียนของระบบน้ำภายในเซลล์ PEC ผ่านระบบควบคุมอัตราการไหล (Rotameter) ซึ่งเป็นระบบน้ำไหลวน โดยน้ำจากระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ ซึ่งมีการปนเปื้อนของเชื้อโรคที่เกิดจากระบบจ่ายสารละลายธาตุอาหาร การเตรียมสารละลายทำให้เกิดการติดเชื้อที่รากหรือส่วนอื่นๆ ของผักที่อยู่ในระบบไฮโดรโปนิคส์จะไหลลงมายังระบบ PEC cell และจะค่อย ๆ ไหลวนผ่านแต่ละช่อง



ภาพที่ 3.2 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อโรคในระบบน้ำในโรงเรือนสำหรับไฮโดรโปนิกส์

พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบไปด้วย ดังนี้

3.2.9.1 การศึกษาลักษณะของสแตนเลส สตีล

ลักษณะของสแตนเลส สตีล ที่ศึกษาคือ สแตนเลส สตีลแบบเรียบไม่มีรูและแบบมีรูขนาด 2 mm โดยจะใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ในการทดสอบ ติดตามการลดลงของสีย้อมเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.9.2 การศึกษาอัตราการไหลของสารละลาย

อัตราการไหลของสารละลายที่ศึกษาคือ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 นาทีต่อลิตร โดยจะใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ในการทดสอบ ติดตามการลดลงของสีย้อมเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.9.3 การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อกำจัดสีย้อม

กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาคือโฟโตคะตะไลติก (PC) อิเล็กโทรคะตะไลติก (EC) โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) และระบบควบคุม โดยจะใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ในการทดสอบ ติดตามการลดลงของสีย้อมเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.9.4 ผลการศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดสีย้อม

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ศึกษาคือ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 V โดยจะใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ในการทดสอบ ติดตามการลดลงของสีย้อมเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.9.5 การศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ที่ศึกษาคือ 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.5 M โดยจะใช้สีย้อมเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ในการทดสอบ ติดตามการลดลงของสีย้อมเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3.2.9.6 การศึกษาทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย

ในการทดสอบการแตกตัวของปุ๋ยจะใช้ปุ๋ยอินทรีย์ โดยจะเปิดระบบ PEC เปรียบเทียบกับระบบ Control เป็นเวลา 180 นาที แล้ววิเคราะห์การแตกตัวก่อน/หลัง โดยใช้หัวโพรบไนเตรตวัดปริมาณไนเตรตที่แตกตัว ใช้วิธีสเปกโตรเมตริกเพื่อวัดปริมาณฟอสเฟตที่แตกตัว

3.2.10 เปรียบเทียบการใช้งานจริงระหว่างการปลูกผักที่ใช้ระบบ PEC และระบบที่ไม่ใช้ PEC

3.2.10.1 การศึกษาการเจริญเติบโตของผัก

เมื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบ PEC ลำดับถัดไปคือการประยุกต์ใช้งานจริงโดยเปรียบเทียบจำนวนใบของผัก ความยาวของราก ความสูงของลำต้นของผักที่ปลูกแบบใช้เซลล์ต้นแบบ PEC และแบบที่ไม่ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC เป็นระยะเวลาประมาณ 3 เดือน

3.2.10.2 การกำจัดเชื้อ

ศึกษาการกำจัดเชื้อ Total coliform ใช้วิธี drop plate โดยการนำสารละลายในระบบที่ปลูกพืชจริงทั้ง 2 ระบบคือระบบปลูกพืชที่ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC ให้แสงและศักย์ไฟฟ้า 2.0 V และอัตราการไหลคือ 0.5 ลิตรต่อนาที และระบบควบคุมที่ไม่ได้ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC มาศึกษาการกำจัดเชื้อ Total coliform เพื่อต้องการทราบปริมาณของเชื้อที่มีอยู่ทั้งสองระบบ

3.2.10.3 การวิเคราะห์ลักษณะของรากพืชด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ได้วิเคราะห์ลักษณะรากของผักบร็อคโคลี่ที่ปลูกแบบในระบบที่ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC และระบบที่ไม่ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope; OM)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

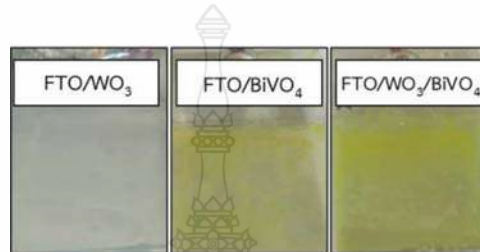
งานวิจัยนี้ได้แบ่งหัวข้อในการศึกษาออกเป็นสองหัวข้อดังนี้ หัวข้อที่หนึ่งเป็นการศึกษาและพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยได้พัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide, FTO) ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เลือกใช้ทั้งสแตนออกไซด์ (WO_3) และบิสมัทวานาเดต (BiVO_4) เป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง เช่น อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้า อัตราเร็วในการจุ่มลง - ดึงขึ้นของเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ฯลฯ และได้นำขั้วไฟฟ้าที่ได้แต่ละสภาวะไปศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่อง Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ศึกษากลไกต่าง ๆ ที่ใช้ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าโดยใช้สีย้อมเป็นตัวแทนในการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารอินทรีย์ ศึกษาประสิทธิภาพในการทำซ้ำ และอื่น ๆ ส่วนหัวข้อที่สองเป็นการศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเพื่อติดตั้งกับระบบไหลเวียนของน้ำในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมหรือป้องกันจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคพืช และเชื่อที่ก่อให้เกิดโรคกับมนุษย์ได้ อีกทั้งยังได้ศึกษาประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยร่วมกับ โดยได้แสดงผลการทดลองดังลำดับต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3 , FTO/BiVO_4 , และ $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

ได้เตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3 , FTO/BiVO_4 และ $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ เพื่อต้องการยืนยันว่าฟิล์มบางที่มีสารกึ่งตัวนำแบบผสมผสานสามารถเร่งการส่งผ่านประจุ ลดปรากฏการณ์การรวมตัวกันใหม่ของประจุ และเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำในกระบวนการ PEC [56, 57] ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า

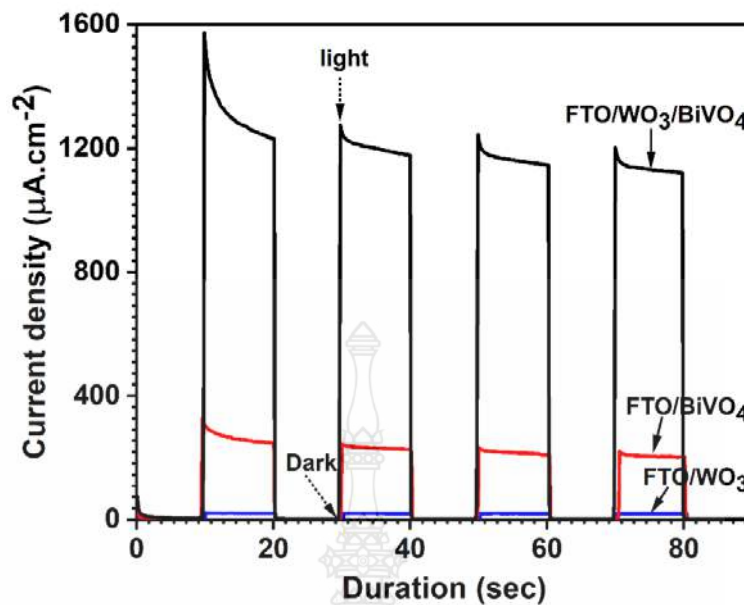
จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ พบว่าลักษณะของฟิล์มบางแต่ละขั้วไฟฟ้ามียุขที่แตกต่างกัน ฟิล์มบางของขั้ว FTO/WO₃ มีสีเหลืองใสเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทั่วแผ่น ฟิล์มบางของขั้ว FTO/WO₃/BiVO₄ มีสีเหลืองคล้ายกับขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าสามารถเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ บนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ ได้สำเร็จ



ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า

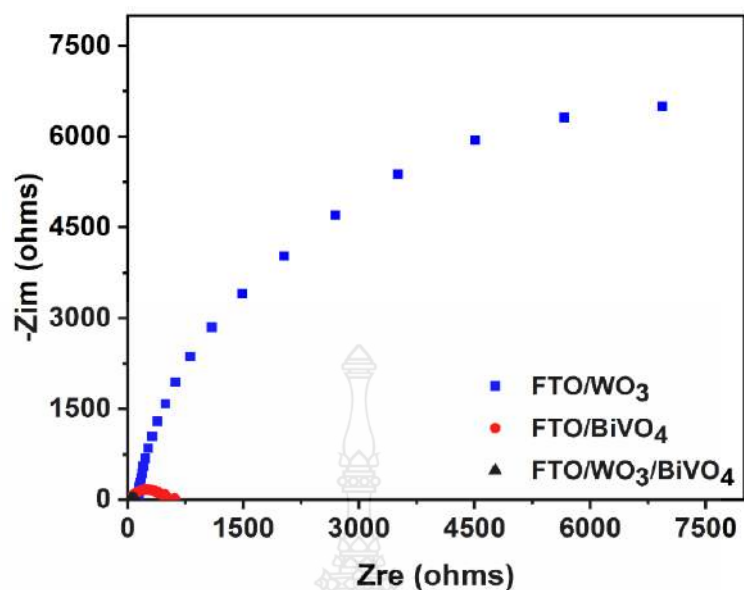
เมื่อนำขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode) มาศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี โดยมีขั้วไฟฟ้า Pt และ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Referent electrode) ตามลำดับ ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M โพแทสเซียมคลอไรด์ ภายใต้การควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1 V เปิด/ปิดแสง LED ทุก ๆ 10 วินาที จนครบ 90 วินาที เพื่อดูการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่พัฒนาขึ้นในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดถึง 1.12 mA/cm² ซึ่งสูงกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ และขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ แสดงว่าการตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้ และยังสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์การรวมตัวกันของประจุระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล (Recombination) ได้เพราะประจุสามารถแยกจากกันได้ดี เกิดการกลับมารวมตัวกันได้ยาก อีกทั้งยังมีการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วได้มาก



ภาพที่ 4.2 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.1.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการทดสอบการถ่ายโอนประจุระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและสารละลายวิเคราะห์โดย Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ซึ่งได้วิเคราะห์ผลจากค่าความต้านทานการส่งผ่านประจุ (Charge Transfer Resistance; Rct) และรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ยิ่งค่า Rct มีค่าน้อย รัศมีครึ่งวงกลมก็จะแคบ แสดงถึงความต้านทานการถ่ายโอนประจุที่น้อย มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ผลแสดงในภาพที่ 4.3 เป็นกราฟ Nyquist ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ ในสถานะให้แสง พบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ นั้นมีรัศมีครึ่งวงกลมเล็กกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃ และค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 58.69 โอห์ม ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ และ FTO/BiVO₄ มีค่า Rct เท่ากับ 1.31×10^{-4} และ 436.50 โอห์ม ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.3 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

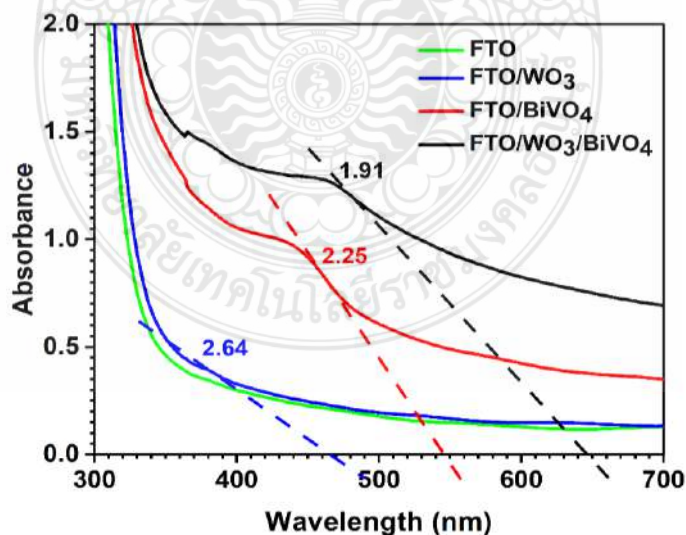
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

ขั้วไฟฟ้า	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)	ค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า; CPE (F)
FTO/WO ₃	1.31×10 ⁴	2.38×10 ⁻⁵
FTO/BiVO ₄	436.50	2.21×10 ⁻⁵
FTO/WO ₃ /BiVO ₄	58.69	5.09×10 ⁻⁵

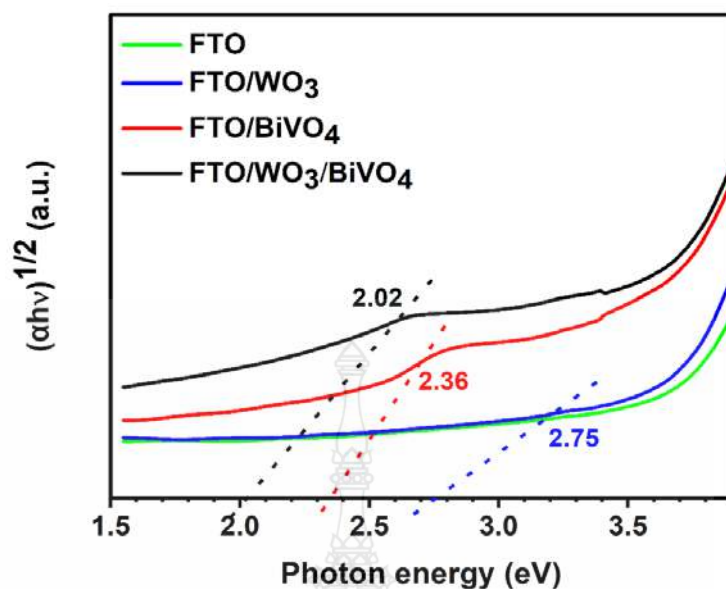
จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าพบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ จึงสรุปได้ว่าเมื่อตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนประจุได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า (Constant phase element ; CPE) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นมีค่าการเก็บประจุมากที่สุดคือ 5.09 × 10⁻⁵ F ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าว่ามีความเป็นรูพรุนมากที่สุด

4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า

จากการเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 200-800 นาโนเมตร ของชั้นไฟฟ้า FTO, FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติดังภาพที่ 4.4 พบว่าชั้นไฟฟ้าที่ตรึงด้วยสารกึ่งตัวนำ WO₃ และ BiVO₄ บนพื้นผิวที่เป็นกระจกนำไฟฟ้า FTO สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงที่ตามองเห็นคือที่ 470 และ 550 นาโนเมตร เมื่อตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ พบว่ามีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้เพิ่มมากขึ้นถึง 650 นาโนเมตร และเมื่อคำนวณแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่าเท่ากับ 2.64, 2.25 และ 1.91 eV ตามลำดับ และพบว่าชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีแถบช่องว่างพลังงานที่มีค่าน้อยกว่าเดิมเมื่อเทียบกับชั้นไฟฟ้าต่างๆ คือ 2.02 eV โดยค่าแถบพลังงานดังกล่าวสามารถหาได้จากการลากเส้นตรงทับเส้นความชันของกราฟโดยให้ตัดผ่านแกน X ที่เป็นแกนค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า (Photon energy) ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นมากที่สุด สาเหตุที่ทำให้ชั้นไฟฟ้านี้มีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้เพิ่มมากขึ้นมาจากการเติม BiVO₄ ลงไปบนชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ เพราะ BiVO₄ มีแถบช่องว่างระดับพลังงานที่แคบทำให้สามารถดูดกลืนแสงช่วงตามองเห็นได้ดี และนอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มาพัฒนาเพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกให้ดียิ่งขึ้นต่อไป



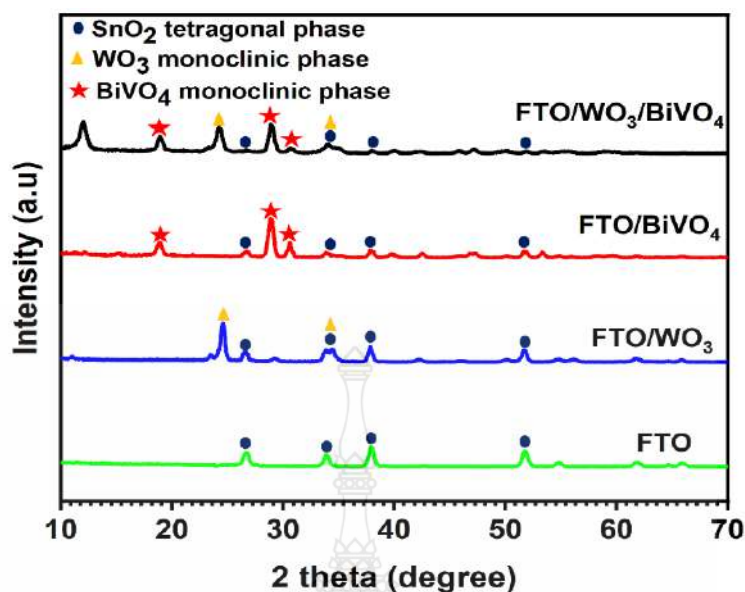
ภาพที่ 4.4 Absorbance spectra ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.1.5 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของชีวไฟฟ้า

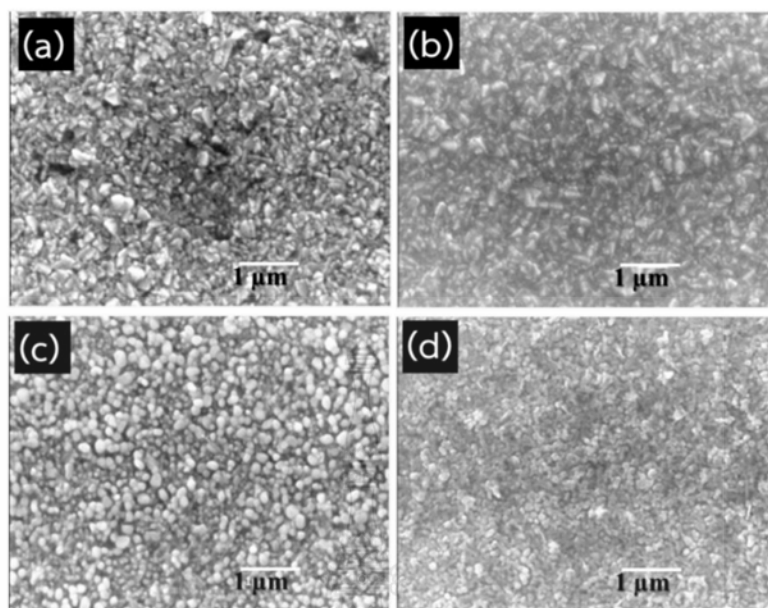
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของชีวไฟฟ้า FTO, FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.6 พบพีคสัญญาณการเลี้ยวเบนของ SnO₂ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 26.10, 34.10, 38.20, และ 52.00 ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกของ tetragonal SnO₂ ตามค่ามาตรฐานอ้างอิง ICSD 84576 [58] และสามารถยืนยันได้ว่ามีสารกึ่งตัวนำ WO₃ และ BiVO₄ อยู่บนผิวหน้ากระจกนำไฟฟ้า FTO ที่เป็นตัวรองรับ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ monoclinic โดยพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีมุม 2θ ของ WO₃ เท่ากับ 23.10, 23.67, 24.32, และ 34.10 องศา ซึ่งตรงกับค่ามาตรฐานอ้างอิง JCPDS no. 43-1035 [59] ตรงกับเฟส 002, 020, 200 และ 202 และมุม 2θ ของ monoclinic BiVO₄ เท่ากับ 18.80, 28.90, และ 30.60 องศา ตามค่ามาตรฐานอ้างอิง JCPDS no 14-0688 [60] ตรงกับเฟส 011, 121 และ 040 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกของของขั้วไฟฟ้า FTO, FTO/WO₃, FTO/BiVO₄, และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.1.6 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า FTO, FTO/WO₃, FTO/BiVO₄ และ FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) แสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่าลักษณะของกระจกนำไฟฟ้า FTO มีพื้นผิวที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมเชื่อมติดกัน เมื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำ WO₃ ลงบนพื้นผิวกระจกนำไฟฟ้า FTO จะเห็นอนุภาคที่มีลักษณะเหลี่ยมชัดเจนขึ้น แต่เมื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนพื้นผิวกระจกนำไฟฟ้า FTO จะเห็นอนุภาคเป็นรูปทรงกลมเชื่อมติดกัน จับกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ จะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ จะถูกสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ปกคลุมจนเต็มพื้นที่ ทำให้เห็นอนุภาคทรงกลมที่เล็กและสม่ำเสมอ มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ช่วยให้น้ำเกาะติดกับพื้นผิวขั้วไฟฟ้าและสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าการเก็บประจุ (CPE) ที่กล่าวไว้ข้างต้นในตารางที่ 4.1 สิ่งนี้เป็นการยืนยันได้ว่าผู้วิจัยสามารถเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ ได้สำเร็จ



ภาพที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชั้นไฟฟ้า (a) FTO, (b) FTO/WO₃, (c) FTO/BiVO₄, และ (d) FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.1.7 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

นำชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี เพื่อยืนยันชนิดของธาตุที่มีอยู่บนพื้นผิวชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้าด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีองค์ประกอบของ Si อยู่ 0.40% มีองค์ประกอบของ O อยู่ 18.73% มีองค์ประกอบของ V อยู่ 0.80% มีองค์ประกอบของ W อยู่ 13.91% และมีองค์ประกอบของ Bi อยู่ 4.07% จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถยืนยันได้ถึงองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ว่ามีชนิดของธาตุสอดคล้องกับสูตรทางเคมีของ WO₃ และ BiVO₄ และสามารถยืนยันการมีอยู่ของ V, Bi และ W บนพื้นผิวชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)

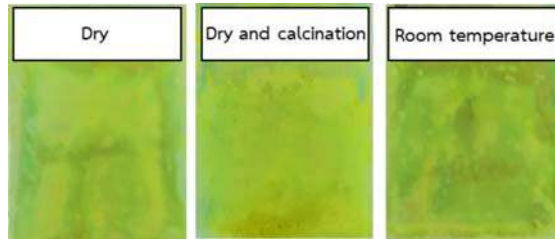
Element	Weight %	Atomic %
C K	1.22	5.33
O K	18.73	61.29
Si K	0.40	0.74
V K	0.80	0.82
Sn L	60.86	26.84
W M	13.91	3.96
Bi M	4.07	1.02
Totals	100.00	

4.2 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.2.1 ผลการศึกษาสภาวะการอบ FTO/WO₃ หลังกระบวนการจุ่มเคลือบของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า

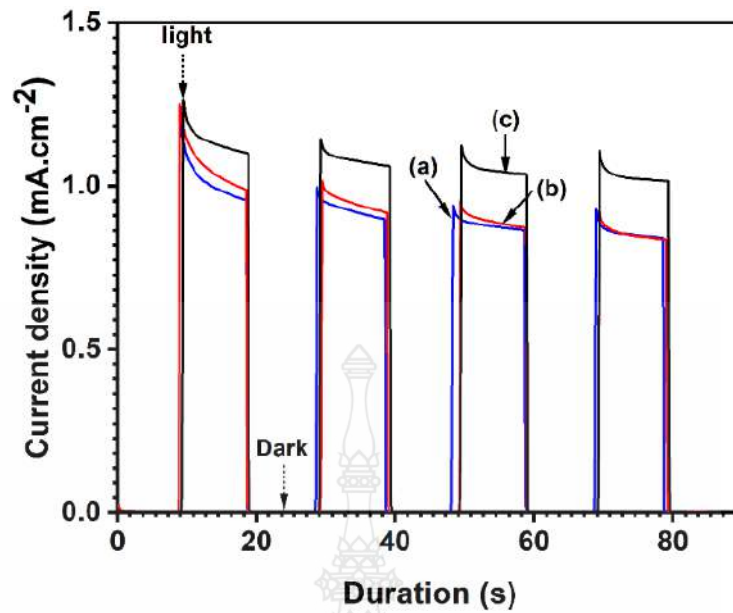
จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่ศึกษาสภาวะการอบ FTO/WO₃, สภาวะการอบและเผา FTO/WO₃ และการตั้ง FTO/WO₃ ที่งัวให้แห้งที่อุณหภูมิห้องหลังกระบวนการจุ่มเคลือบในสารละลาย WO₃ แล้วนำสภาวะทั้งสามไปจุ่มเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ พบว่าลักษณะของฟิล์มบางทั้ง 3 สภาวะมีสีเหลืองเกาะติดบนพื้นผิวที่เป็นกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่คล้ายกัน ดังนั้นการอบชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ ให้ผลที่ได้ไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติโดยศึกษาสภาวะของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ ที่สภาวะการอบ (Dry), สภาวะการอบและเผา (Dry and calcination), และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature)

4.2.1.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชั้นไฟฟ้า

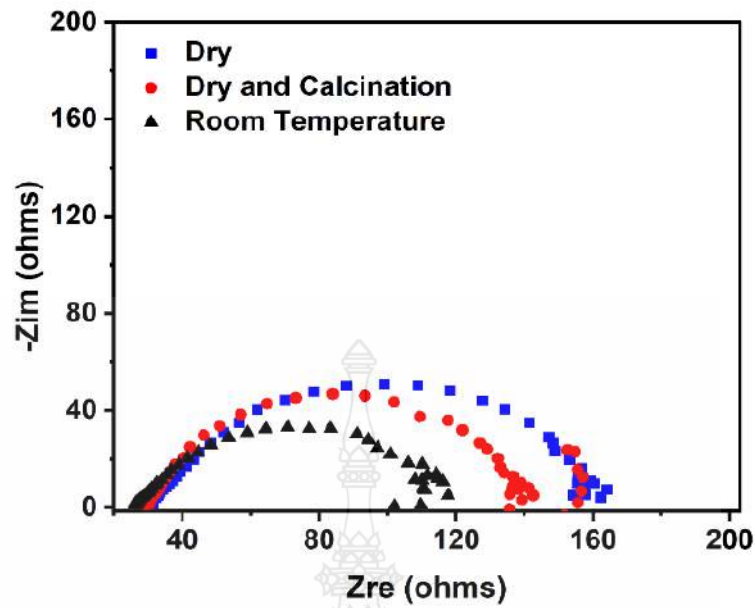
เตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ทั้งหมดสามสภาวะคือสภาวะการอบ FTO/WO₃, สภาวะการอบและเผา FTO/WO₃ และการตั้ง FTO/WO₃ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องหลังกระบวนการจุ่มเคลือบในสารละลาย WO₃ แล้วนำทั้งสภาวะทั้งสามไปจุ่มเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ จากผลการทดลองพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ในสภาวะหลังการจุ่มกระจกนำไฟฟ้า FTO ลงในสารละลาย WO₃ แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องมีค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาที่ได้มีค่าเท่ากับ 1.12 mA/cm² ค่ากระแสไฟฟ้าในสภาวะของการอบที่ 150 °C และนำไปเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที มีค่าเท่ากับ 1.02 mA/cm² และค่ากระแสไฟฟ้าการอบที่ 150 °C เพียงอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 0.99 mA/cm² ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของทั้งสามสภาวะไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกสภาวะการเตรียม WO₃ คือเคลือบสารกึ่งตัวนำ WO₃ บนกระจกนำไฟฟ้า FTO แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เป็นขั้นที่ 2 เพราะสภาวะการเตรียม WO₃ ที่เลือกนี้จะทำให้ประหยัดเวลาและประหยัดพลังงาน



ภาพที่ 4.9 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยศึกษาสถานะของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ (a) สภาวะการอบ, (b) สภาวะการอบและเผา, และ (c) ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

4.2.1.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาค่าความต้านทานการถ่ายโอนประจุของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ ในสถานะที่ต่างกันทั้ง 3 สถานะ แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมในสถานะตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องมีรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ที่เล็กกว่าสถานะอื่น ๆ และค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 80.07 โอห์ม ในขณะที่การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃ ในสภาวะการอบที่ 150 °C แล้วนำไปเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที และสภาวะการอบที่ 150 °C เพียงอย่างเดียวมีค่า Rct เท่ากับ 109.40 โอห์ม และ 130.90 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.10 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ โดยศึกษาสภาวะการอบ, สภาวะการอบและเผา, และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

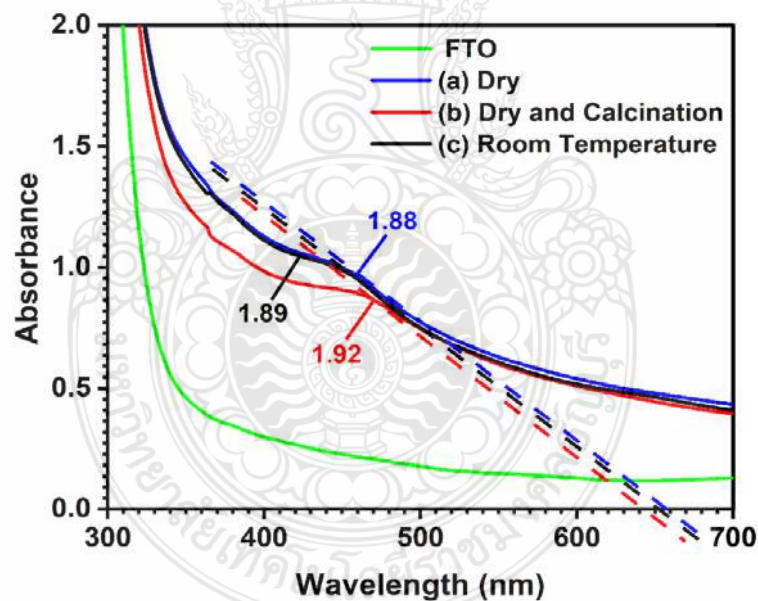
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยศึกษาสภาวะการอบ FTO/WO₃

สภาวะการอบ FTO/WO ₃	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)	ค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า; CPE (F)
(a) Dry	130.90	1.29x10 ⁻⁵
(b) Dry and calcination	109.40	1.41x10 ⁻⁵
(c) Room temperature	80.07	1.95x10 ⁻⁵

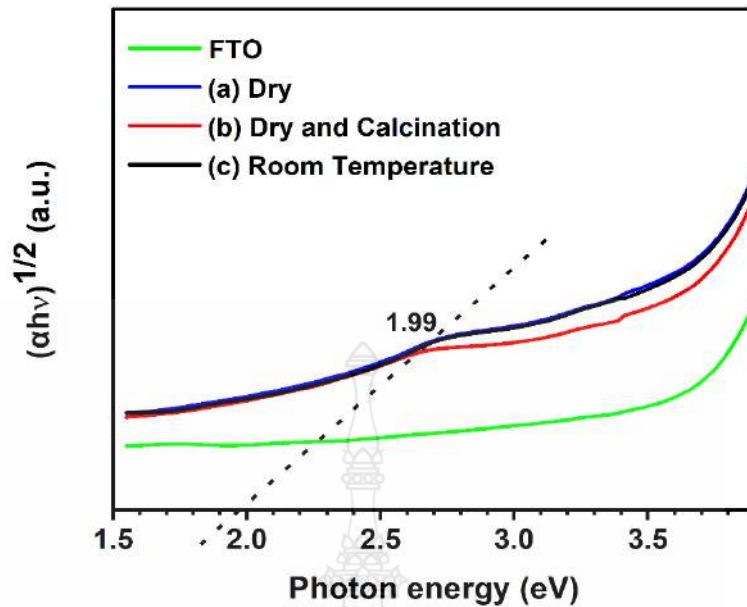
จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมในสภาวะตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องมีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า CPE ที่แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมในสภาวะตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องมีค่าการเก็บประจุมากที่สุด คือ 1.95×10^{-5} F ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าว่ามีความเป็นรูพรุนมากที่สุด

4.2.1.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ทั้งหมดสามสถานะคือสภาวะการอบ FTO/WO₃, สภาวะการอบและเผา FTO/WO₃ และการตั้ง FTO/WO₃ ที่ไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องหลังกระบวนการจุ่มเคลือบในสารละลาย WO₃ แล้วนำสถานะทั้งสามไปจุ่มเคลือบสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ดังแสดงในภาพที่ 4.11 จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าทั้งสามสถานะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยมีค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 660, 645 และ 656 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อคำนวณหาช่องว่างระหว่างพลังงาน จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 1.88, 1.92 และ 1.89 eV ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมในสภาวะตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องให้ค่าพลังงานแถบเท่ากับ 1.99 eV ซึ่งเป็นค่าช่องว่างระหว่างพลังงานที่แคบจึงส่งผลให้สามารถดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ดี และนอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.11 Absorbance spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่ศึกษาสภาวะการอบ, สภาวะการอบและเผา, และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่ศึกษาสภาวะการอบ, สภาวะการอบและเผา, และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

4.2.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิการเผาชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า

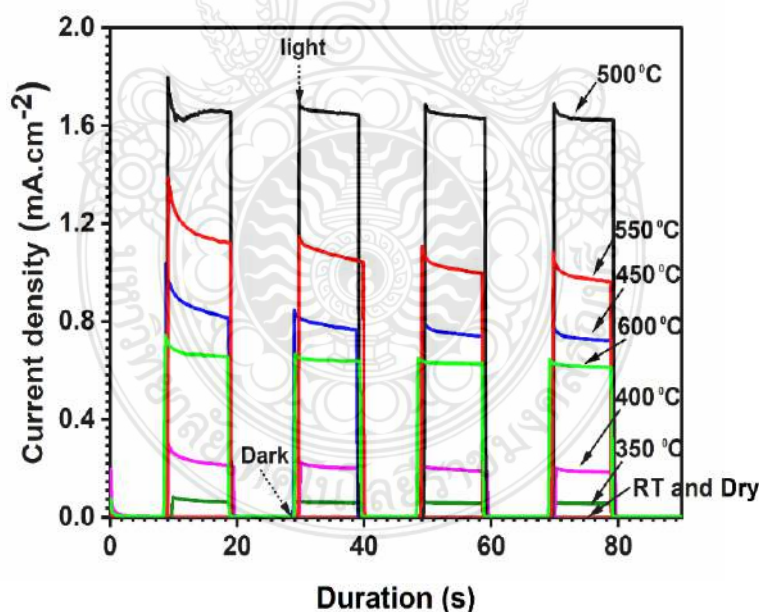
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาชีวไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C และ 600 °C ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ผลการทดลองพบว่าลักษณะของฟิล์มบางที่ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 350-600 °C ลักษณะของฟิล์มบางที่ได้จะมีสีเหลืองของสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เกาะติดบนพื้นผิวที่เป็นกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่คล้ายคลึงกัน โดยสีของฟิล์มบางจะเข้มมากขึ้นและลักษณะสีของฟิล์มจะมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติอื่น ๆ ต่อไป



ภาพที่ 4.13 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีการเผาชีวไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C

4.2.2.2 ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสฟอรัส

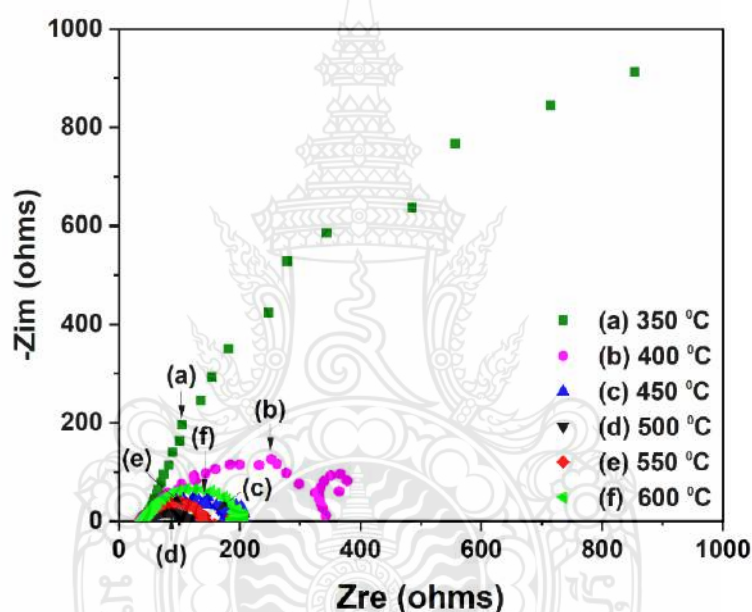
จากการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสฟอรัส FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาซัลไฟฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C และ 600 °C ดังแสดงในภาพที่ 4.14 ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นจาก RT-500 °C ค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำก็จะสูงมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.65 mA/cm² และค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำจะลดลงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 550-600 °C แสดงให้เห็นว่าการเผาซัลไฟฟอสฟอรัส FTO/WO₃/BiVO₄ ที่อุณหภูมิ 500 °C เหมาะสมที่สุดเพราะมีค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ส่งผลทำให้ซัลไฟฟอสฟอรัสสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้ดี นอกจากนี้การเผาซัลไฟฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงจะมีผลกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะโครงสร้างผลึก ซึ่งส่งผลต่อสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาสมบัติดังกล่าวเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.14 Amperograms ของซัลไฟฟอสฟอรัส FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาซัลไฟฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C

4.2.2.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C และ 600 °C ดังแสดงในภาพที่ 4.15 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 500 °C มีรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ที่เล็กกว่าอุณหภูมิการเผาอื่นและค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 60.01 โอห์ม ในขณะที่การเผาที่อุณหภูมิ 350 °C, 400 °C, 450 °C, 550 °C และ 600 °C มีค่า Rct เท่ากับ 2416.00 โอห์ม, 283.60 โอห์ม, 132.20 โอห์ม, 96.79 โอห์ม และ 149.40 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.15 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ (a) 350 °C, (b) 400 °C, (c) 450 °C, (d) 500 °C, (e) 550 °C, และ (f) 600 °C

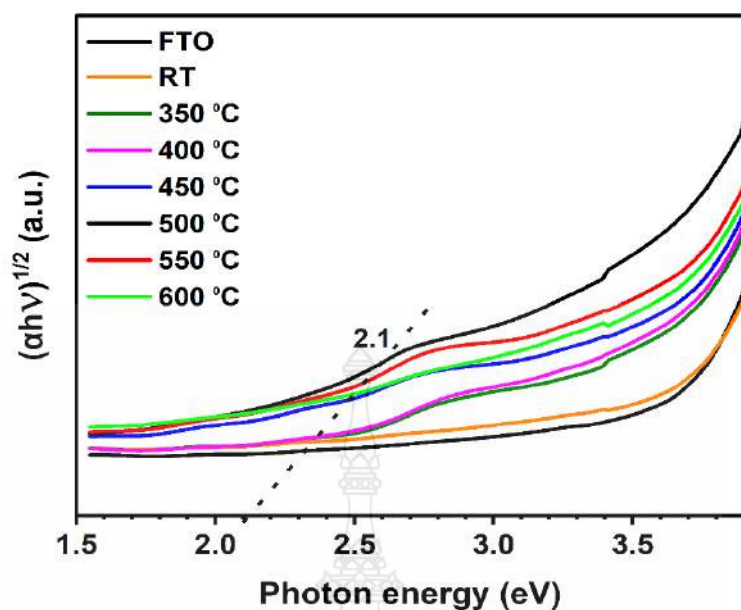
ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขั้วไฟฟ้า (°C)	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)
350	2416.00
400	283.60
450	132.20
500	60.01
550	96.79
600	149.40

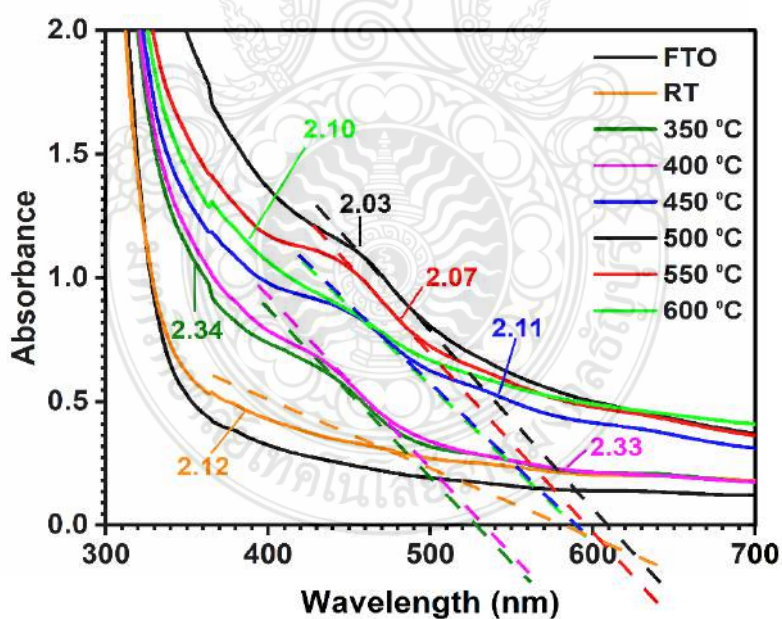
จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า พบว่าการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C มีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าต่ำที่สุด มีการนำไฟฟ้าที่ดี จากผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมที่สุดจะช่วยส่งเสริมการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำไปยังพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าได้ [22, 61] ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

4.2.2.4 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังในภาพที่ 4.16 จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิการเผาที่อุณหภูมิตั้ง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C และ 600 °C มีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ คำนวณหาช่องว่างระหว่างพลังงานได้เท่ากับ 2.12, 2.34, 2.33, 2.11, 2.03, 2.07 และ 2.10 eV ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าพบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิการเผาที่ 500 °C ให้ค่าพลังงานแถบเท่ากับ 2.1 eV ซึ่งเป็นค่าช่องว่างระหว่างพลังงานที่แคบจึงส่งผลให้สามารถดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ดี และนอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้เป็นอย่างดี



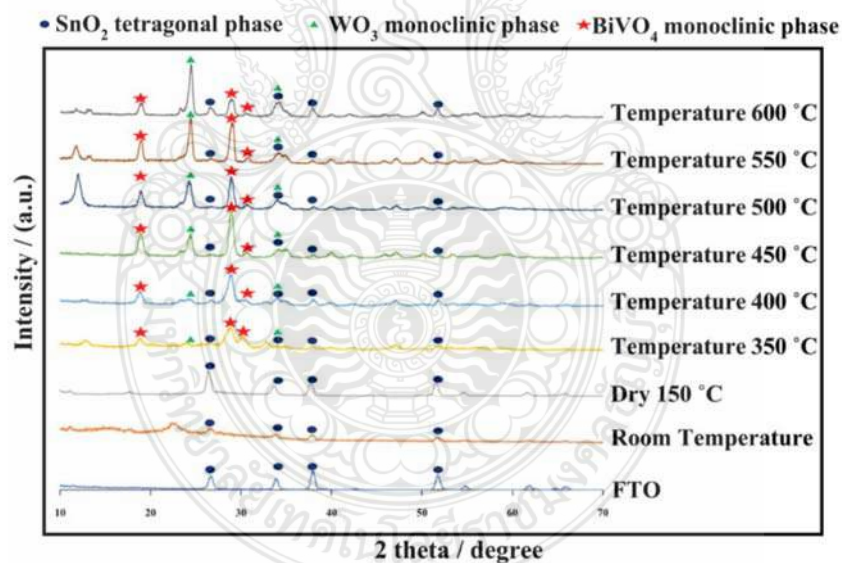
ภาพที่ 4.16 Absorbance spectra ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C

4.2.2.5 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า

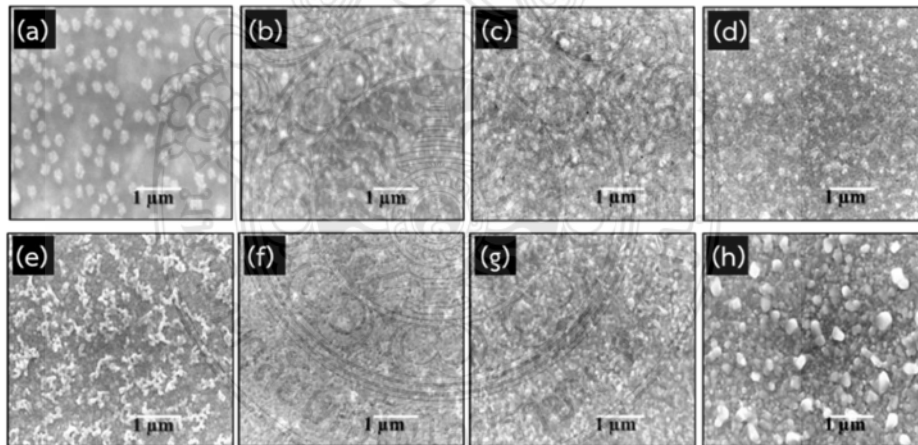
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ที่เตรียมจากการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้กระจกนำไฟฟ้า FTO เป็นตัวรองรับแสดงดังภาพที่ 4.18 พบพิกัดสัญญาณการเลี้ยวเบนของ SnO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 26.10, 34.10, 38.20, และ 52.00 องศา ตรงกับโครงสร้างผลึกของ tetragonal SnO_2 ตามค่ามาตรฐานอ้างอิง ICSD 84576 [58] และสามารถยืนยันได้ว่ามีสารกึ่งตัวนำ WO_3 และ BiVO_4 อยู่บนผิวหน้ากระจกนำไฟฟ้า FTO ที่เป็นตัวรองรับ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ monoclinic โดยพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีมุม 2θ ของ WO_3 เท่ากับ 23.10, 23.67, 24.32, และ 34.10 องศา ซึ่งตรงกับค่ามาตรฐานอ้างอิง JCPDS no. 43-1035[59] ตรงกับเฟส 002, 020, 200 และ 202 และมุม 2θ ของ monoclinic BiVO_4 เท่ากับ 18.80, 28.90, และ 30.60 องศา ตามค่ามาตรฐานอ้างอิง JCPDS no 14-0688[60] ตรงกับเฟส 011, 121 และ 040 ตามลำดับ จากผลจะเห็นได้ว่าการเผาตั้งแต่อุณหภูมิ 350-600 °C จะแสดงโครงสร้างผลึกแบบ monoclinic ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่มีคุณสมบัติที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า



ภาพที่ 4.18 การศึกษาโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ โดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C

4.2.2.6 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), อบที่ 150 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C และ 600 °C ดังแสดงในภาพที่ 4.19 พบว่าลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ได้ผ่านการเผาหรือที่อุณหภูมิห้อง (RT) มีอนุภาคค่อนข้างใหญ่โดยมีขนาดประมาณ 500 นาโนเมตร อนุภาคเหล่านี้ประกอบด้วยส่วนผสมของ WO₃ และ BiVO₄ เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C ลักษณะพื้นผิวเริ่มหลอมรวมกัน อนุภาคของพื้นผิวมีขนาดเล็กลงและจัดเรียงตัวหนาแน่นมากขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 350-500 °C ลักษณะพื้นผิวผลึกมีความชัดเจนและหลอมรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และลักษณะพื้นผิวเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงกลมที่เล็กและมีการจัดเรียงอนุภาคที่สม่ำเสมอเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 °C โดยอนุภาคมีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตร แต่เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นมากกว่า 500 °C คือที่อุณหภูมิ 550 °C และ 600 °C ขนาดอนุภาคที่ได้จะไม่สม่ำเสมอมีทั้งเล็กและใหญ่ผสมกันอยู่และในที่สุดก็มีขนาดอนุภาคสูงสุดประมาณ 1,000 นาโนเมตร ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ คือที่อุณหภูมิ 500 °C

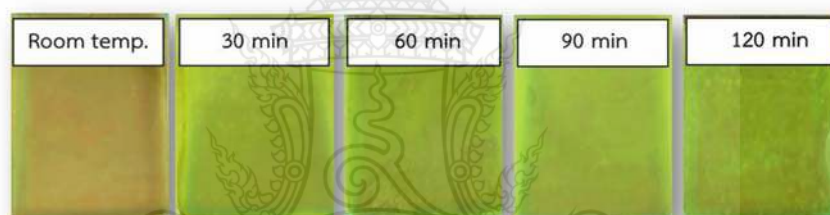


ภาพที่ 4.19 ลักษณะสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (a) โดยเผาหรืออุณหภูมิห้อง, (b) อบที่ 150 °C และที่อุณหภูมิการเผาต่างๆกัน, (c) 350 °C, (d) 400 °C, (e) 450 °C, (f) 500°C, (g) 550 °C, และ (h) 600 °C เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.2.3 ผลการศึกษาระยะเวลาการเผาขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของขี้ไฟฟ้า

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขี้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขี้ไฟฟ้าที่ต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่าลักษณะของฟิล์มบางที่ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C จะมีสีน้ำตาลเข้ม แต่ลักษณะของฟิล์มบางที่มีระยะเวลาการเผาตั้งแต่ 30-120 นาที จะได้ฟิล์มที่มีสีเหลืองของสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เกาะติดอยู่บนพื้นผิวที่เป็นกระจก ลักษณะของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ต่างกันไม่ชัดเจนมากนักที่ระยะเวลาการเผา ช่วง 30 – 90 นาที โดยการเผาขี้ไฟฟ้าที่ 90 นาที ลักษณะของฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันและเรียบมากที่สุด และเมื่อเผานานถึง 120 นาที ลักษณะฟิล์มบางมีความไม่สม่ำเสมอเกิดเป็นดวงขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในภาพที่ 4.20 จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติอื่นๆ ต่อไป

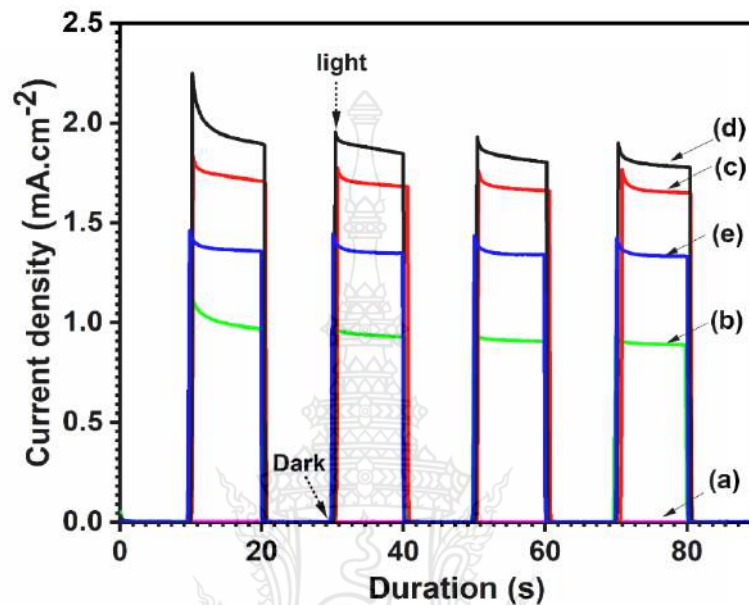


ภาพที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขี้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขี้ไฟฟ้าที่ต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, และ 120 นาที

4.2.3.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขี้ไฟฟ้า

จากการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการเผา BiVO₄ ที่เวลาต่างกันคือขี้ที่ไม่ได้ผ่านการเผา (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.21 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเผาที่เพิ่มขึ้น จนถึงเวลาการเผาที่ 90 นาที ค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำที่ได้คือ 1.78 mA/cm² และค่ากระแสจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเผานานกว่า 90 นาที แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเผาขี้ไฟฟ้าที่เหมาะสม

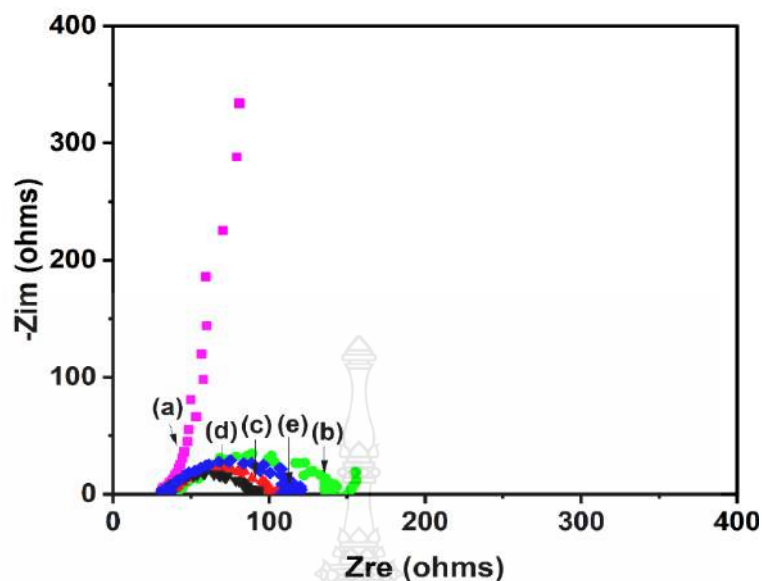
ที่สุดคือ 90 นาที เพราะมีค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ส่งผลทำให้ขั้วไฟฟ้ามีสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้ดี นอกจากนี้ระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าจะมีผลกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา ซึ่งส่งผลต่อสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาสมบัติดังกล่าวเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.21 Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ (a) อุณหภูมิห้อง (RT), (b) 30 นาที, (c) 60 นาที, (d) 90 นาที, และ (e) 120 นาที

4.2.3.3 ศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการเผา BiVO₄ ที่เวลาต่างกันคือ 0 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.22 พบว่าที่ระยะเวลาการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 90 นาที มีรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ที่เล็กกว่าอุณหภูมิการเผาอื่น ๆ และค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 50.30 โอห์ม ในขณะที่ระยะเวลาการเผาที่ 30, 60 และ 120 นาที มีค่า Rct เท่ากับ 92.18 โอห์ม, 60.55 โอห์ม และ 73.95 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.22 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C แต่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ (a) อุณหภูมิห้อง (RT), (b) 30 นาที, (c) 60 นาที, (d) 90 นาที, และ (e) 120 นาที

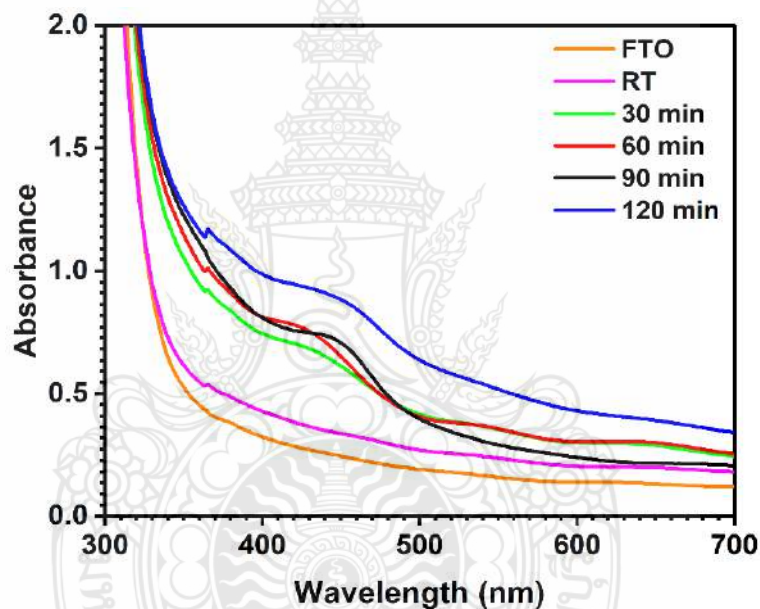
ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ระยะเวลาการเผาขั้วไฟฟ้า (นาที)	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)	ค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า; CPE (F)
30	92.18	1.37×10 ⁻⁵
60	60.55	3.18×10 ⁻⁵
90	50.30	3.96×10 ⁻⁵
120	73.95	2.25×10 ⁻⁵

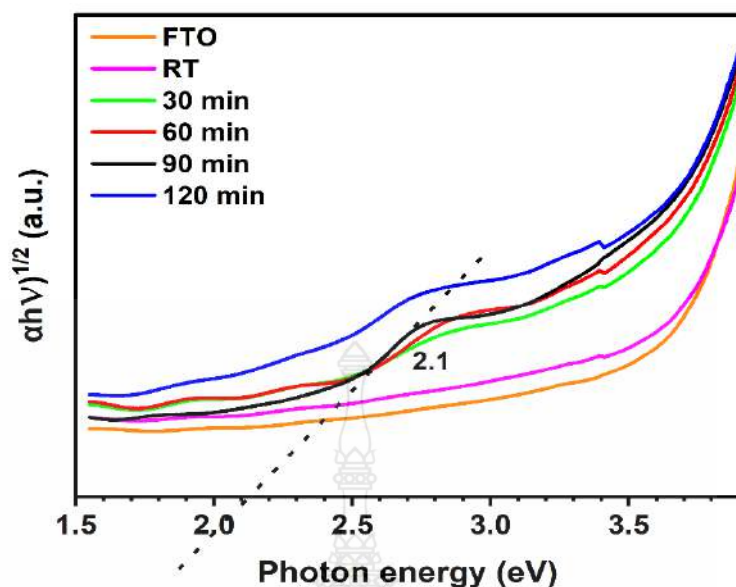
จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าพบว่าระยะเวลาการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 90 นาที มีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า CPE ที่แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีระยะเวลาการเผาที่ 90 นาที มีค่าการเก็บประจุมากที่สุด คือ 3.96×10⁻⁵ F ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่มีความเป็นรูพรุนมากที่สุด

4.2.3.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการเผา BiVO₄ ที่เวลาต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังในภาพที่ 4.23 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีระยะเวลาการเผาที่ 0 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที มีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ และจากภาพที่ 4.24 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีระยะเวลาการเผาที่ 90 นาที ให้ค่าพลังงานแถบเท่ากับ 2.1 eV ซึ่งเป็นค่าช่องว่างระหว่างพลังงานที่แคบจึงส่งผลให้สามารถดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ดี และนอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้เป็นอย่างดี



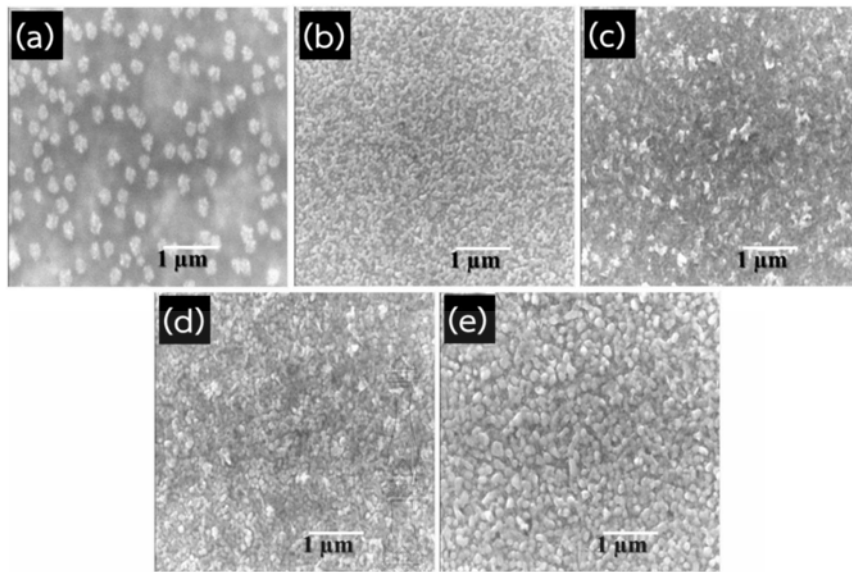
ภาพที่ 4.23 Absorbance spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาในการเผาขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, และ 120 นาที



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาในการเผาชีวไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (RT), 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, และ 120 นาที

4.2.3.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชีวไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของระยะเวลาการเผาต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการเผา BiVO₄ ที่เวลาต่างกันคือ 0 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.25 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเผาชีวไฟฟ้านานขึ้น ลักษณะของผลึกที่ได้จะชัดเจนและหลอมรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งลักษณะพื้นผิวเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงกลมที่มีรูพรุนสูงและรูปทรงสม่ำเสมอเมื่อเผาที่ 90 นาที เมื่อเผานานกว่า 90 นาที สัณฐานทรงกลมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งขนาดที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อความขรุขระที่มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และค่า CPE กล่าวไว้ข้างต้นในตารางที่ 4.5 ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเผาชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่อุณหภูมิ 500 °C โดยการเตรียมชีวไฟฟ้าจากเทคนิคเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติคือ 90 นาที



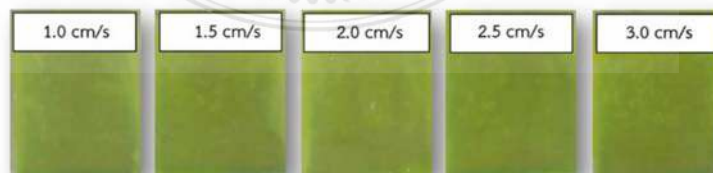
ภาพที่ 4.25 ลักษณะสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมโดยระยะเวลาการเผาที่แตกต่างกัน (a) โดยไม่ต้องเผาหรืออุณหภูมิห้องและที่ระยะเวลาการเผาต่างกัน, (b) 30 นาที, (c) 60 นาที, (d) 90 นาที, และ (e) 120 นาที เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.2.4 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าขึ้นในกระบวนการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

กระบวนการดึงขึ้นในกระบวนการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติถือเป็นสิ่งสำคัญในการส่งเสริมให้ฟิล์มบางเกาะติดได้สำเร็จ และส่งผลต่อคุณลักษณะของชั้นไฟฟ้าในเวลาต่อมา

4.2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า

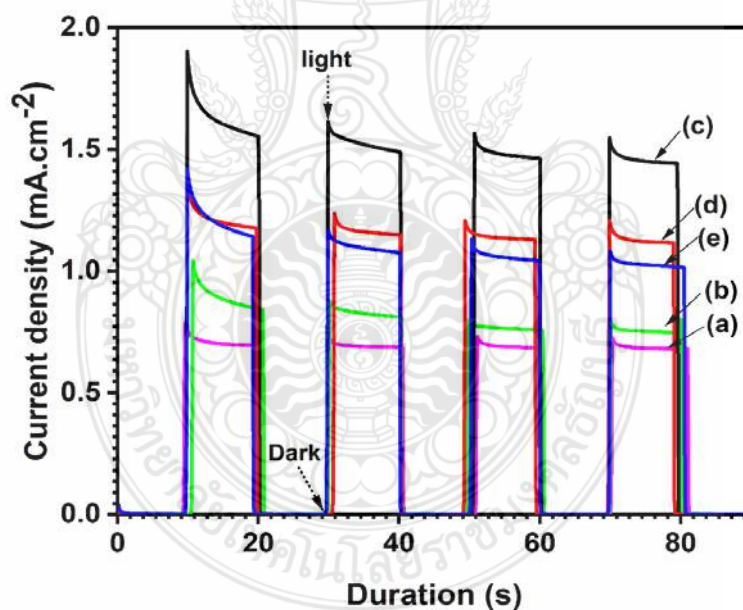
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าขึ้นเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.26 พบว่าลักษณะของฟิล์มบางมีสีเหลืองของสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เกาะติดอยู่บนพื้นผิวกระจกนำไฟฟ้าได้ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกต่อไป เนื่องจากงานวิจัยนี้จะพิจารณาสถานะที่เหมาะสมสำหรับอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าจากคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก



ภาพที่ 4.26 ลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s

4.2.4.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสเฟต

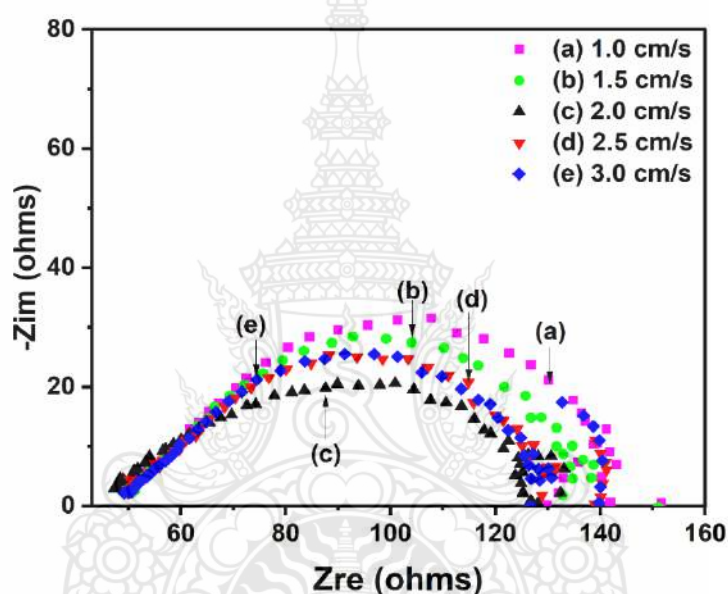
จากการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสเฟต FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงซัลไฟฟอสเฟตขึ้นเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.27 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราเร็วที่ 2.0 cm/s ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้คือ 1.44 mA/cm² ถ้าอัตราเร็วในการดึงซัลไฟฟอสเฟตมากกว่า 2.0 cm/s คือที่อัตรา 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จะลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราเร็วในการดึงมากขึ้น ระยะเวลาที่สารละลายจะสัมผัสผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตก็จะมีน้อยทำให้ฟิล์มบางเกาะติดที่ผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตไม่ดี ส่งผลต่อการส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนจากชั้นสารกึ่งตัวนำไปยังผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตและประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นอัตราเร็วที่เหมาะสมสำหรับการดึงซัลไฟฟอสเฟตขึ้นจากสารละลาย BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติคือ 2.0 cm/s



ภาพที่ 4.27 Amperograms ของซัลไฟฟอสเฟต FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงซัลไฟฟอสเฟตเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s

4.2.4.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าขึ้นเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ดังแสดงในภาพที่ 4.28 พบว่าที่อัตราเร็ว 2.0 cm/s มีรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ที่เล็กกว่าอัตราเร็วอื่น ๆ และค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 66.28 โอห์ม ในขณะที่อัตราเร็วในการดึงที่ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s มีค่า Rct เท่ากับ 81.39 โอห์ม, 80.62 โอห์ม, 72.90 โอห์ม และ 72.28 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.28 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s

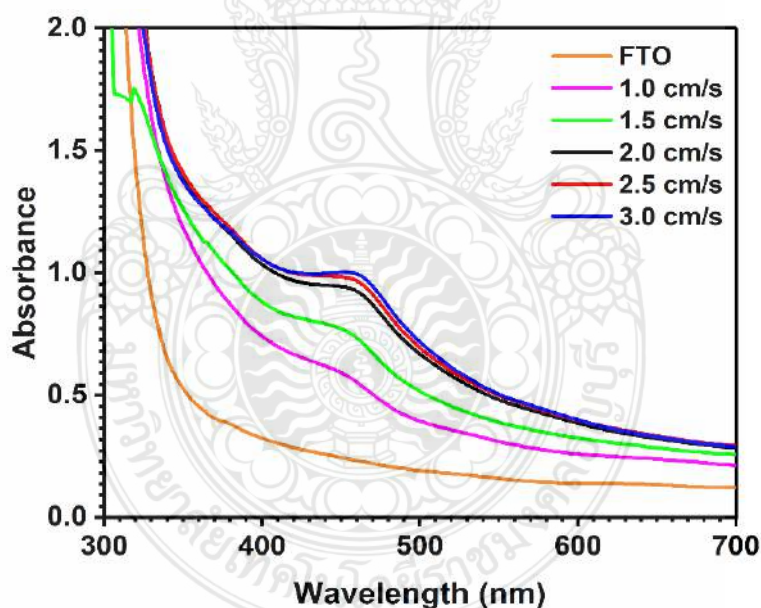
ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าต่างกัน

อัตราเร็วในการดึง (cm/s)	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)
1.0	81.39
1.5	80.62
2.0	66.28
2.5	72.90
3.0	72.28

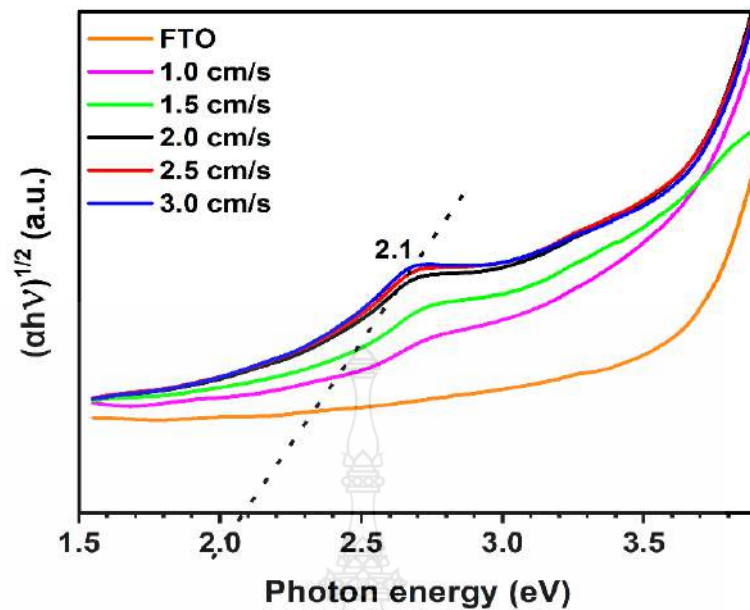
จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของชั้นไฟฟ้าพบว่าอัตราเร็วที่ 2.0 cm/s มีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของชั้นไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

4.2.4.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า

จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.29 พบว่าชั้นไฟฟ้าที่มีอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s มีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ และจากภาพที่ 4.30 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้าพบว่าชั้นไฟฟ้าที่มีอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 2 cm/s ให้ค่าพลังงานแถบเท่ากับ 2.1 eV ซึ่งเป็นค่าช่องว่างระหว่างพลังงานที่แคบจึงส่งผลให้สามารถดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ดี และนอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.29 Absorbance spectra ของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการดึงชั้นไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s



ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีอัตราเร็วในการดึงชีวไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s

4.2.5 ผลการศึกษาระยะเวลาการจุ่มชีวไฟฟ้า

4.2.5.1 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า

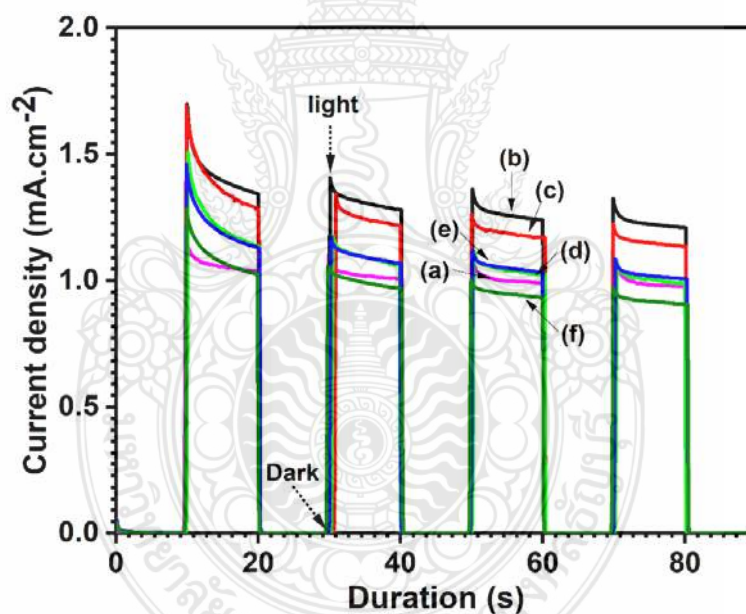
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาการจุ่มชีวไฟฟ้าเท่ากับ 0 วินาที, 5 วินาที, 10 วินาที, 15 วินาที, 20 วินาที และ 25 วินาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.31 พบว่าลักษณะของฟิล์มบางมีสีเหลืองของสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เกาะติดอยู่บนพื้นผิวที่เป็นกระจกนำไฟฟ้าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกต่อไป



ภาพที่ 4.31 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาการจุ่มชีวไฟฟ้าเท่ากับ 0 วินาที, 5 วินาที, 10 วินาที, 15 วินาที, 20 วินาที, และ 25 วินาที

4.2.5.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขี้ไฟฟ้า

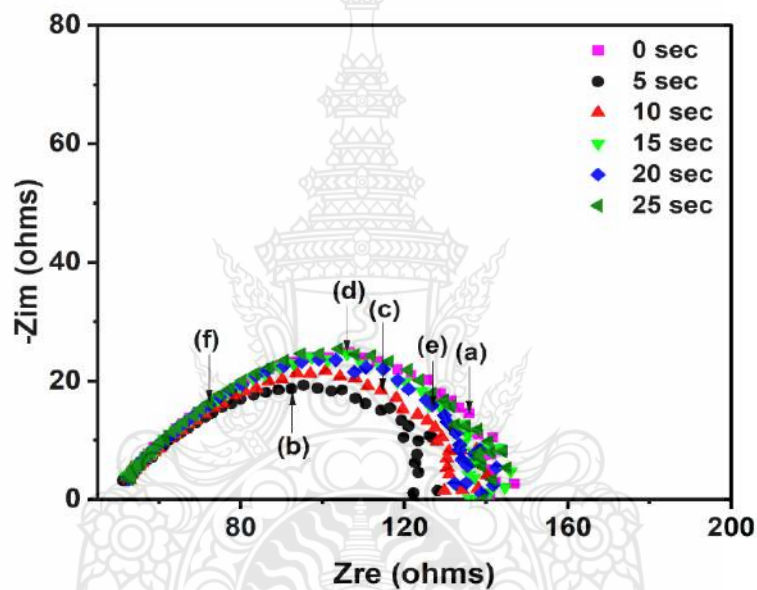
จากการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ ที่มีระยะเวลาการจุ่มขี้ไฟฟ้าเท่ากับ 0 วินาที, 5 วินาที, 10 วินาที, 15 วินาที, 20 วินาที และ 25 วินาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.32 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมีค่าลดลงตามระยะเวลาการจุ่มที่มากขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากความหนาของฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้การส่งผ่านประจุได้ไม่ดี ซึ่งระยะเวลาการจุ่มขี้ไฟฟ้าที่ 5 วินาทีให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.21 mA/cm² ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจุ่มขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃ ลงในสารละลาย BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติคือ 5 วินาที จะทำให้ขี้ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีที่สุด



ภาพที่ 4.32 Amperograms ของขี้ไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการจุ่มขี้ไฟฟ้าเท่ากับ (a) 0 วินาที, (b) 5 วินาที, (c) 10 วินาที, (d) 15 วินาที, (e) 20 วินาที, และ (f) 25 วินาที

4.2.5.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0 วินาที, 5 วินาที, 10 วินาที, 15 วินาที, 20 วินาที และ 25 วินาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.33 พบว่าที่ระยะเวลาการจุ่มที่ 5 วินาที มีรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ที่เล็กกว่าการจุ่มที่เวลาอื่น ๆ และค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 64.84 โอห์ม ในขณะที่เวลาการจุ่มที่ 0 วินาที, 10 วินาที, 15 วินาที, 20 วินาที และ 25 วินาทีมีค่า Rct เท่ากับ 78.97 โอห์ม, 68.80 โอห์ม, 74.61 โอห์ม, 73.35 โอห์ม และ 78.75 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.33 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 0 วินาที, (b) 5 วินาที, (c) 10 วินาที, (d) 15 วินาที, (e) 20 วินาที, และ (f) 25 วินาที

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่มีระยะเวลาการจุ่มขั้วไฟฟ้าต่างกัน

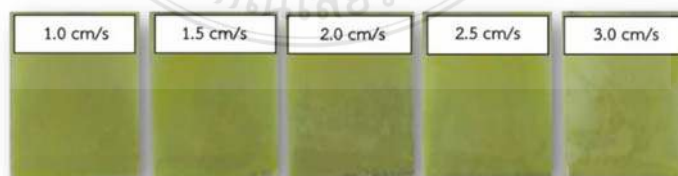
ระยะเวลาในการจุ่ม (วินาที)	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)	ค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า; CPE (F)
0	78.97	1.26X10 ⁻⁵
5	64.84	1.97X10 ⁻⁵
10	68.80	1.34X10 ⁻⁵
15	74.61	1.20X10 ⁻⁵
20	73.35	1.09X10 ⁻⁵
25	78.75	1.16X10 ⁻⁵

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า พบว่าระยะเวลาการจุ่มที่ 5 วินาที มีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า CPE ที่แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าที่ระยะเวลาการจุ่มที่ 5 วินาทีมีค่าการเก็บประจุมากที่สุดคือ 1.97X10⁻⁵ F ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าว่ามีความเป็นรูพรุนมากที่สุด

4.2.6 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าลง

4.2.6.1 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า

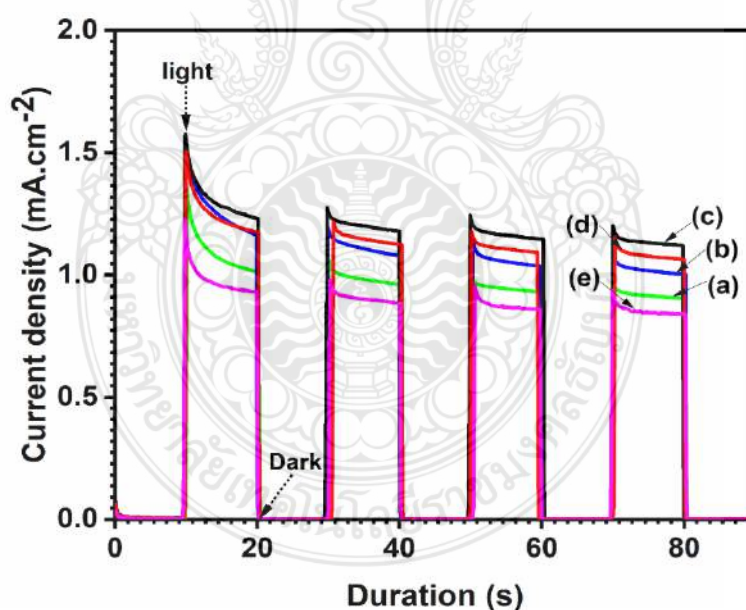
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าลงเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.34 พบว่าลักษณะของฟิล์มบางมีสีเหลืองของสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เกาะติดอยู่บนพื้นผิวที่เป็นกระจกนำไฟฟ้ามีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกต่อไป



ภาพที่ 4.34 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s, และ 3.0 cm/s

4.2.6.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสเฟต

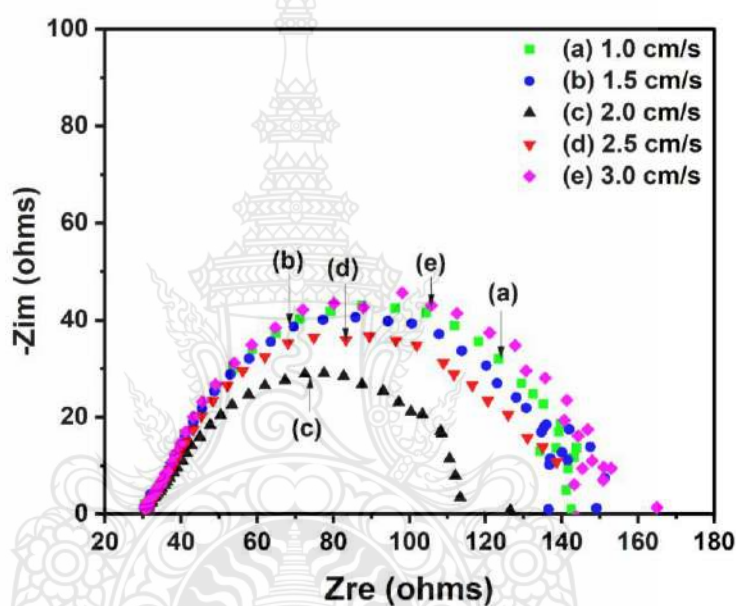
จากการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของซัลไฟฟอสเฟต FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มซัลไฟฟอสเฟตเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.35 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราเร็วที่ 2.0 cm/s ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้คือ 1.12 mA/cm² ถ้าอัตราเร็วในการจุ่มซัลไฟฟอสเฟตมากกว่า 2.0 cm/s คือที่อัตราเร็ว 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จะลดลง ซึ่งได้ผลการทดลองคล้ายกับปัจจัยที่ศึกษาอัตราเร็วในการตั้งขึ้น คือเมื่ออัตราเร็วในการจุ่มมากขึ้น ระยะเวลาที่สารละลายจะสัมผัสผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตก็จะมีน้อยทำให้ฟิล์มบางเกาะติดที่ผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตได้ไม่ดี ส่งผลต่อการส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนจากชั้นสารกึ่งตัวนำไปยังผิวหน้าซัลไฟฟอสเฟตและประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นอัตราเร็วที่เหมาะสมสำหรับการจุ่มซัลไฟฟอสเฟต FTO/WO₃ ลงในสารละลาย BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติคือ 2.0 cm/s



ภาพที่ 4.35 Amperograms ของซัลไฟฟอสเฟต FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มซัลไฟฟอสเฟตเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s

4.2.6.3 ผลการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.0 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s ดังแสดงในภาพที่ 4.36 พบว่าการจุ่มที่อัตราเร็วเท่ากับ 2.0 cm/s มีรัศมีครึ่งวงกลมของกราฟ Nyquist ที่เล็กกว่าอัตราเร็วอื่น ๆ และค่า Rct ที่ได้ก็มีค่าน้อยที่สุดคือ 79.37 โอห์ม ในขณะที่อัตราเร็วในการจุ่มที่ 1.0 cm/s, 1.5 cm/s, 2.5 cm/s และ 3.0 cm/s มีค่า Rct เท่ากับ 103.5 โอห์ม, 99.45 โอห์ม, 102.7 โอห์ม และ 114.2 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.36 กราฟ Nyquist plots ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าเท่ากับ (a) 1.0 cm/s, (b) 1.5 cm/s, (c) 2.0 cm/s, (d) 2.5 cm/s, และ (e) 3.0 cm/s

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่มีอัตราเร็วในการจุ่มขั้วไฟฟ้าต่างกัน

อัตราเร็วในการจุ่มลง (cm/s)	ความต้านทาน; Rct (โอห์ม)	ค่าการเก็บประจุบนขั้วไฟฟ้า; CPE (F)
1.0	103.50	2.44×10^{-5}
1.5	99.45	2.54×10^{-5}
2.0	79.37	4.33×10^{-5}
2.5	102.70	2.78×10^{-5}
3.0	114.20	2.43×10^{-5}

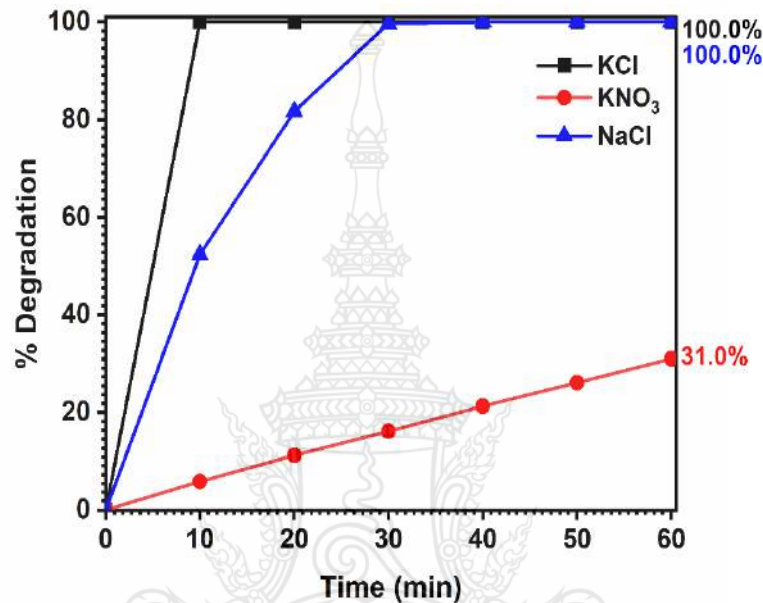
จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าพบว่าอัตราเร็วที่ 2.0 cm/s มีความสามารถในการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งผลของ EIS นี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า CPE ที่แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าอัตราเร็วที่ 2.0 cm/s มีค่าการเก็บประจุมากที่สุดคือ 4.33×10^{-5} F ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่มีความเป็นรูพรุนมากที่สุด

4.2.7 ผลการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

4.2.7.1 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

จากการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม โดยได้ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้ (1) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) (2) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ (3) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) โดยใช้แสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.37 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ KCl สามารถกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R ได้มากที่สุดถึง 100% ภายในเวลา 10 นาที ในขณะที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl สามารถกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R ได้ 100% ภายในระยะเวลา 30 นาที และ KNO_3 สามารถกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R ได้ 31% ภายในระยะเวลา 60 นาที สาเหตุที่ KCl และ NaCl มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้มากกว่า KNO_3 เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สามารถแตกตัวเป็นคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงและมีขนาดที่เล็กกว่าไนเตรตไอออน (KNO_3^-) จะช่วยส่งเสริมการถ่ายโอนประจุได้มากขึ้นในกระบวนการ PEC ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ PEC ในสารละลาย KCl สูงกว่าในสารละลาย KNO_3 อีกทั้งยังเกิดแอกทีฟคลอรีนใน

พอร์มของกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และไฮโปคลอไรต์ไอออน (ClO⁻) เมื่อค่า pH เท่ากับ 7.5[62] ซึ่งเป็น แอกทีฟคลอรีนที่มีความสามารถในการออกซิไดส์ที่สูงและมีอายุ (life time) ที่ยาวนานในสารละลายน้ำ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการออกซิเดชันในสารละลายน้ำภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (*OH) และแอกทีฟคลอรีน (HOCl/ClO⁻) ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้



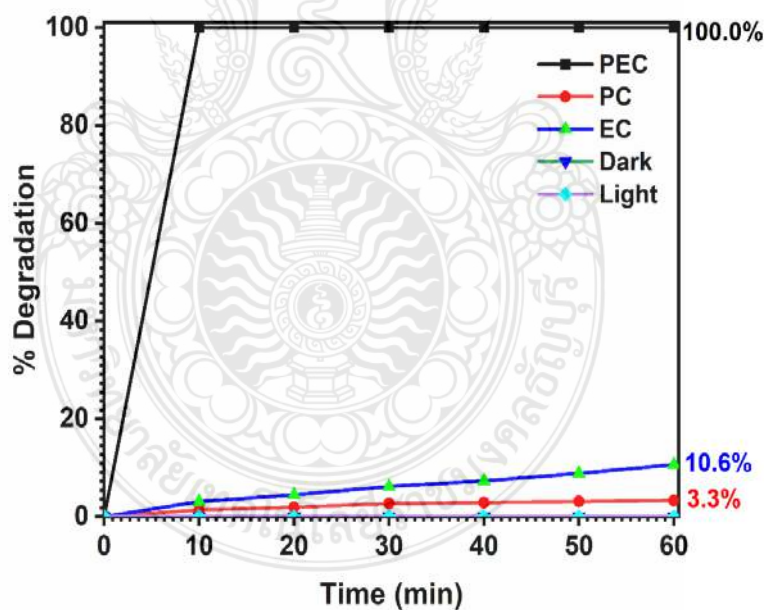
ภาพที่ 4.37 ร้อยละการกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติโดยศึกษานิตของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

4.2.7.2 ผลการศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการกำจัด

สารอินทรีย์สีย้อม

การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ได้ศึกษากลไก 5 กลไก ดังนี้ (1) Photoelectrocatalytic (PEC) เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V (2) Photocatalytic (PC) เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น (3) Electrocatalytic (EC) เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V (4) Dark เป็นกลไกที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ (5) Light เป็นกลไกการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงอย่างเดียว ปรากฏจากการใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่ง

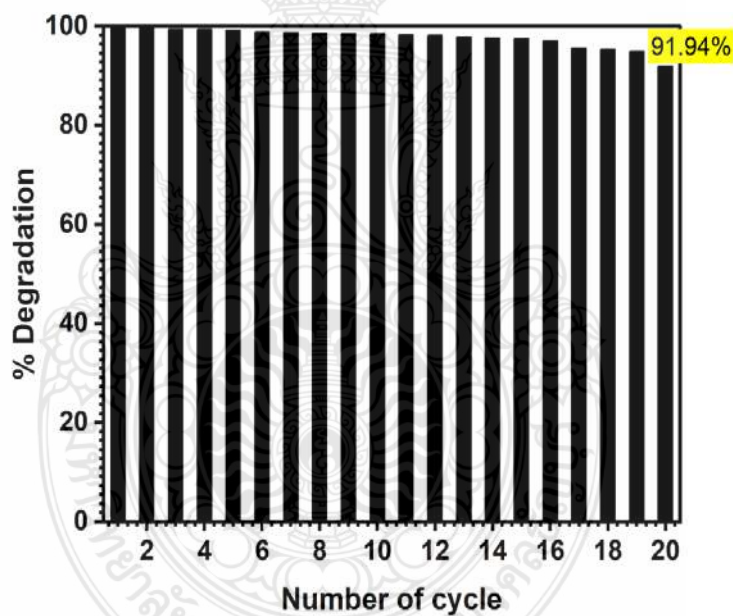
ตัวนำ โดยทั้ง 5 กลไกที่ศึกษานี้จะใช้ 0.5 M KCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ติดตามการลดลงของสีของ Ponceau 4 R ที่ความยาวคลื่น 507 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.38 พบว่ากลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ PEC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Ponceau 4 R ได้มากที่สุดถึง 100% ภายในระยะเวลา 10 นาที รองลงมาคือกลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ EC และ PC ซึ่งกำจัดได้เพียง 10.6% และ 3.3% ตามลำดับ ในขณะที่ Dark และ Light ไม่สามารถกำจัดสีของ Ponceau 4 R ได้ภายในระยะเวลา 60 นาที ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากกลไก PEC สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายได้ดีที่สุด เพราะเป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า ส่วน EC เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยศักย์ไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอน (Electron; e⁻) ไหลเข้าขั้วเท่านั้น และ PC เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงเพียงอย่างเดียวเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (Valent band ; VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction band ; CB) แต่ไม่มีการเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าเพื่อดึง e⁻ ส่งผลทำให้ e⁻ ไหลกลับมารวมกันที่ชั้น VB ดังนั้นผลการทดลองนี้สามารถยืนยันได้ว่าทั้งแสงและศักย์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการกำจัดสีของ Ponceau 4 R



ภาพที่ 4.38 % การกำจัดสีของ Ponceau 4 R โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ โดยศึกษากลไกโฟโตอิเล็กโทรคะตาไลติก (PEC), อิเล็กโทรคะตาไลติก (EC), โฟโตคะตาไลติก (PC), มืด, กลไกแสง

4.2.8 ผลการศึกษาความเสถียรและความคงทนของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ในการกำจัดสารอินทรีย์สีข้อม

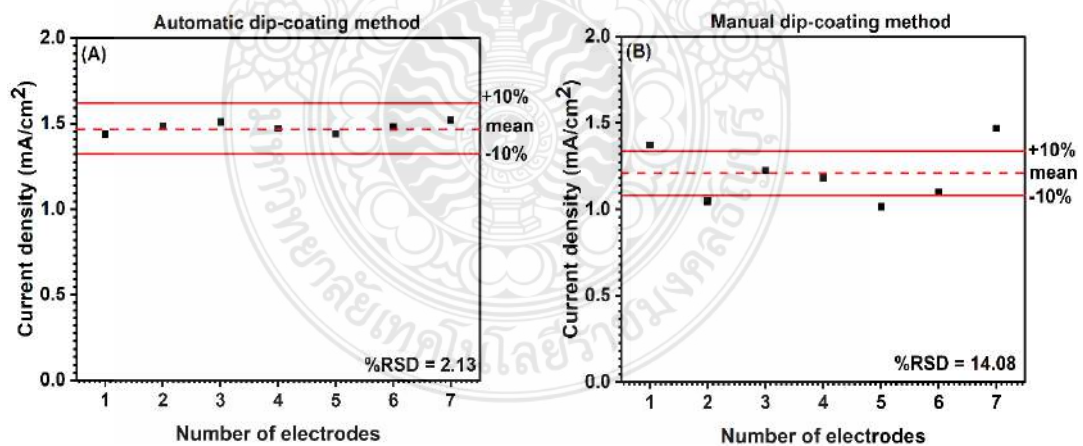
จากการศึกษาประสิทธิภาพการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้น โดยทดสอบการกำจัดสารอินทรีย์สีข้อม Ponceau 4 R ที่ความเข้มข้น 312 mg/L จำนวน 20 รอบ ใช้เวลาในการกำจัดสีข้อมรอบละ 15 นาที โดยใช้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.5 M พบว่าในช่วงแรกขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ สามารถกำจัดสีข้อม Ponceau 4 R ได้ 99.8% แต่เมื่อจำนวนรอบในการกำจัดสารอินทรีย์สีข้อมเพิ่มมากขึ้น ร้อยละการกำจัดที่ได้ก็จะลดน้อยลง ซึ่งร้อยละการกำจัดสีข้อมรอบที่ 20 มีค่าเท่ากับ 91.94% ดังแสดงในภาพที่ 4.39 ซึ่งค่าร้อยละการลดลงดังกล่าวนี้สามารถยอมรับได้ ดังนั้นสามารถบ่งบอกได้ว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นมา มีความเสถียรและความคงทนสูง ซึ่งเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป



ภาพที่ 4.39 ผลการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ในการกำจัดสารอินทรีย์สีข้อม Ponceau 4 R โดยใช้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ที่เวลา 15 นาที จำนวน 20 รอบ

4.2.9 ผลการศึกษาการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า (Reproducibility)

จากการศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/WO₃/BiVO₄ ซ้ำทั้งหมด 7 ครั้ง โดยเตรียมจากสองเทคนิค คือเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติและเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ ตรวจสอบโดยใช้สมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ดังแสดงในภาพที่ 4.40 พบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติทั้ง 7 ขั้วมีค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากกว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD) ทั้ง 7 ขั้วของทั้งสองเทคนิคแล้วพบว่า ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.47 mA/cm² และ 2.13% ตามลำดับ ส่วนขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.20 mA/cm² และ 14.08% ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติมีค่ามากกว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้ดี มีความแม่นยำสูง และยังสามารถทำซ้ำได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ

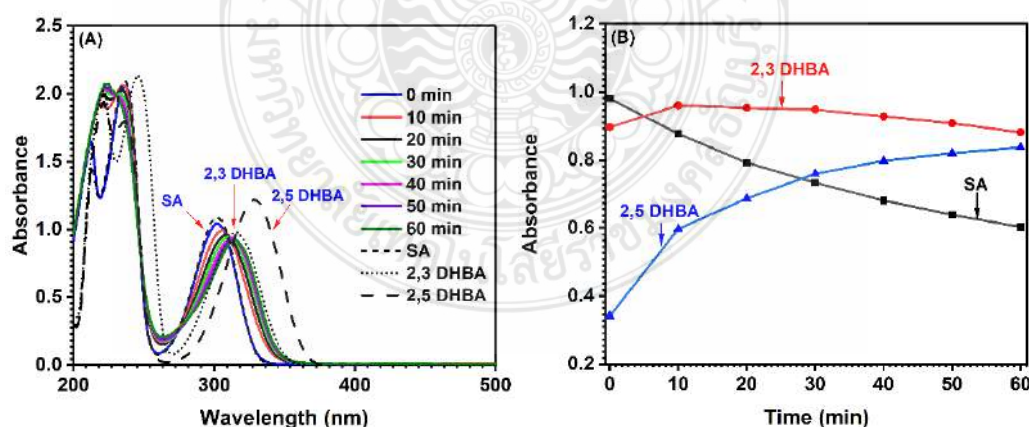
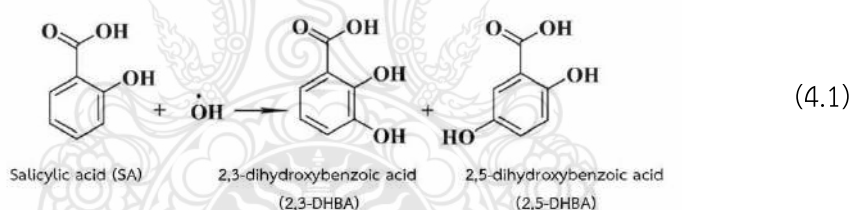


ภาพที่ 4.40 ผลการเตรียมซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเทคนิค (A) การจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ (B) การจุ่มเคลือบแบบใช้มือ

4.2.10 ผลของกลไกการเกิดปฏิกิริยา

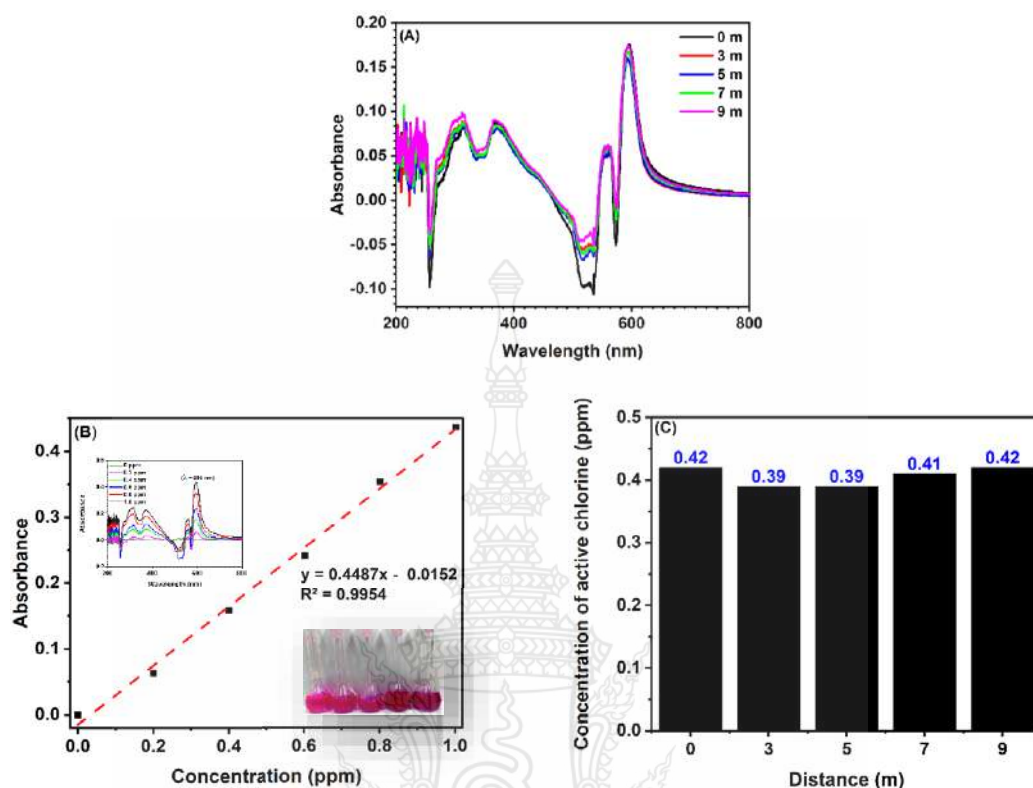
4.2.10.1 ผลการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล

ทดสอบอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ที่เกิดขึ้นจากน้ำออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีทางอ้อม ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยการนำมาทำปฏิกิริยากับกรดซาลิไซลิก (SA) สามารถวิเคราะห์ผลจากการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ได้ผลการศึกษาดังนี้ เมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นจะเปลี่ยนไป ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างจาก SA ไปเป็นกรด 2,3-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิก (2,3-DHBA) และ 2,3-DHBA จะเปลี่ยนเป็นกรด 2,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิก (2,5-DHBA) ดังแสดงในภาพที่ 4.41A และในภาพ 4.41B แสดงให้เห็นการลดลงของสารตั้งต้น SA และการเพิ่มขึ้นของ 2,3-DHBA และ 2,5-DHBA ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งยืนยันการมีอยู่ของ $\cdot\text{OH}$ จากปฏิกิริยาในสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณของ SA เริ่มลดลงและจะเกิด 2,3-DHBA และ 2,5-DHBA เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นผลการทดลองนี้สามารถยืนยันได้ว่าเกิด $\cdot\text{OH}$ ในระบบ PEC ได้จริง และ $\cdot\text{OH}$ ที่เกิดขึ้นนี้มีสมบัติในการออกซิไดส์ที่สูงมาก สามารถแพร่กระจายมายังบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของสารละลายเพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ และเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำได้



ภาพที่ 4.41 A และ B ผลการทดสอบการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ด้วยวิธีทางอ้อม โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / BiVO_4 ที่เตรียมจากเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ

4.2.10.2 ผลการศึกษาระยะทางการเกิดแอกทีฟคลอรีน (Active chlorine, Cl_{ac})



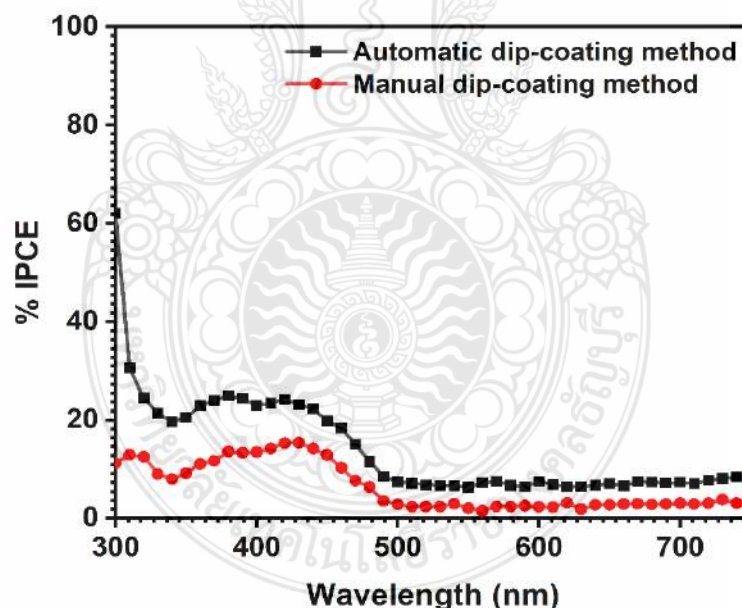
ภาพที่ 4.42 การเกิดแอกทีฟคลอรีนที่ระยะทาง 0, 3, 5, 7, และ 9 เมตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ (A) ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะทางต่าง ๆ (B) กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอกทีฟคลอรีน (C) ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่ระยะทางต่าง ๆ

การศึกษาการเกิดแอกทีฟคลอรีนที่ระยะทางต่าง ๆ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 2 V ในสารละลาย 0.02 M KCl ที่สามารถทำให้เกิดแอกทีฟคลอรีนในฟอร์มกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous, HOCl) และคลอไรต์ไอออน (Chlorite ion, OCl⁻) ซึ่งฟอร์มของแอกทีฟคลอรีนที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย ถ้าค่า pH ต่ำ (สภาวะที่เป็นกรด) จะมี HOCl ในขณะที่ค่า pH สูง (สภาวะที่เป็นด่าง) จะมี OCl⁻ [63] โดยงานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นศึกษาการเกิดแอกทีฟคลอรีนที่ 0, 3, 5, 7, และ 9 เมตร ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.42A พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะทาง 0, 3, 5, 7, และ 9 เมตร ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถคำนวณเป็นความเข้มข้นได้จากสมการ $y = 0.4487x - 0.0152$ ดังแสดงในภาพ 4.42B ซึ่งมีความเข้มข้นประมาณ 0.42, 0.39, 0.39, 0.41, และ 0.42 ppm ตามลำดับ

ดังแสดงในภาพที่ 4.42C จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะทางประมาณ 9 เมตร ความเข้มข้นของแอททิฟคลอรีนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงสามารถยืนยันได้ว่าแอททิฟคลอรีนที่เกิดขึ้นในระบบสามารถเคลื่อนที่ไปในระยะทางที่ไกลเพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ และเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำและที่รากพืชในระบบไฮโดรโปนิคส์ได้ ผู้วิจัยจึงใช้หลักการเกิดแอททิฟคลอรีนในการอธิบายการกำจัดเชื้อโรคหรือป้องกันเชื้อโรคในรากพืชของผักไฮโดรโปนิคส์

4.2.10.3 ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแสไฟฟ้า (%IPCE)

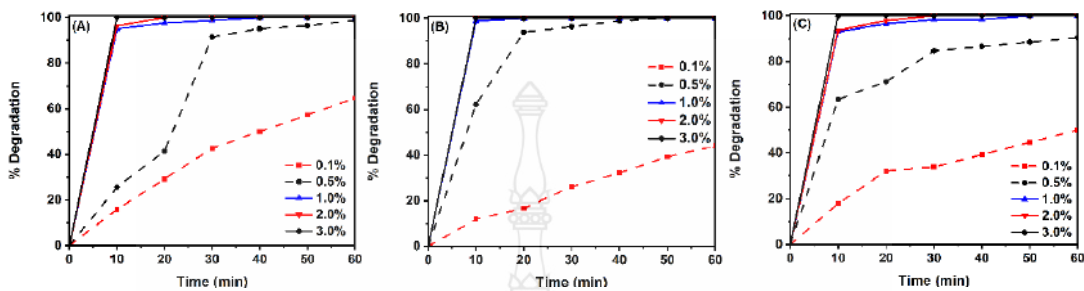
จากการศึกษา Incident photon-to-current conversion efficiency (%IPCE) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแส ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้าอยู่ 2 เทคนิค คือเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้มือ (Manual dip coating method) และเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic Dip-coating method) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.43 จะเห็นได้ว่าการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบจะมี %IPCE ที่มากกว่าการจุ่มแบบใช้มือ นั้นแสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าที่จุ่มแบบเครื่องมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงให้เป็นค่ากระแสได้ดีกว่าการจุ่มโดยใช้มือ ซึ่งมากกว่าถึง 2 เท่า



ภาพที่ 4.43 ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานกระแส (%IPCE) โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ และเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ

4.3 ศึกษาความคงทนของชีวไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย

4.3.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และค่า pH ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อย



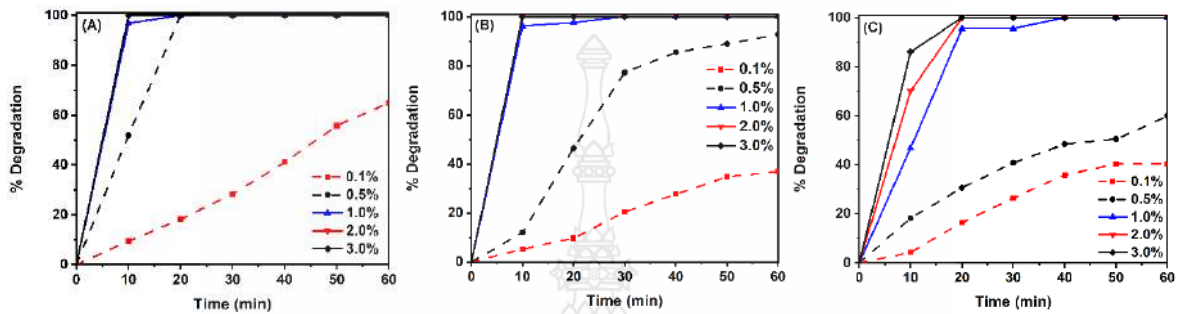
ภาพที่ 4.44 ร้อยละการกำจัดสีย้อมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ และสารละลายอยู่ในสภาวะที่เป็น (A) กรด (pH = 3), (B) กลาง (pH=7), และ (C) เบส (pH=11)

ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยโดยใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 2.0 V ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิดคือ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นที่ต่างกันคือ 0.1%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, และ 3.0% และค่า pH ที่ต่างกันตั้งแต่ช่วงความเป็นกรด กลาง และเบส ที่ 3, 7, และ 11 ตามลำดับ โดยได้ทดลองเป็นเวลา 60 นาที เก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลการลดลงของสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ให้ผลการทดลองดังนี้ จากภาพที่ 4.44A - 4.44C แสดงผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ช่วงความเข้มข้น 0.1-3.0% ในสภาวะที่มีค่า pH เท่ากับ 3, 7 และ 11 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Ponceau 4 R ก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ KCl เมื่อแตกตัวแล้วจะได้คลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นปริมาณคลอไรด์ไอออนก็จะมากขึ้นและเกิดการเปลี่ยนเป็นแอกทีฟคลอรีนได้มากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้กำจัดได้มากยิ่งขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อนการกำจัดและหลังการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย้อมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ความเข้มข้นและค่า pH ที่ต่างกัน

pH = 3			
Concentration of KCl	Photocurrent (mA/cm ²)		
	Before	After	Different
0.1%	1.88	1.24	0.64
0.5%	1.96	1.29	0.67
1.0%	1.66	1.26	0.41
2.0%	2.18	1.70	0.48
3.0%	2.18	1.72	0.46
pH = 7			
Concentration of KCl	Photocurrent (mA/cm ²)		
	Before	After	Different
0.1%	2.03	1.69	0.34
0.5%	1.92	1.39	0.52
1.0%	1.83	1.23	0.60
2.0%	1.63	1.29	0.35
3.0%	2.29	1.81	0.49
pH = 11			
Concentration of KCl	Photocurrent (mA/cm ²)		
	Before	After	Different
0.1%	1.68	1.21	0.47
0.5%	2.03	1.43	0.60
1.0%	1.64	1.11	0.53
2.0%	1.74	1.43	0.31
3.0%	1.90	1.39	0.50

นอกจากนี้แล้วได้ติดตามค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นในสารละลายน้ำก่อนและหลังการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่ากระแสก่อนการกำจัด (เริ่มต้น) และหลังการกำจัด (สุดท้าย) ไม่แตกต่างกันมีค่าที่ลดลงเพียงเล็กน้อย และลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้ายังคงมีสีเดิมของสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ไม่หลุดลอก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีความทนต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูง ทนต่อสภาวะกรด กลาง และเบส



ภาพที่ 4.45 ร้อยละการกำจัดสีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ และสารละลายอยู่ในสภาวะที่เป็น (A) กรด (pH = 3), (B) กลาง (pH=7), และ (C) เบส (pH=11)

จากภาพที่ 4.45 แสดงผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ ช่วงความเข้มข้น 0.1-3.0% ในสภาวะที่มีค่า pH เท่ากับ 3, 7 และ 11 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Ponceau 4 R ก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ NaCl เมื่อแตกตัวแล้วจะได้คลอไรด์ไอออน (Cl^-) และเปลี่ยนรูปเป็นแอกทิฟคลอรีนผ่านกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นคลอไรด์ไอออนก็จะแตกตัวมากขึ้น จึงส่งผลให้กำจัดได้มากยิ่งขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้แล้วได้ติดตามค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นในสารละลายน้ำก่อนและหลังการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่ากระแสก่อนการกำจัด (เริ่มต้น) และหลังการกำจัด (สุดท้าย) ไม่แตกต่างกันมีค่าที่ลดลงเพียงเล็กน้อย และลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้ายังคงมีสีเดิม ไม่หลุดลอก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีความทนต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูง ทนต่อสภาวะกรด กลาง และเบส

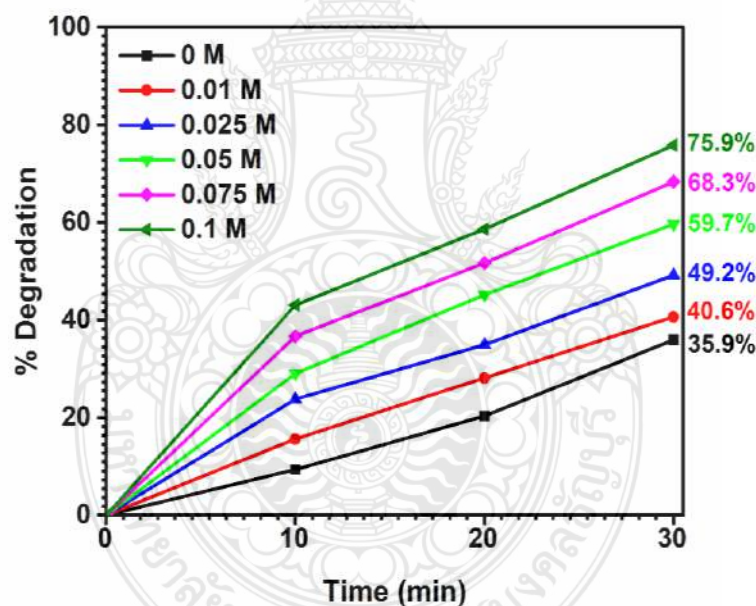
ตารางที่ 4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อนการกำจัดและหลังการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย้อมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นและค่า pH ที่ต่างกัน

pH = 3			
Concentration of NaCl	Photocurrent (mA/cm ²)		
	Before	After	Different
0.1%	1.80	1.33	0.46
0.5%	1.56	1.28	0.28
1.0%	2.04	1.67	0.37
2.0%	1.93	1.60	0.33
3.0%	1.60	1.39	0.21
pH = 7			
Concentration of NaCl	Photocurrent (mA/cm ²)		
	Before	After	Different
0.1%	1.72	1.47	0.26
0.5%	1.87	1.37	0.50
1.0%	1.88	1.56	0.31
2.0%	2.06	1.63	0.40
3.0%	1.96	1.70	0.26
pH = 11			
Concentration of NaCl	Photocurrent (mA/cm ²)		
	Before	After	Different
0.1%	1.67	1.19	0.48
0.5%	1.86	1.26	0.60
1.0%	1.65	1.37	0.29
2.0%	1.66	1.42	0.24
3.0%	1.6	1.06	0.57

4.4 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

4.4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในการกำจัดเชื้อ *E.coli*

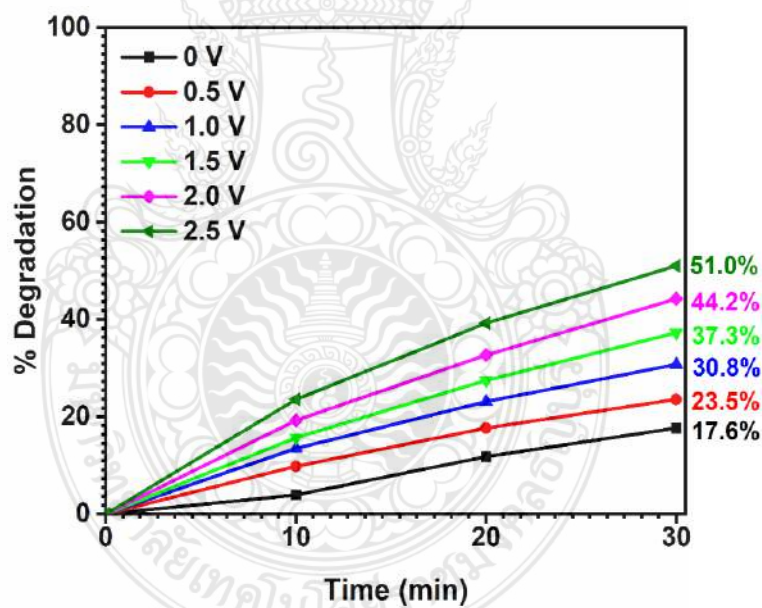
จากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้าที่ 2.0 V ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ได้ศึกษาคือ 0 M, 0.01 M, 0.025 M, 0.05 M, 0.075 M และ 0.1 M ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.46 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นจาก 0.0 - 0.1 M ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *E.coli* ก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สามารถแตกตัวเป็นคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) และเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าให้กลายเป็นแอกทีฟคลอรีน รวมถึงอนุมูล ไฮดรอกซิล ที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อได้ [64] ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นคลอไรด์ไอออนก็จะแตกตัวมากขึ้น จึงส่งผลให้กำจัดเชื้อ *E.coli* ได้มากยิ่งขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4.46 ร้อยละการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ โดยศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการกำจัดเชื้อที่ 0.0 M, 0.01 M, 0.025 M, 0.05 M, 0.075 M, และ 0.1 M

4.4.2 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อ *E.coli*

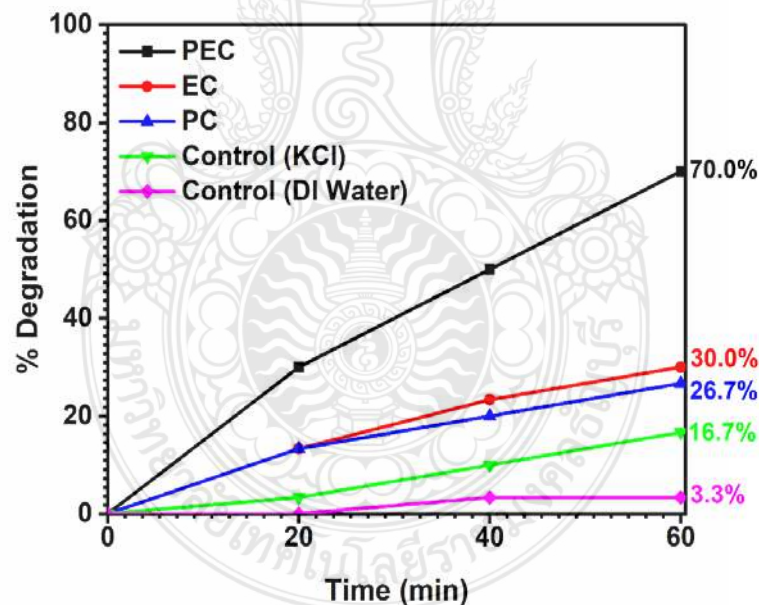
จากการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบในการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นด้วยการใช้เทคนิคโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (PEC) ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ศึกษาคือ 0.0 V, 0.5 V, 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V และ 2.5 V ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.47 พบว่าเมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกเพิ่มมากขึ้นจาก 0.0 - 2.5 V ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *E.coli* ก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมากขึ้นจะเร่งส่งผ่านประจุไฟฟ้าและเหนี่ยวนำการไหลของ e⁻ จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเกิด h⁺ ที่มีประจุเป็นบวกบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดมากขึ้น [65] ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปอาจส่งผลต่อการใช้งานของขั้วไฟฟ้าและสิ้นเปลืองพลังงานได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 2.0 V ในการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ถัดไป เพื่อถนอมขั้วไฟฟ้าไม่ให้ถูกทำลาย ช่วยยืดระยะเวลาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า และจะช่วยลดพลังงานได้



ภาพที่ 4.47 ร้อยละการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่ม โดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติโดยศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดเชื้อที่ 0.0 V, 0.5 V, 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V, และ 2.5 V

4.4.3 ผลการศึกษากลไกในการกำจัดเชื้อ *E.coli*

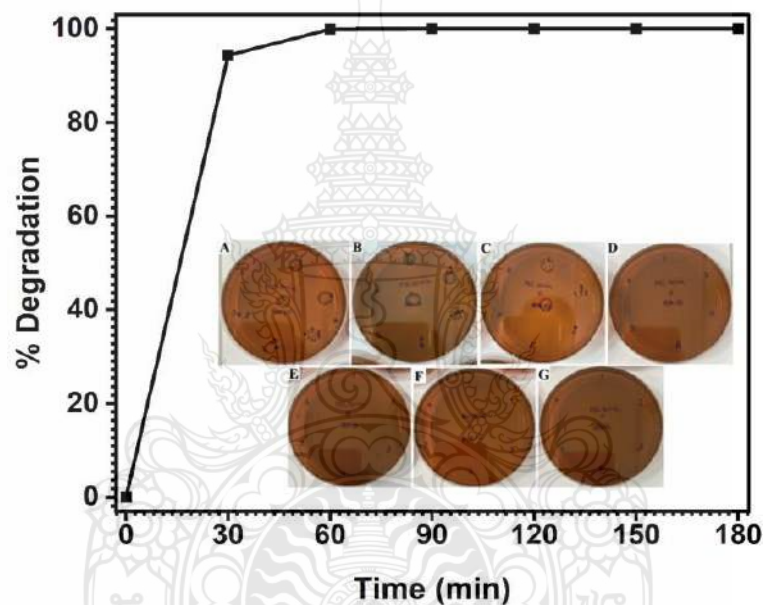
การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติในการกำจัดเชื้อ *E.coli* ได้ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า 5 กลไก ดังนี้ (1) Photoelectrocatalytic (PEC) (2) Photocatalytic (PC) (3) Electrocatalytic (EC) (4) กลไกควบคุมที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ (5) กลไกควบคุมที่ไม่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ โดยกลไกที่ 1) ถึง 4) จะใช้ 0.01 M KCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.48 พบว่ากลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ PEC มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *E.coli* ได้มากที่สุดถึง 70% ภายในระยะเวลา 60 นาที รองลงมาคือกลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ EC, PC และกลไกควบคุมที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งกำจัดได้เพียง 20%, 26% และ 17% ตามลำดับ ในขณะที่กลไกควบคุมที่ไม่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์สามารถกำจัดได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องมาจากกลไก PEC สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.48 ร้อยละการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติโดยศึกษากลไกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

4.4.4 ผลการศึกษาการใช้ PEC ในการกำจัดเชื้อ *E.coli*

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นโดยเปิดระบบ PEC เป็นเวลา 180 นาที และเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.49 และตารางที่ 4.11 พบว่าความเข้มข้นของเชื้อ *E.coli* จะลดลงตามระยะเวลาการเปิดระบบที่เพิ่มมากขึ้น โดยเริ่มต้นในระบบมีความเข้มข้นของเชื้อ *E.coli* ที่ 10⁶ CFU/ml เมื่อเปิดระบบ PEC เป็นระยะเวลา 60 นาทีพบว่าสามารถกำจัดเชื้อ *E.coli* ได้มากกว่า 99.9% ภายใต้การใช้ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 M ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบคือ 2 V เทคนิค PEC สามารถกำจัดเชื้อได้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายได้ดี



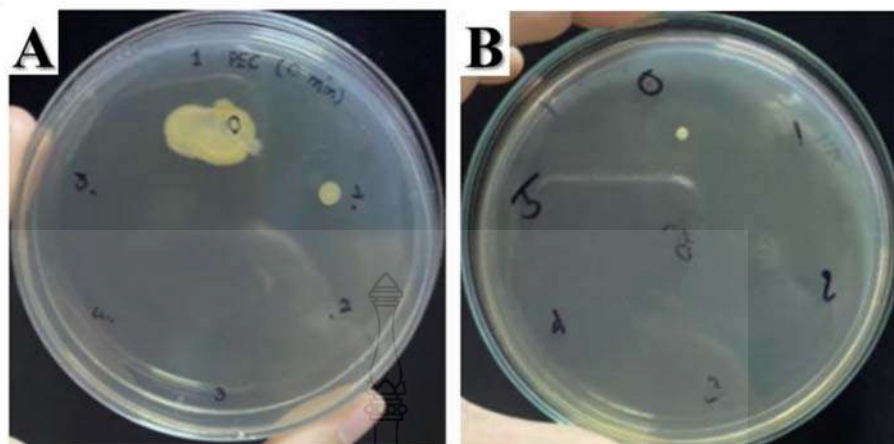
ภาพที่ 4.49 การกำจัดเชื้อ *E.coli* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10⁶ CFU/ml โดยใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ระยะเวลา (A) 0 นาที, (B) 30 นาที, (C) 60 นาที, (D) 90 นาที, (E) 120 นาที, (F) 150 นาที, และ (G) 180 นาที

ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์เชื้อ *E.coli* ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10^6 CFU/ml โดยใช้เทคนิค โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ระยะเวลา 0 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที, 150 นาที, และ 180 นาที

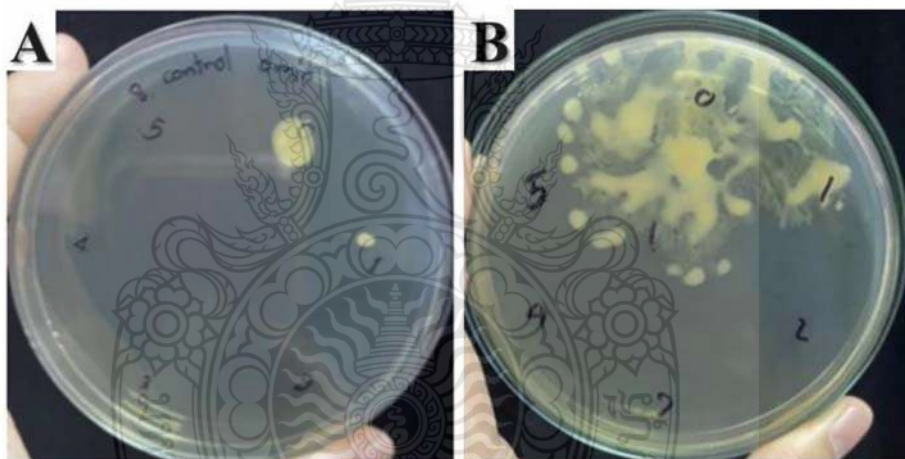
Time (min)	CFU/ml	Log CFU/ml	%Degradation
0	3.00×10^7	7.48	0.0
30	1.70×10^6	6.23	94.3
60	1.00×10^5	5	99.9
90	$<10^2$	<2	>99.9
120	$<10^2$	<2	>99.9
150	$<10^2$	<2	>99.9
180	$<10^2$	<2	>99.9

4.4.5 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อรารวม

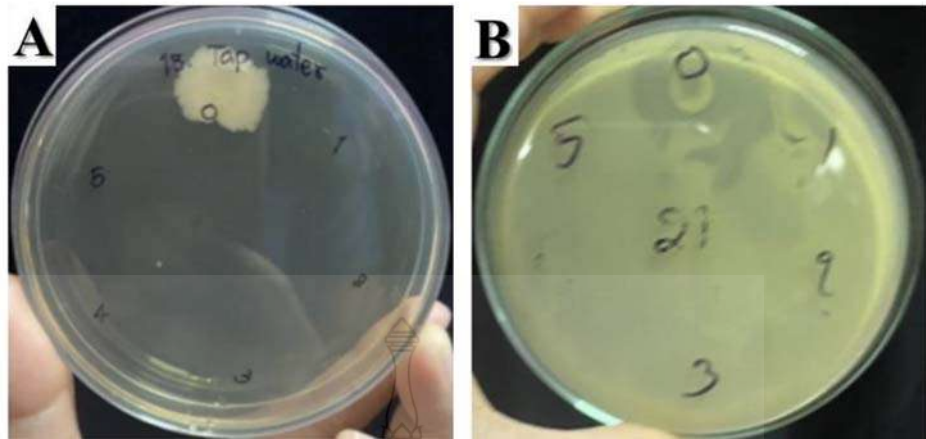
การศึกษากลไกโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ใช้แสงและศักย์ไฟฟ้าในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/ WO_3 / $BiVO_4$ ในการกำจัดเชื้อรารวมเปรียบเทียบกับกลไกควบคุมทั้งหมด 2 กลไก ประกอบไปด้วย (1) กลไกควบคุมที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ (2) กลไกควบคุมที่ไม่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ โดยจะวิเคราะห์การกำจัดเชื้อเป็นเวลา 180 นาที เก็บตัวอย่างเริ่มต้นและสุดท้ายที่ 180 นาทีไปวิเคราะห์ ใช้น้ำเสียในบ่อข้างสถาบันวิจัยเคมีเป็นตัวแทนของเชื้อราทั้งหมดที่ต้องการวิเคราะห์ โดยกลไกที่ (1) และ (2) จะใช้ 0.01 M KCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.50 และตารางที่ 4.12 พบว่ากลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ PEC มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อรารวมได้มากที่สุด ภายในระยะเวลา 180 นาที ในขณะที่กลไกควบคุมที่ใช้สารละลาย และไม่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ไม่สามารถกำจัดเชื้อรารวมได้ อีกทั้งเชื้อรารวมสามารถเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นได้อีก แสดงดังภาพที่ 4.51 และ 4.52 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกลไก PEC สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายได้ดีที่สุด เพราะเป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นผลการทดลองนี้สามารถยืนยันได้ว่าทั้งแสงและศักย์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการกำจัดเชื้อรารวม



ภาพที่ 4.50 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบ PEC ที่ระยะเวลา (A) 0 นาที และ (B) 180 นาที



ภาพที่ 4.51 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบควบคุม (add 0.01 M KCl) ที่ระยะเวลา (A) 0 นาที และ (B) 180 นาที



ภาพที่ 4.52 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบควบคุม (without KCl) ที่ระยะเวลา (A) 0 นาที และ (B) 180 นาที

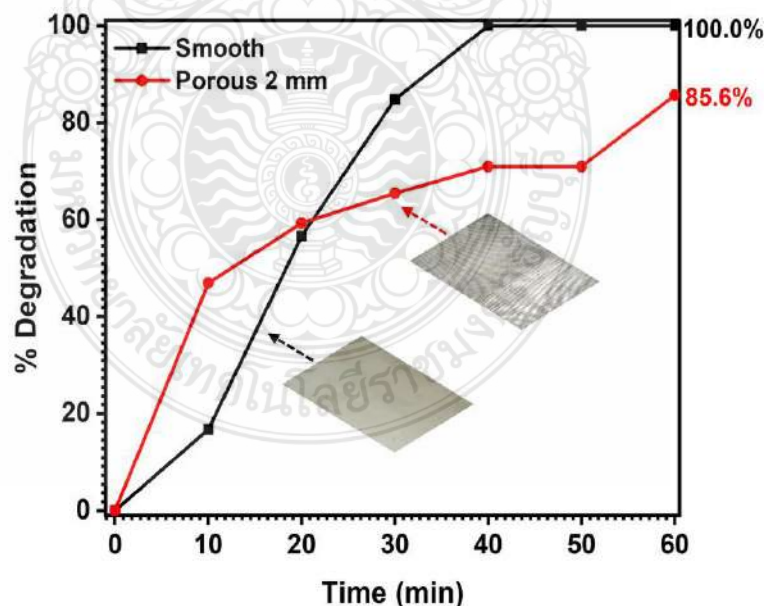
ตารางที่ 4.12 วิเคราะห์เชื้อ Total mold ร่วมกับระบบ PEC, ระบบควบคุม (add 0.01 M KCl) และ ระบบควบคุม (without KCl) ที่ระยะเวลา 0 นาที และ 180 นาที

Mechanism	Time (min)	CFU/ml	Log CFU/ml
ระบบ PEC	0	1.00×10^3	3.00
	180	1.00×10^2	2.00
ระบบควบคุม (add 0.01 M KCl)	0	1.00×10^3	3.00
	180	Spr (แผ่เป็นปื้นไม่สามารถนับได้)	-
ระบบควบคุม (without KCl)	0	1.00×10^2	2.00
	180	Spr (แผ่เป็นปื้นไม่สามารถนับได้)	-

4.5 ผลการศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเพื่อติดตั้งกับระบบไหลเวียนของน้ำในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์

4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะของขั้วไฟฟ้าสแตนเลส สตีล

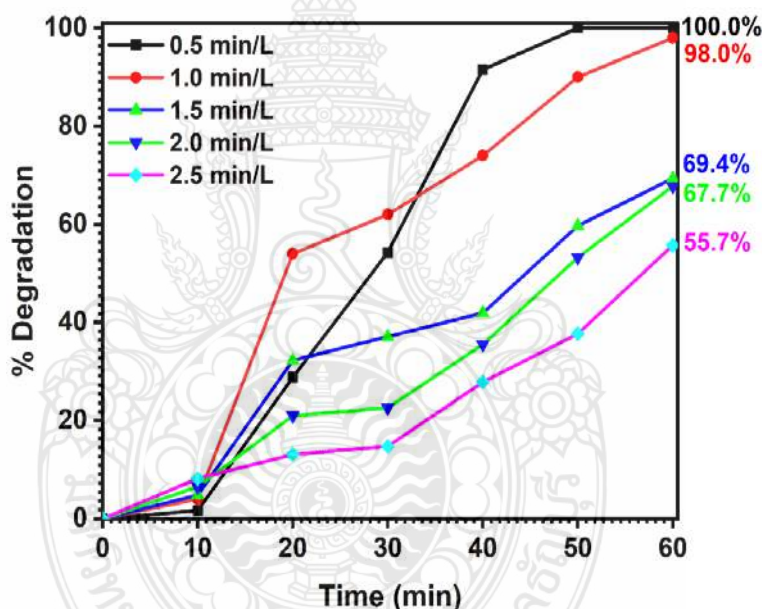
ในการศึกษาลักษณะของขั้วไฟฟ้าสแตนเลส สตีล ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.75 V ลักษณะรูของสแตนเลส สตีล ที่ศึกษาคือสแตนเลส สตีล แบบเรียบ (ไม่มีรู) และสแตนเลส สตีล แบบมีรูขนาด 2 มิลลิเมตร จากผลการทดลองในภาพที่ 4.53 แสดงให้เห็นว่าสแตนเลส สตีล แบบเรียบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเอซิด เรด มากที่สุดซึ่งสามารถกำจัดได้หมดภายในระยะเวลา 40 นาที และสแตนเลส สตีล แบบมีรูขนาด 2 มิลลิเมตร สามารถกำจัดสีย้อมได้ 85.6 % ภายในระยะเวลา 60 นาที สาเหตุที่สแตนเลส สตีล แบบเรียบสามารถกำจัดได้ดีที่สุดเนื่องมาจากทิศทางการไหลของสารละลายไหลไปทางเดียวกัน ผ่านที่ละขั้วไฟฟ้าทำให้สารละลายมีระยะเวลาในการสัมผัสผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้มากที่สุด แต่ถ้าเป็นสแตนเลส สตีล แบบมีรูแม้จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าสแตนเลส สตีล แบบเรียบ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมยังคงน้อยกว่าอาจเป็นเพราะสแตนเลส สตีล แบบมีรูสารละลายสามารถทะลุผ่านรูพรุนเข้าไปได้ ทำให้ควบคุมทิศทางการไหลได้ยาก ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจึงลดลงได้



ภาพที่ 4.53 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า $\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ศึกษาขนาดรูของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสแบบเรียบและแบบมีรูขนาด 2 มิลลิเมตร

4.5.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลาย

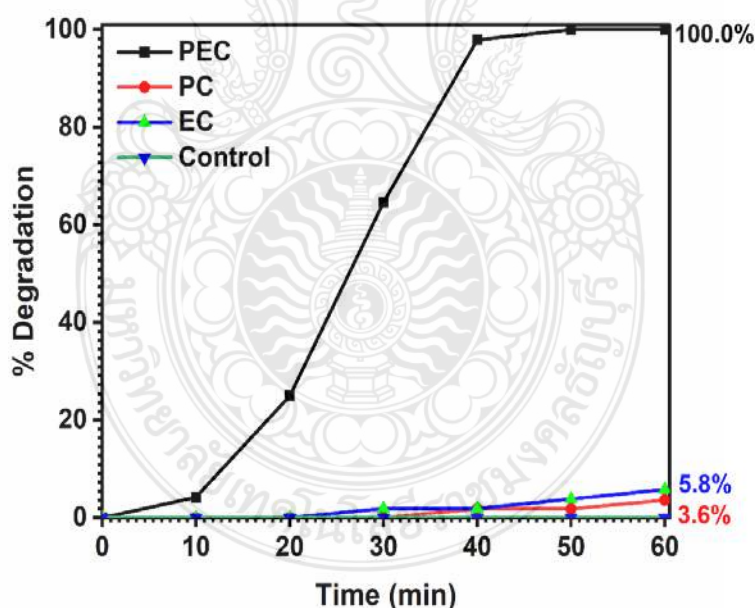
ในการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.75 V ได้ศึกษาอัตราการไหลของสารละลายในช่วง 0.5 นาที/ลิตร, 1.0 นาที/ลิตร, 1.5 นาที/ลิตร, 2.0 นาที/ลิตร และ 2.5 นาที/ลิตร ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.54 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 0.5 นาที/ลิตร ถึง 2.5 นาที/ลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด จะลดลงมีสาเหตุจากเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มมากขึ้น สารละลายก็จะไหลผ่านบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้เร็วขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยลง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็จะน้อยลงตามไปด้วย อัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดนี้คือ 0.5 นาที/ลิตร เพราะสามารถกำจัดสีย้อม เอซิด เรด ได้มากที่สุด ซึ่งกำจัดได้หมดภายในระยะเวลา 50 นาที



ภาพที่ 4.54 ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄

4.5.3 ผลการศึกษากลไกในการกำจัดสีย้อม

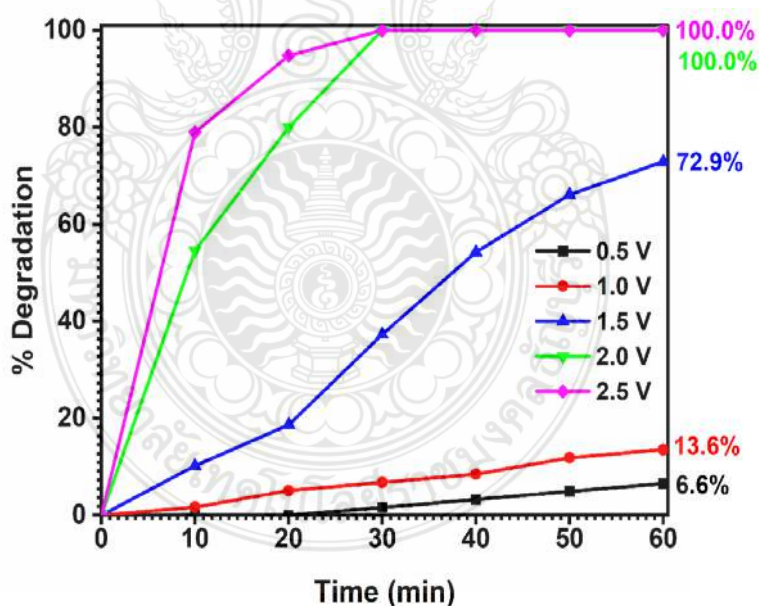
การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ได้ศึกษา 4 กลไก ดังนี้ (1) Photoelectrocatalytic (PEC) เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.75 V (2) Photocatalytic (PC) เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น (3) Electrocatalytic (EC) เป็นกลไกที่มีการเร่งปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ 1.75 V (4) เป็นกลไกควบคุมกลไกควบคุมที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ ปราศจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ โดยทั้ง 4 กลไกที่ศึกษานี้จะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KCl ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.55 พบว่ากลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ PEC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ได้มากที่สุดถึง 100% ภายในระยะเวลา 50 นาที รองลงมาคือกลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบ EC และ PC ซึ่งกำจัดได้เพียง 5.77 % และ 3.64 % ตามลำดับ ในขณะที่ Control ไม่สามารถกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ได้ภายในระยะเวลา 60 นาที ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจากกลไก PEC สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.55 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ ศึกษากลไกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม

4.5.4 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

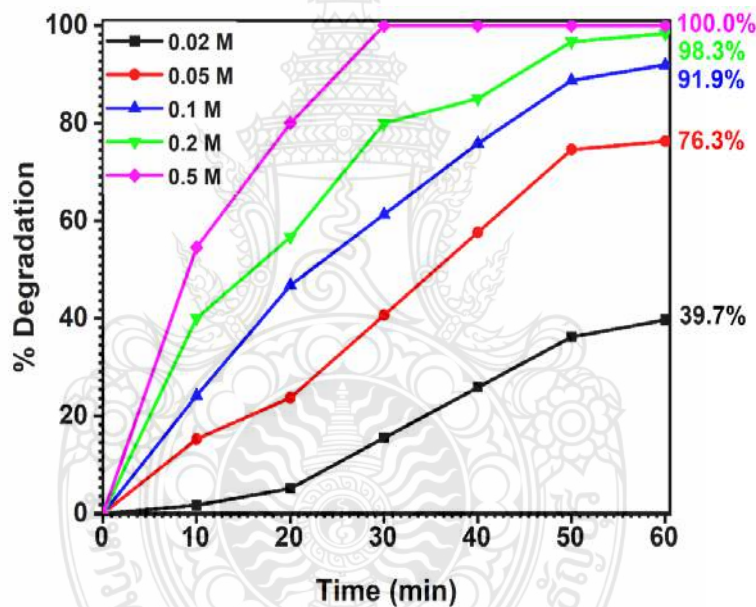
จากผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมโดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นด้วยการใช้เทคนิคโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (PEC) ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ศึกษาคือ 0.5 V, 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V และ 2.5 V ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.56 พบว่าเมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 V – 2.5 V ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมากขึ้นจะเร่งส่งผ่านประจุไฟฟ้าและเหนี่ยวนำการไหลของ e⁻ จากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเกิด h⁺ ที่มีประจุเป็นบวกบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดมากขึ้น[65] ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2.0 V และ 2.5 V พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าทั้งสองนี้สามารถกำจัดสีย้อมได้หมดในระยะเวลาเท่ากันคือ 30 นาที ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผักไฮโดรโปนิกส์คือ 2.0 V เพื่อถนอมขั้วไฟฟ้าไม่ให้ถูกทำลาย ช่วยยืดระยะเวลา อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าและจะช่วยลดพลังงานได้ เนื่องจากถ้าใช้ศักย์ไฟฟ้า 2.5 V อาจส่งผลต่อการใช้งานของขั้วไฟฟ้าและสิ้นเปลืองพลังงานได้



ภาพที่ 4.56 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ โดยศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า

4.5.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

จากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้าที่ 2 V ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ได้ศึกษาคือ 0.02 M, 0.05 M, 0.10 M, 0.20 M และ 0.50 M ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.57 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นจาก 0.02 M – 0.50 M ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด ก็มากขึ้นตามไปด้วย ที่ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่ 0.5 M สามารถกำจัดสีย้อมได้หมดภายในเวลา 30 นาที เนื่องมาจากเกิดคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) มาก ซึ่ง Cl⁻ สามารถเปลี่ยนเป็นแอกทีฟคลอรีนที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นคลอไรด์ไอออนก็จะแตกตัวมากขึ้น จึงส่งผลให้กำจัดได้มากยิ่งขึ้นเช่นกัน

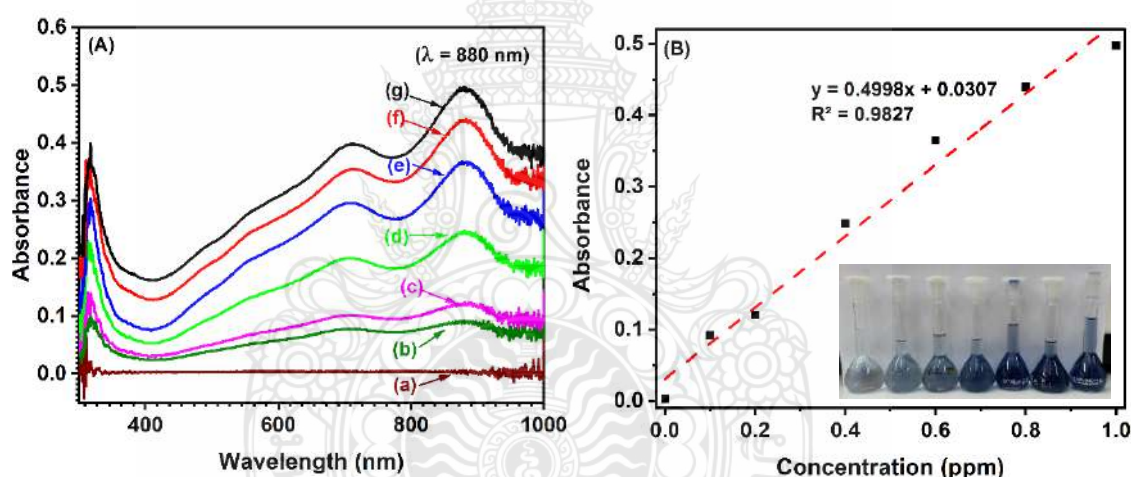


ภาพที่ 4.57 ร้อยละการกำจัดสีย้อมเอซิด เรด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มโดยใช้เครื่องจุ่มอัตโนมัติ ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี เอซิด เรด ภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า

4.5.6 ผลการศึกษาทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย

4.5.6.1 การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟต (Phosphate; PO_4^{3-})

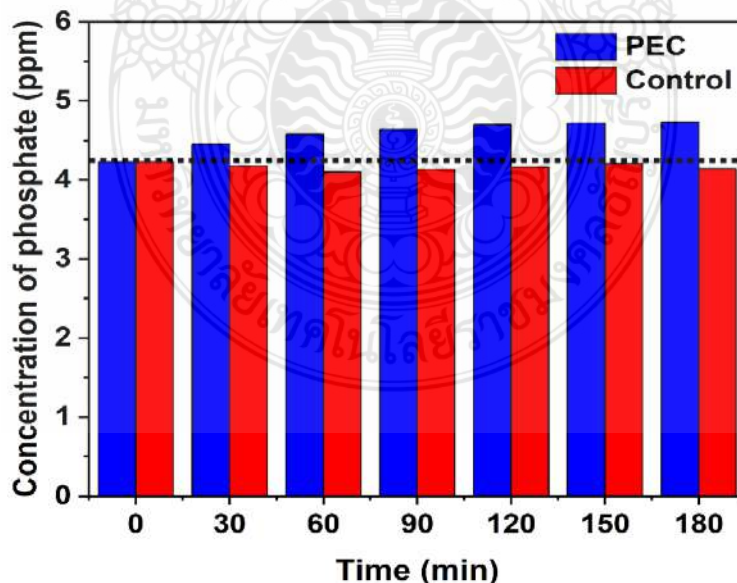
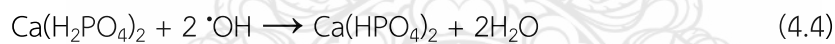
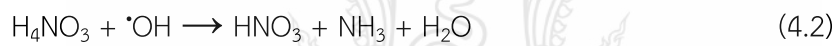
จากการศึกษาการสร้างกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mgP/L ในภาพที่ 4.58A พบว่าเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากการศึกษากราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้นดังกล่าวพบว่าให้ค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสูงสุดคือ 880 นาโนเมตร สมการเส้นตรงที่ได้คือ $y = 0.4998x + 0.0307$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.98 ดังแสดงในภาพที่ 4.58B ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้สมการเส้นตรงดังกล่าวในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสเฟตในหัวข้อที่ 4.5.6.2 สำหรับไนเตรตใช้หัวโพรบไนเตรต เพื่อวัดปริมาณไนเตรตที่แตกตัว



ภาพที่ 4.58 การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟต (Phosphate; PO_4^{3-}) (a) 0.0 mgP/L, (b) 0.1 mgP/L, (c) 0.2 mgP/L, (d) 0.4 mgP/L, (e) 0.6 mgP/L, (f) 0.8 mgP/L, และ (g) 1.0 mgP/L

4.5.6.2 ผลการศึกษาทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย

จากการทดสอบการแตกตัวของปุ๋ย โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้าที่ 2.0 V ได้ทดสอบการแตกตัวของปุ๋ยโดยใช้เซลล์ต้นแบบ PEC เปรียบเทียบกับระบบควบคุมเป็นระยะเวลา 180 นาที ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.59 และตารางที่ 4.13 พบว่าเทคนิค PEC สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยได้ โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของ NO₃⁻ และ PO₄³⁻ ที่เพิ่มขึ้นดังนี้ ก่อนเปิดระบบ PEC สามารถคำนวณความเข้มข้นของ NO₃⁻ และ PO₄³⁻ ได้เท่ากับ 110.00 mg/L และ 4.23 mgP/L ตามลำดับ แต่เมื่อเปิดระบบ PEC ทิ้งไว้เป็นเวลา 180 นาที พบว่าความเข้มข้นของ NO₃⁻ และ PO₄³⁻ เพิ่มขึ้นเป็น 127.00 mg/L และ 4.73 mgP/L ตามลำดับ ในขณะที่ระบบควบคุมมีความเข้มข้นของ NO₃⁻ และ PO₄³⁻ เท่ากับ 115.00 mg/L และ 4.13 mgP/L จากผลการทดลองทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าระบบ PEC สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของ NO₃⁻ และ PO₄³⁻ ได้เท่ากับ 15.45% และ 11.80% ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ระบบ PEC จะทำให้เกิดตัวออกซิไดซ์ เช่น อนุมูลไฮดรอกซิลที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่แรงสูง สามารถทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยไว้ จึงทำให้ปุ๋ยละลายน้ำและแตกตัวได้เพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ 4.2 – 4.4



ภาพที่ 4.59 ความเข้มข้นของฟอสเฟต (PO₄³⁻) ในเซลล์ต้นแบบ PEC และระบบควบคุมที่วัดด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี

ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นของไนเตรต (NO_3^-) และค่าการนำไฟฟ้าในเซลล์ต้นแบบ PEC และระบบควบคุม

System	Times	Nitrate (mg/L)	Conductivity (mS/cm)
PEC	Before	110.00	1.34
	After	127.00	1.50
Control	Before	110.00	1.34
	After	115.00	1.34

4.6 เปรียบเทียบการใช้งานจริงระหว่างการปลูกผักที่ใช้ระบบ PEC และระบบที่ไม่ใช้ PEC

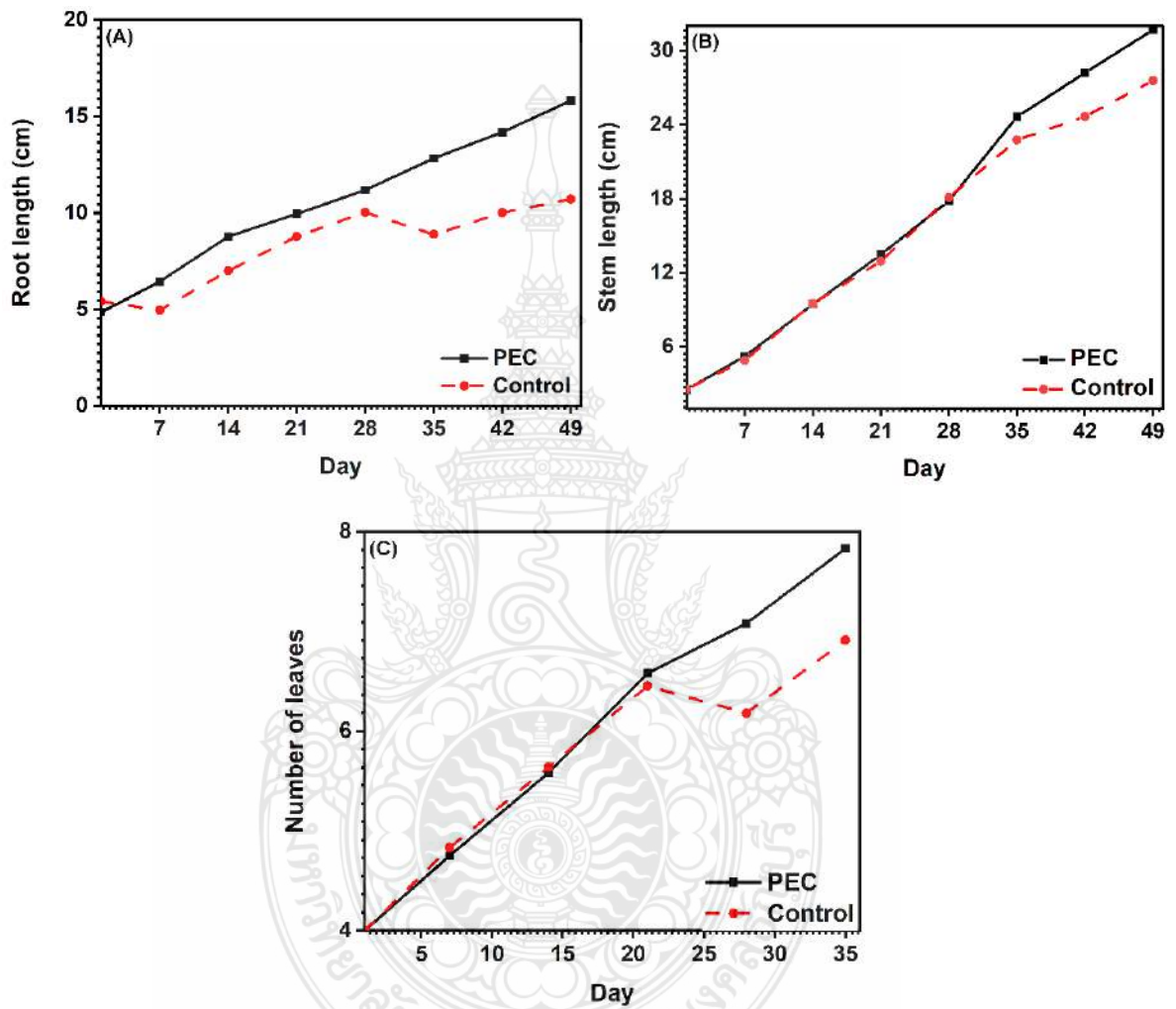
4.6.1 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของผัก

ศึกษาการใช้งานจริงโดยการปลูกพืชรูปปีคอสร่วมกับการประยุกต์ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม โดยเริ่มต้นได้เพาะเมล็ดผักรูปปีคอสในกระดาดหิซซูเปียก เมื่อเมล็ดเริ่มมีรากงอกและมีใบเลี้ยง 2 ใบ ย้ายลงฟองน้ำและนำไปไว้ในตู้ที่มีแสงแดดส่องถึง เมื่อต้นกล้ามีใบเลี้ยง 3 ใบเริ่มใส่ปุ๋ย และสุดท้ายเมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 10 วันย้ายต้นกล้าลงรางปลูก ขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 4.60



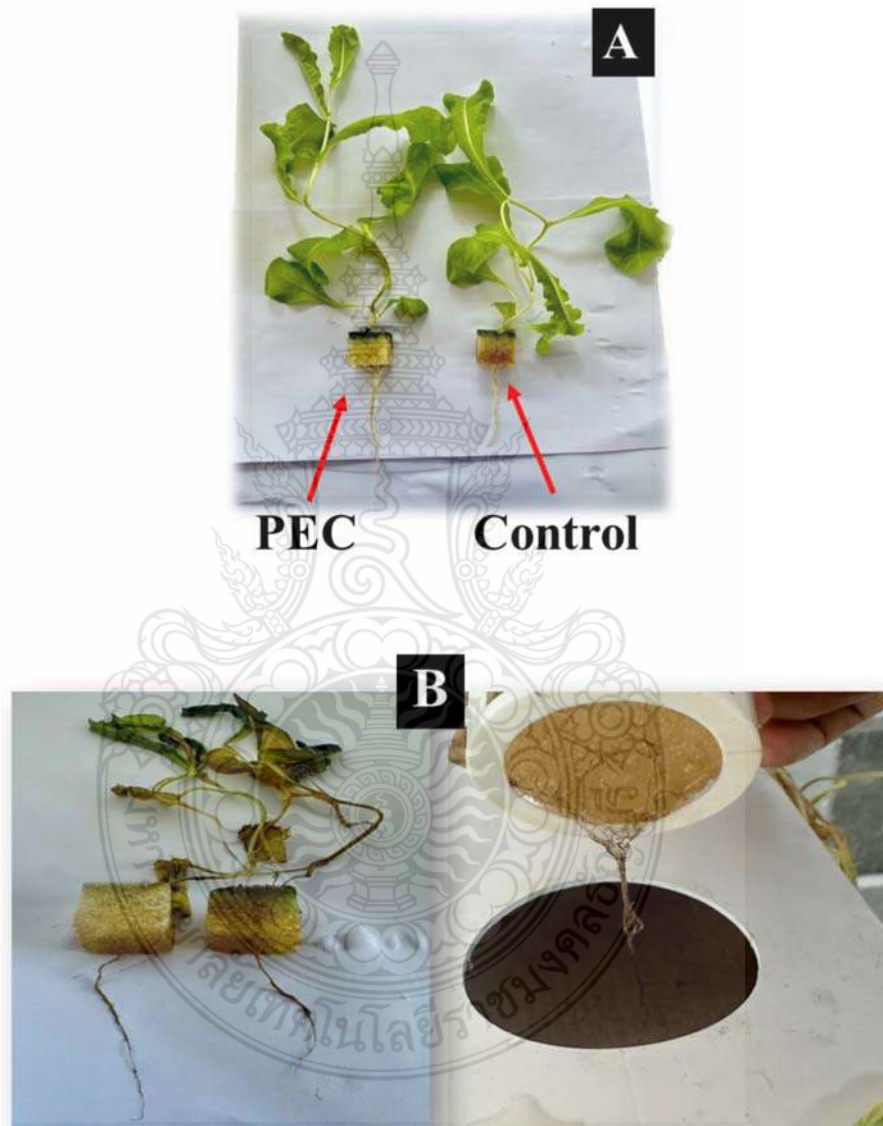
ภาพที่ 4.60 ขั้นตอนการปลูกผักรูปปีคอส

จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของผักบุ้งคอสเป็นระยะเวลา 49 วัน พบว่าเซลล์ต้นแบบ PEC ที่พัฒนาขึ้นช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการปลูกพืชแบบดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็นความสูงของราก ความสูงของลำต้น และจำนวนใบ ดังแสดงในภาพที่ 4.61



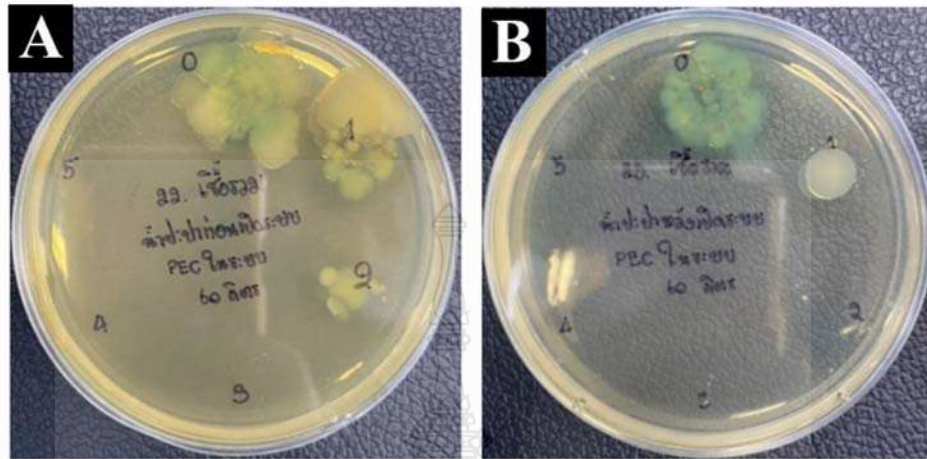
ภาพที่ 4.61 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของผักบุ้งคอสเป็นระยะเวลา 49 วัน ในระบบที่ปลูกแบบใช้เซลล์ต้นแบบ PEC เปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม (A) ความสูงของราก, (B) ความสูงของลำต้น, และ (C) จำนวนใบ

นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าสีของรากที่ไม่ได้ผ่านเซลล์ต้นแบบจะมีสีดำน้อยกว่าระบบที่ผ่านเซลล์ต้นแบบ และรากมีความยาวที่น้อยกว่าระบบที่ปลูกโดยใช้เซลล์ต้นแบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.62A และระบบที่ไม่ได้ใช้เซลล์ต้นแบบมีอัตราการตายของผักที่มากกว่าระบบ PEC ดังแสดงในภาพที่ 4.62B



ภาพที่ 4.62 (A) ลักษณะของผักบุ้งที่ปลูกพร้อมกับการประยุกต์ใช้เซลล์ต้นแบบโพโตอิลิกโทรคะตะไลติกที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม (B) ลักษณะของผักบุ้งที่ปลูกในระบบดั้งเดิม

4.6.2 ผลการควบคุมเชื้อ Total coliform ด้วยระบบ Control และระบบ PEC



ภาพที่ 4.63 วิเคราะห์เชื้อ Total coliform ร่วมกับระบบ (A) Control และ (B) PEC

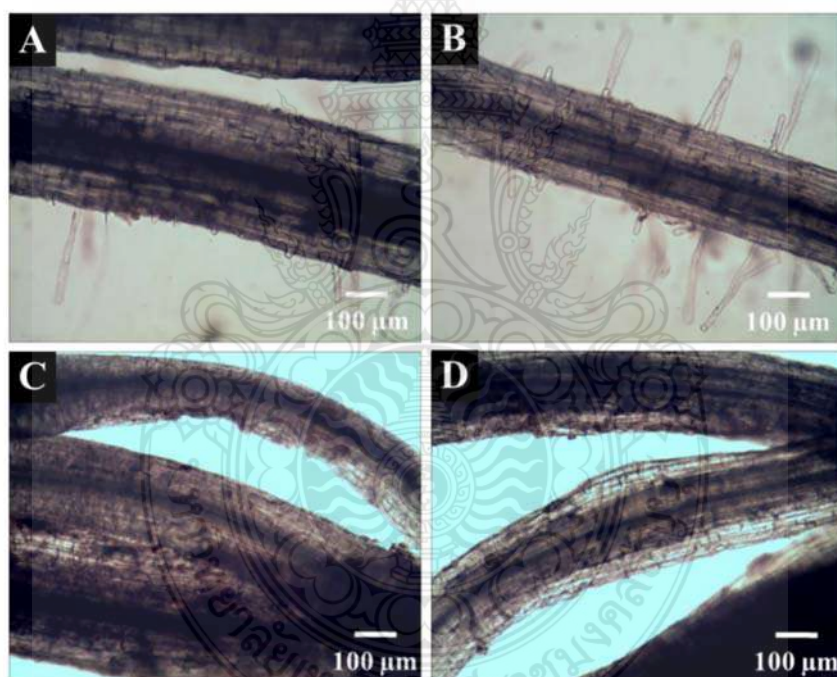
จากภาพที่ 4.63 เป็นผลการทดลองวิเคราะห์เชื้อ Total coliform โดยใช้สารละลายที่มีธาตุอาหารของพืชทั้งสองระบบคือ ระบบการปลูกพืชแบบใช้เซลล์ต้นแบบ PEC และระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC พบว่าระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC มีเชื้ออยู่ประมาณ 5.00×10^4 CFU/ml แต่ระบบการปลูกพืชแบบใช้เซลล์ต้นแบบ PEC พบว่ามีเชื้ออยู่น้อยมากประมาณ 1.00×10^3 CFU/ml คำนวณร้อยละการกำจัดเชื้อได้เท่ากับ 98% ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบการปลูกพืชแบบใช้เซลล์ต้นแบบ PEC สามารถควบคุมเชื้อ Total coliform ได้มากถึง 98% ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 วิเคราะห์เชื้อ Total coliform ร่วมกับระบบ PEC และระบบ Control ขนาด 60 ลิตร

Systems	CFU/ml	Log CFU/ml	%Degradation
Control	5.00×10^4	4.69	0
PEC	1.00×10^3	3.00	98

4.6.3 ผลการวิเคราะห์ Optical microscope (OM)

ได้วิเคราะห์ลักษณะรากของผักบุ้งคอสที่ปลูกแบบใช้ระบบ PEC และแบบที่ไม่ใช้ระบบ PEC ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope; OM) ที่กำลังขยาย 10X เพื่อต้องการยืนยันว่าอนุมูลไฮดรอกซิลและแอกทิพคลอรีนที่เกิดขึ้นในระบบ PEC มีผลต่อการทำลายรากของผักหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้ PEC ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.64 พบว่าภาพ 4.64A และ 4.64B เป็นรากของผักบุ้งคอสที่ปลูกแบบใช้ระบบ PEC จะเห็นได้ว่าลักษณะของรากไม่ได้แตกต่างจากระบบที่ไม่ใช้ PEC ในภาพที่ C และ D แกรมรากที่ใช้ระบบ PEC มีความสามารถในการเจริญเติบโตมากกว่า โดยสังเกตจากรากแขนงที่เกิดขึ้น ดังนั้นผลการวิเคราะห์นี้สามารถยืนยันได้ว่าการใช้ระบบ PEC ที่สามารถสร้างอนุมูลเรติคูลได้ อนุมูลเรติคูลที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้ส่งผลในการทำลายรากพืช แต่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการเจริญเติบโต และทำให้รากสะอาดมากกว่าเดิมอีกด้วย



ภาพที่ 4.64 ลักษณะรากของผักบุ้งคอสที่ปลูก (A และ B) แบบใช้ระบบ PEC (C และ D) แบบที่ไม่ใช้ระบบ PEC ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 10X

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้า โดยพัฒนาฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ โดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดทำงานร่วมกับขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เป็นสแตนเลส สตีล และสามารถพัฒนาออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกให้มีขนาดกะทัดรัด สะดวก และมีประสิทธิภาพสูงเหมาะสำหรับควบคุมการเกิดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกประสบความสำเร็จในการศึกษาและพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ บนกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโคปาทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย สามารถขยายขนาดสเกล ควบคุมความหนาของฟิล์มและความสม่ำเสมอของฟิล์มได้ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ คือ การนำขั้วไฟฟ้า FTO จุ่มลงในสารละลาย $0.1\text{ M } WO_3$ ด้วยอัตราเร็วในการจุ่มเท่ากับ 2 cm/s เมื่อผิวหน้ากระจกสัมผัสสารละลาย เครื่องจุ่มเคลือบจะควบคุมให้กระจกตั้งขึ้นทันทีที่อัตราเร็ว 2 cm/s แล้วตั้งขั้วไฟฟ้าไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าแห้ง จากนั้นนำมาจุ่มลงในสารละลาย $0.05\text{ M } BiVO_4$ ด้วยอัตราเร็วในการจุ่มเท่ากับ 2 cm/s โดยขั้นตอนนี้จะตั้งค่าให้ขั้วไฟฟ้าแช่ในสารละลาย $BiVO_4$ เป็นเวลา 5 วินาทีแล้วตั้งขั้วไฟฟ้าขึ้นที่อัตราเร็ว 2 cm/s จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จะได้ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และมีความสามารถในการทำซ้ำได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ สามารถคิดเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากการทำซ้ำ 7 ครั้ง ได้เท่ากับ 2.13% นอกจากนี้แล้วสามารถยืนยันได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงให้เป็นค่ากระแสได้ดีกว่าการจุ่มเคลือบแบบใช้มือถึง 2 เท่า เมื่อนำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกใน

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำ จากผลการศึกษาการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชั้นไฟฟ้าสามารถยืนยันได้ว่าการตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้ และยังสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์การรวมตัวกันของประจุระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล (Recombination) ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าพบว่าชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ มีค่าความต้านทานการถ่ายโอนประจุที่น้อย ทำให้มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี นอกจากนี้สามารถยืนยันลักษณะพื้นผิวของชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ว่ามีสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ปกคลุมจนเต็มพื้นที่ มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ช่วยให้น้ำเกาะติดกับพื้นผิวชั้นไฟฟ้าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น แล้วยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นมากกว่า 500 °C ขนาดอนุภาคที่ได้จะไม่สม่ำเสมอทั้งเล็กและใหญ่ผสมกันอยู่ มีขนาดอนุภาคสูงสุดประมาณ 1,000 นาโนเมตร อีกทั้งสามารถยืนยันโครงสร้างผลึกได้ว่าการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350-600 °C จะแสดงโครงสร้างผลึกแบบ monoclinic ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่มีคุณสมบัติที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันกลไกการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการกำจัดสารที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า โดยผ่านกระบวนการออกซิเดชันน้ำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, [•]OH) และแอกทีฟคลอรีนคือกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous, HOCl) และคลอไรต์ไอออน (⁻OCl) ซึ่งมีศักยภาพสูงมากในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ สามารถยืนยันได้ว่าชั้นไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ได้ 100% ภายในระยะเวลา 10 นาที สามารถกำจัดเชื้อ *E.coli* ได้ 99.9% ภายในระยะเวลา 60 นาที อีกทั้งชั้นไฟฟ้างดกลืนแสงยังมีสมบัติความเสถียรและความคงทนมาก โดยสามารถใช้ชั้นไฟฟ้าสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์สีตัวอย่างซ้ำได้ 91.9% มากกว่า 20 ครั้ง สามารถยืนยันได้ว่าชั้นไฟฟ้า FTO/WO₃/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและความสามารถในการเตรียมซ้ำที่ดีกว่าชั้นไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีดั้งเดิม

ส่วนที่สองประสบความสำเร็จในการพัฒนาออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับควบคุมการเกิดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโพรนิคส์ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้สีย้อม Acid red เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ จากผลการทดลองสามารถยืนยันสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกำจัดสารอินทรีย์คือเซลล์ต้นแบบ PEC ขนาด 60 ลิตร ภายในเซลล์ประกอบไปด้วยชั้นไฟฟ้า 2 ชนิด คือชั้นแอโนดเป็น

ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ที่พัฒนาขึ้น และขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ใช้เป็นสแตนเลส สตีล แบบเรียบ ใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 M อัตราการไหลของสารละลายภายในระบบ คือ 0.5 นาที่ต่อลิตร และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบคือ 2.0 V สามารถยืนยันประสิทธิภาพการกำจัด สารอินทรีย์สีย้อมโดยใช้กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและ ศักย์ไฟฟ้าได้ 100% ภายในระยะเวลา 40 นาที นอกจากนี้แล้วได้ประยุกต์ใช้เซลล์ต้นแบบ PEC กับการ ปลุกผักปืคอสเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิมสามารถยืนยันได้ว่าเซลล์ต้นแบบ PEC ที่พัฒนาขึ้นช่วย ส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นความยาวของราก ความสูงของลำต้น และจำนวนใบที่เกิดขึ้น และที่สำคัญจะเห็นได้ชัดเจนเลยว่าสีของรากที่ไม่ได้ผ่านเซลล์ต้นแบบ PEC จะมี สีดำคล้ำกว่าระบบที่เซลล์ต้นแบบ PEC นอกจากนี้สามารถยืนยันได้ว่าเซลล์ต้นแบบที่พัฒนามี ประสิทธิภาพเพิ่มการแตกตัวของปุ๋ยไนเตรต และฟอสเฟตในระบบมากขึ้น 15.45% และ 11.8% ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถควบคุมเชื้อ Total coliform และเชื้อรารวมในตัวอย่างจริงได้ 98% และ 90% ภายในระยะเวลา 180 นาที ตามลำดับ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าเซลล์ต้นแบบ PEC ที่ พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการเกิดเชื้อและการเจริญเติบโตของเชื้อโรคได้ตลอดเวลาที่มีการไหลเวียนของ น้ำในระบบ ทำให้ควบคุมเชื้อโรคต่างๆที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบดั้งเดิมที่ต้องคอย สังเกตอาการของพืชก่อนแล้วค่อยใช้สารเคมีหรือสารชีวภาพกำจัดที่หลังซึ่งอาจจะไม่ทันต่อการระบาดของ เชื้อโรคได้

จากผลการศึกษาสามารถสรุปจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือ ได้เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสาร กึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเทคนิคการ จุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติที่ได้นี้เป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก สามารถขยายขนาดสเกล ควบคุมความหนาของ ฟิล์มและความสม่ำเสมอของฟิล์มได้ นอกจากนี้ยังได้เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีขนาด กะทัดรัด สะดวก และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับควบคุมการเกิดเชื้อโรคและเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัว ของปุ๋ยในระบบน้ำสำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์ เหมาะที่จะพัฒนาต่อยอดหรือเพิ่มขนาดสเกลสำหรับใช้ เป็นระบบบำบัดน้ำในการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ หรือ การพัฒนาระบบบำบัดน้ำเพื่อการจำหน่ายเชิง พาณิชยในอนาคตได้เป็นอย่างดี

บรรณานุกรม

- [1] P. J. Mafa, R. Patala, B. B. Mamba, D. Liu, J. Gui, and A. T. Kuvarega, "Plasmonic $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{EG}$ photoanode for visible light-driven photoelectrocatalytic degradation of diuretic drug," *Chemical Engineering Journal*, vol. 393, p. 124804, 2020/08/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124804>.
- [2] Q. Kang *et al.*, "A ternary hybrid $\text{CdS}/\text{Pt}-\text{TiO}_2$ nanotube structure for photoelectrocatalytic bactericidal effects on *Escherichia Coli*," *Biomaterials*, vol. 31, no. 12, pp. 3317-3326, 2010/04/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.01.047>.
- [3] Z. U. H. Khan *et al.*, "Green synthesis of lead oxide nanoparticles for photoelectrocatalytic and antimicrobial applications," (in eng), *Front Chem*, vol. 11, p. 1175114, 2023, doi: [10.3389/fchem.2023.1175114](https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1175114).
- [4] G. Niu and J. Masabni, "Hydroponics," in *Plant Factory Basics, Applications and Advances*, 2022, pp. 153-166.
- [5] Y. S. Goh, Y. C. Hum, Y. L. Lee, K. W. Lai, W.-S. Yap, and Y. K. Tee, "A meta-analysis: Food production and vegetable crop yields of hydroponics," *Scientia Horticulturae*, vol. 321, p. 112339, 2023/11/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112339>.
- [6] R. Abbasi, P. Martinez, and R. Ahmad, "An ontology model to support the automated design of aquaponic grow beds," *Procedia CIRP*, vol. 100, pp. 55-60, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.009>.
- [7] S. A. Gillani, R. Abbasi, P. Martinez, and R. Ahmad, "Comparison of Energy-use Efficiency for Lettuce Plantation under Nutrient Film Technique and Deep-Water Culture Hydroponic Systems," *Procedia Computer Science*, vol. 217, pp. 11-19, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.197>.
- [8] C. H. Vanipriya, Maruyi, S. Malladi, and G. Gupta, "Artificial intelligence enabled plant emotion xpresser in the development hydroponics system," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5034-5040, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.512>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] C. S. McGehee, R. E. Raudales, W. H. Elmer, and R. J. McAvoy, "Efficacy of biofungicides against root rot and damping-off of microgreens caused by *Pythium spp.*," *Crop Protection*, vol. 121, pp. 96-102, 2019/07/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.12.007>.
- [10] N. Rahimdad, M. Hashemi, N. Moradi, and M. Shamsipur, "ZnO/Co-doped polyhistidine as an efficient bioelectrocatalyst for hydroxyl radical generation: Fabrication, characterization and application for microbial inactivation," *Molecular Catalysis*, vol. 547, p. 113331, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113331>.
- [11] Y. Zhao *et al.*, "Hydrated electron based photochemical processes for water treatment," *Water Research*, vol. 225, p. 119212, 2022/10/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119212>.
- [12] H. Zhang, Y. Zheng, X. C. Wang, Y. Wang, and M. Dzakpasu, "Solar irradiation-induced photochemical processing of dissolved organic matter in reclaimed water," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 46, p. 102544, 2022/04/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102544>.
- [13] A. Afzal, T. Oppenländer, J. R. Bolton, and M. G. El-Din, "Anatoxin-a degradation by Advanced Oxidation Processes: Vacuum-UV at 172 nm, photolysis using medium pressure UV and UV/H₂O₂," *Water Research*, vol. 44, no. 1, pp. 278-286, 2010/01/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.021>.
- [14] W. Zhang *et al.*, "Electrocatalytic removal of humic acid using cobalt-modified particle electrodes," *Applied Catalysis A: General*, vol. 559, pp. 75-84, 2018/06/05/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2018.04.012>.
- [15] T. Qin *et al.*, "The three-dimensional electrochemical processes for water and wastewater remediations: Mechanisms, affecting parameters, and applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 408, p. 137105, 2023/07/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137105>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] F. Chen, X. Yang, H. K. C. Mak, and D. W. T. Chan, "Photocatalytic oxidation for antimicrobial control in built environment: A brief literature overview," *Building and Environment*, vol. 45, no. 8, pp. 1747-1754, 2010/08/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.024>.
- [17] S. Hariganesh, S. Vadivel, D. Maruthamani, and S. Rangabhashiyam, "Chapter 12 - Disinfection by-products in drinking water: detection and treatment methods," in *Disinfection By-products in Drinking Water*, M. N. V. Prasad Ed.: Butterworth-Heinemann, 2020, pp. 279-304.
- [18] W. Nareejun and C. Ponchio, "Novel photoelectrocatalytic/solar cell improvement for organic dye degradation based on simple dip coating $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ photoanode electrode," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 212, p. 110556, 2020/08/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110556>.
- [19] F. Supanantin and C. Ponchio, "Improvement ITO/ WO_3 photo anode electrode fabrication using electrodeposition technique for highly efficient photoelectrocatalytic insecticide degradation," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 118, p. 105212, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105212>.
- [20] X. Xiao *et al.*, "Discussion on the reaction mechanism of the photocatalytic degradation of organic contaminants from a viewpoint of semiconductor photo-induced electrocatalysis," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 198, pp. 124-132, 2016/12/05/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.05.042>.
- [21] A. Gedamu, J. Rick, A. Dubale, w.-n. su, and B. J. Hwang, "Using hematite for photoelectrochemical water splitting: a review of current progress and challenges," *Nanoscale Horiz.*, vol. 1, pp. 243-267, 01/01 2016.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] N. Kiama and C. Ponchio, "Photoelectrocatalytic performance improvement of BiVO₄ thin film fabrication via effecting of calcination temperature strategy," *Surface and Coatings Technology*, vol. 383, p. 125257, 2020/02/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125257>.
- [23] N. Kangkun, N. Kiama, N. Saito, and C. Ponchio, "Optical properties and photoelectrocatalytic activities improvement of WO₃ thin film fabricated by fixed-potential deposition method," *Optik*, vol. 198, p. 163235, 2019/12/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163235>.
- [24] W. Srevarit *et al.*, "Photoelectrocatalytic H₂ evolution enhancement over CuO-decorated TiO₂ nanocatalysts and promoting *E. coli* degradation," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 859, p. 157818, 2021/04/05/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157818>.
- [25] P. S. Kolhe, P. Mutadak, N. Maiti, and K. M. Sonawane, "Synthesis of WO₃ nanoflakes by hydrothermal route and its gas sensing application," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 304, p. 111877, 2020/04/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111877>.
- [26] P. Chatchai, Y. Murakami, S.-y. Kishioka, A. Y. Nosaka, and Y. Nosaka, "Efficient photocatalytic activity of water oxidation over WO₃/BiVO₄ composite under visible light irradiation," *Electrochimica Acta*, vol. 54, no. 3, pp. 1147-1152, 2009/01/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.08.058>.
- [27] P. Chatchai, S.-y. Kishioka, Y. Murakami, A. Y. Nosaka, and Y. Nosaka, "Enhanced photoelectrocatalytic activity of FTO/WO₃/BiVO₄ electrode modified with gold nanoparticles for water oxidation under visible light irradiation," *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 3, pp. 592-596, 2010/01/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.09.032>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] L. Zhou, Y. Wu, L. Wang, Y. Yang, and 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*, vol. 107, p. 107480, 2019/09/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2019.107480>.
- [29] P. Alulema-Pullupaxi *et al.*, "Photoelectrocatalytic degradation of glyphosate on titanium dioxide synthesized by sol-gel/spin-coating on boron doped diamond (TiO_2/BDD) as a photoanode," *Chemosphere*, vol. 278, p. 130488, 2021/09/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130488>.
- [30] Y. M. Hunge, A. A. Yadav, M. A. Mahadik, V. L. Mathe, and 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*, vol. 85, pp. 273-281, 2018/04/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.048>.
- [31] R. D. Suryavanshi, S. V. Mohite, A. A. Bagade, and 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*, vol. 248, p. 114386, 2019/09/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114386>.
- [32] Y. M. Hunge, M. A. Mahadik, A. V. Moholkar, and C. H. Bhosale, "Photoelectrocatalytic degradation of phthalic acid using spray deposited stratified WO_3/ZnO thin films under sunlight illumination," *Applied Surface Science*, vol. 420, pp. 764-772, 2017/10/31/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.221>.
- [33] B. Grbić *et al.*, " TiO_2/WO_3 photocatalytic composite coatings prepared by spray pyrolysis," *Surface and Coatings Technology*, vol. 258, pp. 763-771, 2014/11/15/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.082>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [34] D. Xu *et al.*, "Preparation of WO_3 thin films by dip film-drawing for photoelectrochemical performance," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 5, pp. 1207-1211, 2019/05/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.026>.
- [35] P. Mane *et al.*, "Recent trends and outlooks on engineering of BiVO_4 photoanodes toward efficient photoelectrochemical water splitting and CO_2 reduction: A comprehensive review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 94, pp. 39796-39828, 2022/12/05/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.146>.
- [36] V. S. Kumbhar, H. Lee, J. Lee, and K. Lee, "Interfacial growth of the optimal BiVO_4 nanoparticles onto self-assembled WO_3 nanoplates for efficient photoelectrochemical water splitting," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 557, pp. 478-487, 2019/12/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.09.037>.
- [37] T. Xia *et al.*, "Dip-coating synthesis of P-doped BiVO_4 photoanodes with enhanced photoelectrochemical performance," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 93, pp. 582-589, 2018/12/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.09.003>.
- [38] W. Liu *et al.*, "Ultrafast fabrication of nanostructure WO_3 photoanodes by hybrid microwave annealing with enhanced photoelectrochemical and photoelectrocatalytic activities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 18, pp. 8770-8778, 2018, doi: [10.1016/j.ijhydene.2018.03.082](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.082).
- [39] S. Arunpandiyar, A. Raja, S. Bharathi, and A. Arivarasan, "Fabrication of ZnO/NiO:rGO coated Ni foam binder-free electrode via hydrothermal method for supercapacitor application," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 883, p. 160791, 2021/11/25/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160791>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [40] S. V. Mohite, V. V. Ganbavle, and K. Y. Rajpure, "Solar photoelectrocatalytic activities of rhodamine-B using sprayed WO_3 photoelectrode," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 655, pp. 106-113, 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.09.154.
- [41] R. S. Pedaneekar, S. K. Shaikh, and K. Y. Rajpure, "Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review," *Current Applied Physics*, vol. 20, no. 8, pp. 931-952, 2020, doi: 10.1016/j.cap.2020.04.006.
- [42] S.-I. Park *et al.*, "A review on fabrication processes for electrochromic devices," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 3, pp. 397-421, 10/01 2016, doi: 10.1007/s40684-016-0049-8.
- [43] V. Rodríguez-González, C. Terashima, and A. Fujishima, "Applications of photocatalytic titanium dioxide-based nanomaterials in sustainable agriculture," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 40, pp. 49-67, 2019/09/01/2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.06.001>.
- [44] K. Xiao *et al.*, "Effective photocatalytic inactivation of the plant-pathogen *Rhizobium radiobacter* by carbon-based material: Mechanism and agriculture application," *Chemical Engineering Journal*, p. 127047, 2020/09/21/2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127047>.
- [45] L. Lhomme, S. Brosillon, and D. Wolbert, "Photocatalytic degradation of pesticides in pure water and a commercial agricultural solution on TiO_2 coated media," *Chemosphere*, vol. 70, no. 3, pp. 381-386, 2008/01/01/2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.004>.
- [46] H. Amiri *et al.*, "Response surface methodology modeling to improve degradation of Chlorpyrifos in agriculture runoff using TiO_2 solar photocatalytic in a raceway pond reactor," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 147, pp. 919-925, 2018/01/01/2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.062>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [47] C. Sichel, M. de Cara, J. Tello, J. Blanco, and P. Fernández-Ibáñez, "Solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi: *Fusarium* species," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 74, no. 1, pp. 152-160, 2007/06/18/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.02.005>.
- [48] N. M. Mahmoodi, M. Arami, N. Y. Limaee, and K. Gharanjig, "Photocatalytic degradation of agricultural N-heterocyclic organic pollutants using immobilized nanoparticles of titania," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 145, no. 1, pp. 65-71, 2007/06/25/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.089>.
- [49] A. Kushniarou *et al.*, "Solar photocatalytic reclamation of agro-waste water polluted with twelve pesticides for agricultural reuse," *Chemosphere*, vol. 214, pp. 839 - 845, 2019 / 01 / 01 / 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.180>.
- [50] C. Ponchio and W. Srevarit, "Photoelectrocatalytic improvement of copper oxide thin film fabricated using anodization strategy application in nitrite degradation and promoting oxygen evolution," *Chemical Papers*, 2020/09/29 2020, doi: [10.1007/s11696-020-01369-x](https://doi.org/10.1007/s11696-020-01369-x).
- [51] P. Chatchai, A. Y. Nosaka, and Y. Nosaka, "Photoelectrocatalytic performance of $WO_3/BiVO_4$ toward the dye degradation," *Electrochimica Acta*, vol. 94, pp. 314-319, 2013/04/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.01.152>.
- [52] N. Kiama and C. Ponchio, "Photoelectrocatalytic reactor improvement towards oil-in-water emulsion degradation," *Journal of Environmental Management*, p. 111568, 2020/11/06/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111568>.
- [53] W. Srevarit *et al.*, "Photoelectrocatalytic H_2 evolution enhancement over CuO-decorated TiO_2 nanocatalysts and promoting *E. coli* degradation," *Journal of Alloys and Compounds*, p. 157818, 2020/11/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157818>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [54] R. S. Lankone, A. R. Deline, M. Barclay, and D. H. Fairbrother, "UV–Vis quantification of hydroxyl radical concentration and dose using principal component analysis," *Talanta*, vol. 218, p. 121148, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121148>.
- [55] C. Pasha and B. Narayana, "A facile spectrophotometric method for the determination of hypochlorite using rhodamine B," *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 18, pp. 167-170, 2007.
- [56] U. Prasad, J. Prakash, and A. M. Kannan, "Effects of yttrium, ytterbium with tungsten co-doping on the light absorption and charge transport properties of bismuth vanadate photoanodes to achieve superior photoelectrochemical water splitting," *Sustainable Energy & Fuels*, 10.1039/C9SE00978G vol. 4, no. 3, pp. 1496-1506, 2020, doi: 10.1039/C9SE00978G.
- [57] J. Prakash, U. Prasad, R. Alexander, J. Bahadur, K. Dasgupta, and A. N. M. Kannan, "Photoelectrochemical Solar Water Splitting: The Role of the Carbon Nanomaterials in Bismuth Vanadate Composite Photoanodes toward Efficient Charge Separation and Transport," *Langmuir*, vol. 35, no. 45, pp. 14492-14504, 2019/11/12 2019, doi: 10.1021/acs.langmuir.9b02782.
- [58] A. Larin, P. C. Womble, and V. Dobrokhotov, "Hybrid SnO₂/TiO₂ nanocomposites for selective detection of ultra-low hydrogen sulfide concentrations in complex backgrounds," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1373, 2016.
- [59] Q. Hao *et al.*, "Controllable synthesis and enhanced gas sensing properties of a single-crystalline WO₃ –rGO porous nanocomposite," *RSC Adv.*, vol. 7, pp. 14192-14199, 02/28 2017, doi: 10.1039/C6RA28379A.
- [60] D. Channei, N. Rodsawaeng, P. Jannoey, W. Khanitchaidecha, A. Nakaruk, and S. Phanichphant, "Coconut Fiber Decorated with Bismuth Vanadate for Enhanced Photocatalytic Activity," *ACS Omega*, vol. 7, 03/03 2022, doi: 10.1021/acsomega.1c07169.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [61] M. G. Lee *et al.*, "Conformally coated BiVO₄ nanodots on porosity-controlled WO₃ nanorods as highly efficient type II heterojunction photoanodes for water oxidation," *Nano Energy*, vol. 28, pp. 250-260, 2016/10/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.08.046>.
- [62] P. Mazierski, A. Białk-Bielińska, E. Siedlecka, A. Zaleska-Medynska, and A. Pieczyńska, "Role of operating parameters in photoelectrocatalytic degradation of anticancer drugs: Ifosfamide, 5-fluorouracil and imatinib using CdS/TiO₂," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 51, p. 103460, 2023/02/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103460>.
- [63] M. Luna-Trujillo, R. Palma-Goyes, J. Vazquez-Arenas, and A. Manzo-Robledo, "Formation of active chlorine species involving the higher oxide MOx⁺¹ on active Ti/RuO₂-IrO₂ anodes: A DEMS analysis," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 878, p. 114661, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114661>.
- [64] J. Zhang *et al.*, "Comprehensive study on the role of reactive oxygen species and active chlorine species on the inactivation and subcellular damage of *E.coli* in electrochemical disinfection," *Separation and Purification Technology*, vol. 304, p. 122408, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122408>.
- [65] Z. Qi, G. Li, M. Wang, C. Chen, Z. Xu, and T. An, "Photoelectrocatalytic inactivation mechanism of *E. coli* DH5 α (TET) and synergistic degradation of corresponding antibiotics in water," *Water Research*, vol. 215, p. 118240, 2022/05/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118240>.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก
การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

ภาคผนวก ก

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อ (Culture medium) คือสารหรือวัสดุที่ให้สารอาหารและสภาวะแวดล้อมที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต การขยายพันธุ์ และการบำรุงรักษาจุลินทรีย์ เป็นสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงแบบสภาวะธรรมชาติที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตหรือเซลล์ในการเจริญเติบโตและสืบพันธุ์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสารอาหารที่จำเป็น เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เกลือ วิตามิน และสารส่งเสริมการเจริญเติบโตอื่นๆ องค์ประกอบเฉพาะของอาหารเลี้ยงเชื้ออาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์หรือเซลล์ที่กำลังเพาะเลี้ยง และวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือการศึกษา

1. การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับการทดลอง

1.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็ง

- 1.) ชั่ง Powder Agar 15 กรัม และ LB Broth 20 กรัม จากนั้นนำมาละลายในน้ำกลั่นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นกวน พร้อมทั้งให้ความร้อนประมาณ 15 นาที
- 2.) นำของผสมนี้มาฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนิ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวางในตู้บ่มอุณหภูมิที่ 70-80 องศาเซลเซียสเพื่อทำให้เย็นลง
- 3.) จากนั้นนำไปเทบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีมาแล้ว (ต้องทำใน Hood ที่ปราศจากเชื้อโรคและสิ่งสกปรกต่างๆ) ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อบริให้อาหารเลี้ยงเชื้อคงตัว
- 4.) นำไปใช้งาน

1.2 การเตรียม Eosin-methylene blue agar (EMB Agar)

- 1.) ชั่ง EMB Agar ปริมาณ 37.5 กรัม จากนั้นนำมาละลายในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้ได้ 7.0 ± 0.2 ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นกวน พร้อมทั้งให้ความร้อนในไมโครเวฟ

- 2.) นำของผสมนี้มาฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวางในตู้บ่มอุณหภูมิที่ 70-80 องศาเซลเซียส เพื่อให้เย็นลง
- 3.) จากนั้นนำไปเทบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีมาแล้ว (ต้องทำใน Hood ที่ปราศจากเชื้อโรคและสิ่งสกปรกต่างๆ) ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อรอให้อาหารเลี้ยงเชื้อคงตัว แล้วนำไปใช้งาน

1.3 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato dextrose agar (PDA)

- 1.) ชั่ง PDA จากนั้นนำมาละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้ได้ 3.5- 4.0 ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นกวน พร้อมทั้งให้ความร้อนในไมโครเวฟ
- 2.) นำของผสมนี้มาฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวางในตู้บ่มอุณหภูมิที่ 70-80 องศาเซลเซียส เพื่อให้เย็นลง
- 3.) จากนั้นนำไปเทบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีมาแล้ว (ต้องทำใน Hood ที่ปราศจากเชื้อโรคและสิ่งสกปรกต่างๆ) ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อรอให้อาหารเลี้ยงเชื้อคงตัว แล้วนำไปใช้งาน

1.4 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate count agar (PCA)

- 1.) ชั่ง PCA จากนั้นนำมาละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้ได้ 7.0 ± 0.2 ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นกวน พร้อมทั้งให้ความร้อนในไมโครเวฟ
 - 2.) นำของผสมนี้มาฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวางในตู้บ่มอุณหภูมิที่ 70-80 องศาเซลเซียส เพื่อให้เย็นลง
- จากนั้นนำไปเทบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีมาแล้ว (ต้องทำใน Hood ที่ปราศจากเชื้อโรคและสิ่งสกปรกต่างๆ) ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อรอให้อาหารเลี้ยงเชื้อคงตัว แล้วนำไปใช้งาน

ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์เชื้อ



ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์เชื้อ

1. วิธีสเปรด เพลต (Spread plate)

เป็นเทคนิคการแยกเชื้อ/นับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการเจือจางสารละลายเป็นลำดับส่วน หลังจากนั้นปิเปตสารละลายที่ระดับความเจือจางที่ต้องการใส่ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ และเกลี่ยตัวอย่างสารละลายบนอาหารเลี้ยงเชื้อโดยใช้ sterile spreader รูปตัว L หลังจากนั้นนำไปพันพาราฟิล์มให้ชิดทุกด้านแล้วนำไปเพาะเชื้อในเครื่องเพาะเชื้อ (Incubator) ที่อุณหภูมิประมาณ 28-37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้น และบันทึกผลการทดลอง

2. วิธีการตروป เพลต (Drop plate)

เป็นเทคนิคการแยกเชื้อ/นับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการเจือจางสารละลายที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ หลังจากนั้นปิเปตสารละลายที่ระดับความเจือจางต่างๆ ใส่ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ โดยหยดสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นนำไปเพาะเชื้อในเครื่องเพาะเชื้อ (Incubator) ที่อุณหภูมิประมาณ 28-37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้น และบันทึกผลการทดลอง



ในระหว่างการศึกษาได้มีโอกาสเป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีนาโงกะ เมืองนาโงกะ ประเทศญี่ปุ่น เป็นเวลา 4 เดือนระหว่างวันที่ 1 ธันวาคม 2565 – 31 มีนาคม 2566 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากทาง Associate. Prof. Dr. Mashachi Hatamoto ที่ตอบรับการเป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนในครั้งนี้



เข้าร่วมการประกวดผลงานนวัตกรรมสายอุดมศึกษา ในงาน "มหกรรมวิจัยแห่งชาติ" (Thailand Research Expo 2023) ได้รับรางวัลเหรียญทองแดง จากผลงาน เรื่อง "นวัตกรรมเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์" ณ โรงแรม เซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 7-9 สิงหาคม 2566



นวัตกรรมเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์
 วิทยุทัศน์ นนดี, อธิชาธิ์ จิตนิเวศ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์
 140 หมู่ 10 ตำบลบ้านใหม่ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา 30130 โทร. 043-811266

ที่มา และความสำคัญ

สภาพของน้ำดื่มในประเทศไทย มีทั้งที่สะอาดและสกปรกปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนในน้ำดื่มจำนวนมาก การดื่มน้ำที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนอาจก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บได้ การดื่มน้ำที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนอาจก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บได้ การดื่มน้ำที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนอาจก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บได้

จุดเด่นความแปลกใหม่ ของผลงาน

เป็นนวัตกรรมที่นำเอาเทคโนโลยีของระบบไฮโดรโปนิคส์มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อน โดยนำเอาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อน

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบไฮโดรโปนิคส์สามารถบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประโยชน์ของผลงาน

- 1) สามารถบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) สามารถบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แนวทางการพัฒนาต่อยอดผลงาน

การพัฒนาต่อยอดผลงานสามารถทำได้โดยนำเอาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อนมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำดื่มที่ไม่สะอาดปนเปื้อนสารเคมีปนเปื้อน



Development of a photoelectrocatalytic method to improve the efficiency of *E. coli* removal

Kanyarat Hmud¹, Masashi Hatamoto², Somporn Moonmangnee³ and Chatchai Ponchio^{1,4}

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12120, THAILAND

²Department of Environmental Systems Engineering, Nagaoka University of Technology, Niigata 940-2188, JAPAN

³Biodiversity Research Center, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Pathum Thani 12120, THAILAND

⁴Advanced Photochemical and Electrochemical Materials Research Unit (APEM) Research Unit, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, THAILAND

Corresponding author: chatchai@rmutt.ac.th

ABSTRACT

The photoelectrocatalytic technology has attracted significant attention for effectively eliminating organic matter and microbiological pollutants in the environment, owing to its remarkable efficiency and low power consumption. The major goal of this research is to develop and determine the optimal conditions that will facilitate the photoelectrocatalytic technique's enhancement of *E. coli* eradication. The $WO_3/BiVO_4$ photoanode was fabricated on a conductive glass substrate using the automatic dip coating process, employing a layer-by-layer deposition method. Subsequently, the $WO_3/BiVO_4$ photoanode was calcinated at 550 °C for 60 minutes. The produced $WO_3/BiVO_4$ electrodes were employed as working electrodes to investigate and determine the optimal parameters for enhancing the eradication of *E. coli* process. The primary factors investigated in this study were the concentration of KCl electrolyte solution and the applied potential. These parameters were examined to identify the best circumstances that would result in the highest efficiency for the degradation of *E. coli* in a photoelectrochemical system. The study also aimed to comprehend the catalytic mechanism implicated in eliminating *E. coli* by implementing three different processes: photocatalysis, electrocatalysis, and photoelectrocatalysis. We discovered that the key factors directly influencing *E. coli* eradication effectiveness under the photoelectrocatalytic process were applied potential and electrolyte solution concentration. The optimum conditions eliminated 99.99% of *E. coli* in 150 minutes with an initial concentration of 10^9 CFU/ml, an electrolyte concentration of 0.01 M KCl, and an applied potential of 2.0V. The study confirmed photoelectrocatalytic cells' efficacy in removing microorganisms and recommended their application in a wider range of wastewater treatment systems.

Keywords: Photoelectrocatalytic cell, *E. coli* removal, $WO_3/BiVO_4$ photoanode

INTRODUCTION

Contaminated wastewater has serious consequences for human and animal health due to the presence of bacteria and microbes [1, 2]. *Escherichia coli* (*E. coli*) is one of the most prevalent antibiotic-resistant pathogens. Therefore, it is necessary to develop effluent treatment methods [3-5]. Photoelectrocatalytic (PEC) technique, an advanced electrochemical technique that catalyzes the reaction with light and applied potential, has attracted great interest in applications for microbial elimination [4, 6-9]. The development of PEC technique can be achieved by finding optimum conditions for the highest efficiency in removing target substances or improving the reaction process [10, 11]. This research aims to study factors affecting the efficiency of eliminating *E. coli* using PEC techniques. We have investigated the factors that affect the efficacy of *E. coli* degradation, including electrolyte solution

concentration, electric potential, and the catalytic mechanism at the electrode surface. We investigated and determined the optimal conditions for PEC cells to maximize the efficacy of *E. coli* elimination and confirm the mechanism responsible for the acceleration of elimination at the electrode surface. This research holds significant potential and carries implications for the advancement of novel technologies aimed at eradicating microorganisms in water and for further enhancing water treatment systems.

MATERIALS AND METHODS

FTO/WO₃/BiVO₄ electrode preparation

This study prepares the electrodes with an automatic dip coating machine, as displayed in figure 1. Fluorine-doped tin oxide (FTO) conductive glass was used as a support material for the fabrication of

semiconductor thin films by ultrasonic cleaning in various solutions for 10 minutes, as detailed as follows: solution of detergent, 3 M sodium hydroxide solution, ethanol solution, and deionized water. The FTO conductive glass was immersed in a 0.1 M WO_3 solution, dried at 150 °C for five minutes, and then calcined at 500 °C for thirty minutes. Then, using an automatic dip coater, the FTO/ WO_3 electrode was immersed in 0.05 M BiVO_4 solution. Then, they are dried at 150 °C for 5 minutes and calcined at 550 °C for 60 minutes. In the experimental setup, FTO/ WO_3 / BiVO_4 electrodes are employed as an anode electrode to further examine the effectiveness of *E. coli* eradication.

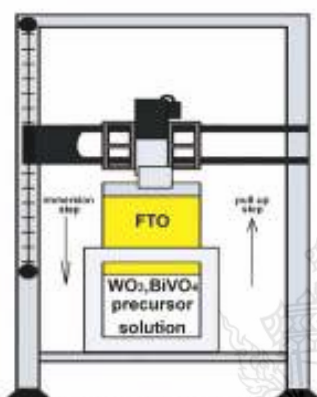


Figure 1 The schematic dip coating machine for FTO/ WO_3 / BiVO_4 electrode fabrication process.

E. coli removal efficiency study

The FTO/ WO_3 / BiVO_4 electrode was employed to investigate the effectiveness of eradicating *E. coli* by utilizing the PEC approach. The concentrations of KCl electrolyte solutions at 0, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, and 0.1 M and applied potentials of 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 V were studied to determine the optimal conditions for the highest PEC *E. coli* degradation efficiency. In addition, the catalytic mechanism for the eradication of *E. coli* was investigated using Photocatalytic (PC), Electrocatalytic (EC), Photoelectrocatalytic (PEC), and control containing approximately 10^6 CFU/ml of *E. coli*. The concentration of *E. coli* was examined utilizing the spread plate technique at different time intervals. Subsequently, the concentration and percentage degradation were determined and represented by Equation (1) [12] and Equation (2), respectively.

$$\text{CFU/ml} = \frac{\text{Total number of colonies obtain} \times \text{dilution factor}}{\text{Volume of specimen used}} \quad (1)$$

$$E. coli \text{ degradation (\%)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

where A_0 represents the quantity of *E. coli* present at the beginning of the elimination process in CFU/ml. A_t represents the quantity of remaining *E. coli* at the time in CFU/ml.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Optimization of PEC cell for *E. coli* degradation

The experimental results demonstrated a direct relationship between an increase in applied voltage within the range of 0 to 2.5 V and the subsequent enhancement in the efficiency of *E. coli* removal, as demonstrated in figure 2.

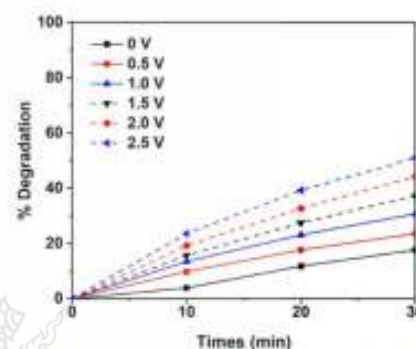


Figure 2 The effect of applied potential on *E. coli* degradation efficiency.

This phenomenon occurs due to the acceleration of charge transfer and the subsequent increase in electron flow from the anode to the cathode when the applied voltage is raised in the positive direction. Increasing the positive potential also increases the amount of positively charged (hole; h^+) at the anode, which supports a high oxidizing efficiency for the degradation of *E. coli* [13]. However, the electrode life may be compromised if the system voltage is too high.

Figure 3 illustrates the effect of varying concentrations of potassium chloride (KCl) electrolyte solution on eradicating *E. coli*. The efficacy of eradicating *E. coli* is directly proportional to the concentration of electrolytes within the range of 0 to 0.1 M. The results that were noticed through the investigation of KCl concentration. Increasing electrolyte concentration facilitates enhanced electrical conductivity and charge transfer between the electrodes, hence promoting electrode surface reactions that contribute to more effective degradation of *E. coli* [14]. Increasing the concentration of KCl can also result in the dissociation of chloride ions in the solution. The chloride ion present in the electrolyte undergoes a constant reaction with the hydroxyl radical, resulting in the formation of chlorine compounds that exhibit exceptional efficacy in eradicating *E. coli*.

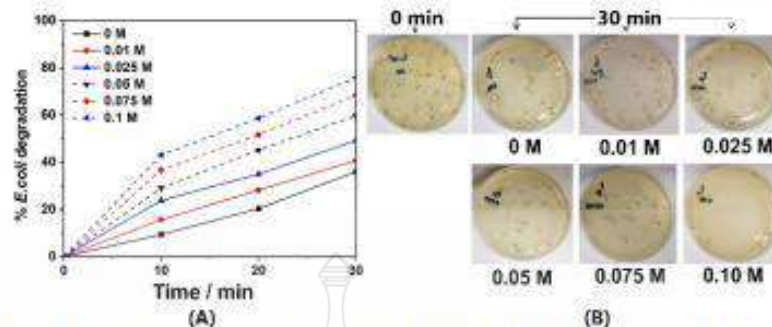


Figure 3 The effect of KCl electrolyte concentration on the efficacy of *E. coli* degradation, where (A) the percentage of *E. coli* degradation and (B) the photo of *E. coli* depending on KCl concentration and time degradation.

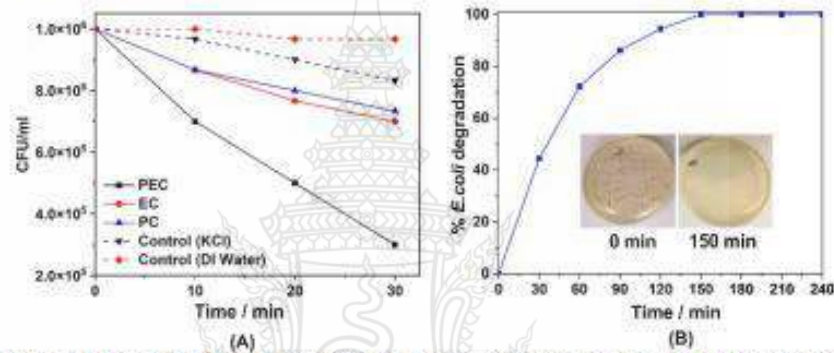


Figure 4 The catalytic mechanism in *E. coli* degradation was investigated; (A) reduction of *E. coli* in CFU/ml and (B) *E. coli* degradation efficiency under optimal conditions and inset of photographs of *E. coli* analysis.

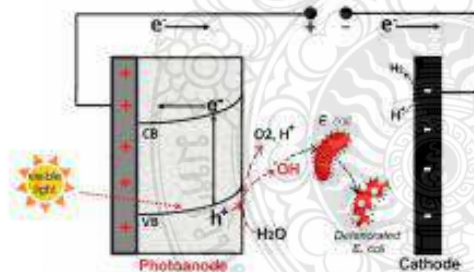


Figure 5 Diagrammatic representation of the process at the semiconductor anode surface for PEC-based removal of *E. coli*.

Catalytic mechanism and *E. coli* degradation efficiency

Figure 4 demonstrates that the PEC catalytic mechanism has the highest *E. coli* degradation efficiency of 70% within 60 minutes, followed by the EC, PC catalytic mechanism, and solution-based potassium chloride control system, which eliminated only 20%, 26%, and 17%, respectively. In contrast, controls that

do not utilise potassium chloride electrolyte solution can only remove a small amount. In addition, figure 4B demonstrated that *E. coli* at a concentration of 10^6 CFU/ml could be eliminated 100% in 150 minutes using a potassium chloride electrolyte concentration of 0.01 M and an applied potential of 2 V with the PEC technique.

Figure 5 exhibits the schematic diagram illustrating the reaction occurring at the surface of the semiconductor anode, specifically in the presence of photo-acceleration and electric potential. When the valence band (VB) layer of a semiconductor is stimulated by light within a certain range, it leads to the dissociation of electrons (e^-) from the VB to the conduction band (CB) [9, 15], while simultaneously creating a positively charged vacancy (hole; h^+) inside the VB. The VB layer has a notable propensity to facilitate water oxidation at the surface of the semiconductor electrode $WO_3/BiVO_4$, generating hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$). This generated $^{\bullet}OH$ has powerful oxidizing capabilities, efficiently oxidizing *E. coli* in aqueous solution [16]. In addition, controlling the positive potential at the anode electrode

may accelerate transport and induce e⁻ flow at the CB layer from the anode electrode to the cathode electrode to convert H⁺ to H₂ [17]. This procedure can potentially mitigate the recombination occurrence of electron-hole pairs (e⁻ and h⁺) and enhance the PEC characteristics for eliminating *E. coli*.

CONCLUSION

This research successfully applied a WO₃/BiVO₄ photoanode to eliminate *E. coli* under a photoelectrocatalytic process effectively. The electrolyte concentration and potential applied factors in the *E. coli* elimination system were investigated. We demonstrated that when the proposed PEC approach was optimized with a 0.01 M potassium chloride electrolyte solution and an applied voltage of 2 V, *E. coli* at 10⁶ CFU/mL was 100% eliminated in 150 minutes. This study generates information for developing a new alternative technique for treating wastewater contaminated with microorganisms and other organic waste.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Reinventing University Project (RMUTT) 2022, Office of the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Thailand Science Research and Innovation. Moreover, the research was also supported by The Science, Research and Innovation Promotion Funding (TSRI) (Grant no. FRB650070/0168). This research block grants was managed under Rajamangala University of Technology Thanyaburi (FRB65E0605C.2).

REFERENCES

- Oliveira R, Silva RM, Castro AR, Rodrigues LR, Pereira MA. 10 - Biological processes and the use of microorganisms in oily wastewater treatment. In: Basile A, Cassano A, Rahimpour MR, Makarem MA, editors. *Advanced Technologies in Wastewater Treatment*; Elsevier; 2023. p. 257-88.
- Techaoei S. Bacterial and fungal contamination of personal care product in Northern Thailand. *J Appl Res Sci Tech*. 2017;16(1-2):32-8.
- Maniakova G, Polo-López MI, Oller J, Abeledo-Lameiro MJ, Malato S, Rizzo L. Simultaneous disinfection and microcontaminants elimination of urban wastewater secondary effluent by solar advanced oxidation sequential treatment at pilot scale. *J Hazard Mater*. 2022;436:129134.
- Srevarit W, Moonmangmee S, Phapugrangkul P, Kuboon S, Klamchuen A, Saito N, et al. Photoelectrocatalytic H₂ evolution enhancement over CuO-decorated TiO₂ nanocatalysts and promoting *E. coli* degradation. *J Alloy Compd*. 2021;859:157818.
- Seekhaw P, Chuaboonmee R, Surayot P, Chadpan S, Thurnkul N. Evaluation of phytochemical screening, antioxidant and antimicrobial activities from ethanolic extracts of the *Flacourtia indica* (Burm.f.) Merr. fruits. *J Appl Res Sci Tech*. 2020;19(1):124-36.
- Rather RA, Lo IMC. Photoelectrochemical sewage treatment by a multifunctional g-C₃N₄/Ag/AgCl/BiVO₄ photoanode for the simultaneous degradation of emerging pollutants and hydrogen production, and the disinfection of *E. coli*. *Water Res*. 2020;168:115166.
- Dang Q, Wang L, Liu J, Wang D, Chai J, Wu M, et al. Recent progress of photoelectrocatalysis systems for wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2023;53:103609.
- Chen W, Liu S, Fu Y, Yan H, Qin L, Lai C, et al. Recent advances in photoelectrocatalysis for environmental applications: Sensing, pollutants removal and microbial inactivation. *Coord Chem Rev*. 2022;454:214341.
- Liu J, Ma N, Wu W, He Q. Recent progress on photocatalytic heterostructures with full solar spectral responses. *Chemical Engineering Journal*. 2020;393:124719.
- NareeJun W, Ponchio C. Novel photoelectrocatalytic/solar cell improvement for organic dye degradation based on simple dip coating WO₃/BiVO₄ photoanode electrode. *Sol Energ Mat Sol*. 2020;212:110556.
- Arunima SR, Deepa MJ, Nair AJ, Shibli SMA. Exploration of WO₃/BiVO₄ composite based hot-dip zinc coating to combat biocorrosion. *Materials Science and Engineering: B*. 2021;271:115302.
- Reynolds J. *Serial dilution protocols*. American Society for Microbiology: Washington, DC, USA. 2005:1-7.
- Qi Z, Li G, Wang M, Chen C, Xu Z, An T. Photoelectrocatalytic inactivation mechanism of *E. coli*/DH5α (TET) and synergistic degradation of corresponding antibiotics in water. *Water Res*. 2022;215:118240.
- He H, Sun S, Gao J, Huang B, Zhao T, Deng H, et al. Photoelectrocatalytic simultaneous removal of 17α-ethinylestradiol and *E. coli* using the anode of Ag and SnO₂-Sb 3D-loaded TiO₂ nanotube arrays. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;398:122805.
- Li G, Yang C, He Q, Liu J. Ag-based photocatalytic heterostructures: Construction and photocatalytic energy conversion application. *Journal of*

- Environmental Chemical Engineering. 2022;10(3): 107374.
16. McMichael S, Tolosana-Moranchel A, Cortes MALRM, Hamilton JWJ, Fernandez-Ibanez P, Byrne JA. An investigation of photoelectrocatalytic disinfection of water using titania nanotube photoanodes with carbon cathodes and determination of the radicals produced. Applied Catalysis B: Environmental. 2022;311:121339.
17. Thongthep P, Moonmangmee S, Ponchio C. Solar/ photoelectrocatalytic cell development for H₂ production and simultaneous organic dye degradation. Mat Sci Semicon Proc. 2021;124: 105597.



ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นางสาวกัญญารัตน์ หมด
วัน เดือน ปี เกิด 02 มิถุนายน 2541
ที่อยู่ 20/1 หมู่ 8 ตำบล ชุมพล อำเภอองค์รักษ์
จังหวัดนครนายก รหัสไปรษณีย์ 26120
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์ 062-547-6705
อีเมล kanyarat09366@gmail.com