นวัตกรรมเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับล้างผักและผลไม้ในครัวเรือน

PHOTOELECTROCATALYTIC CELL INNOVATIVE FOR VEGETABLE AND FRUIT WASHING IN HOUSEHOLDS

ทิตสุชา อุทยานิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

นวัตกรรมเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับล้างผักและผลไม้ในครัวเรือน

ทิตสุชา อุทยานิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	นวัตกรรมเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับล้างผักและผลไม้ในครัวเรือน Photoelectrocatalytic Cell Innovative for Vegetable and Fruit Washing in Households
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวทิตสุชา อุทยานิล
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.
ปีการศึกษา	2566

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ชุมพล บุษบก, Ph.D.)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อมร ไชยสัตย์, Ph.D.)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพัทธ์ จงสวัสดิ์, ปร.ด.)

วันที่ 12 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์ นวัตกรรมเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับล้างผักและผลไม้ในครัวเรือน
ชื่อ-นามสกุล นางสาวทิตสุชา อุทยานิล
สาขาวิชา เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชี่ยว, D.Eng.
ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารเคมีอันตรายและเชื้อจุลินทรีย์ที่ตกค้างในผักและผลไม้ โดยเน้นสร้างนวัตกรรมใหม่เพื่อใช้เป็นเครื่องล้างผักผลไม้ระดับครัวเรือนและส่งเสริมคุณภาพชีวิตให้กับประชาชนได้มีสุขภาพดีจากการรับประทานผักและผลไม้ที่สะอาดปลอดภัย

ส่วนแรกของงานวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ยาฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ ได้ศึกษาเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับขั้วไฟฟ้า WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ได้ศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของขั้วไฟฟ้า สมบัติการดูดกลืนแสง ความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ ยาฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายน้ำ ส่วนที่สองคือการพัฒนาและออกแบบเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อนในผักผลไม้ทั้งสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบประกอบด้วย การวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้า ระบบไหลเวียนสารละลาย ความเข้มข้นของสารอิเล็กโตรไลต์และค่าศักย์ไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีและสามารถอธิบายคุณลักษณะต่างๆ ด้วยการควบคุมปัจจัยอัตราการสแกนค่าศักย์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเราพบว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้า WO_3/$BiVO_4$ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและมีคุณลักษณะเหมาะสมสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้มากกว่าขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ได้พัฒนาเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วย

กระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกโดยใช้ขั้วไฟฟ้า $WO_3/BiVO_4$ เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและ stainless steel ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ 2.5% NaCl ปริมาตร 15 L ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 2.0 V ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ตามองเห็น และควบคุมการไหลเวียนของสารละลายด้านข้างทั้ง 4 มุม เซลล์ต้นแบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหารได้ 100% ในเวลา 6 นาที และยาฆ่าแมลงได้สูงสุด 85% ในเวลา 20 นาที ในรูปแบบสารละลายน้ำ ระบบสามารถกำจัดยาฆ่าแมลง Abamectin ในถั่วฝักยาวได้ 60% ภายในเวลา 20 นาที เซลล์ต้นแบบยังสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ Total coliform กับเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli* $1x10^3$ CFU/mL ในตัวอย่างแอปเปิ้ลได้ 100% ภายในระยะเวลา 10 นาที สามารถยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ได้พัฒนาขึ้นในการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ได้มากกว่าระบบโอโซน น้ำอิเล็กโตรไลต์ และสารเคมีอย่างมีนัยสำคัญ เซลล์ต้นแบบที่นำเสนอนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้สร้างเครื่องล้างผักและผลไม้ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดเชิงพาณิชย์เพื่อปรับปรุงคุณภาพชีวิตของผู้บริโภคต่อไป

คำสำคัญ: โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก การกำจัดสารฆ่าแมลง การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ เครื่องล้างผักผลไม้

Thesis Title	Photoelectrocatalytic Cell Innovative for Vegetable and Fruit Washing in Households
Name-Surname	Miss Titsucha Uttayanil
Program	Applied Chemistry
Thesis Advisor	Associate Professor Chatchai Ponchio, D.Eng.
Academic Year	2023

ABSTRACT

The main objective of this research is to develop a photoelectrocatalytic (PEC) prototype cell for eliminating hazardous chemicals and microbial residues in fruits and vegetables. We focus on developing new innovations for use as household-level vegetable and fruit washing machines and promoting a health-related quality of life for people by eating clean and safe fruits and vegetables.

The first part of the research studied and developed techniques for preparing semiconductor electrodes that were effective in removing organic substances, pesticides, and microorganisms. The technique using for preparing Bi_2WO_6-WO_3 electrodes on conductive glass was studied by the cyclic voltammetry technique. The performance of the developed electrodes was compared to that of WO_3/$BiVO_4$ electrodes prepared by the automatic dip-coating technique. The research explored various characteristics of the electrodes, including light absorption properties, electrochemical resistance, morphological characteristics, crystal structure, and PEC properties, to determine the effectiveness of removing organic substances, pesticides, and microorganisms in an aqueous solution. The second part was to develop and design a prototype cell for a fruit and vegetable washing machine to maximize an efficiency in the reaction for removing contaminants in fruits and vegetables, both insecticides and microorganisms. We also studied the factors affecting the performance of the prototype cells including electrode positioning, solution circulation system, electrolyte concentration, and applied potential.

This research successfully developed Bi_2WO_6-WO_3 electrode preparations using cyclic voltammetry technique and was able to elucidate their characteristics by controlling the potential scan rate factor. However, we found that the preparation of WO_3/$BiVO_4$ electrodes using the auto-dip coating technique provided more reaction efficiency and possessed suitable characteristics for use as electrodes in a fruit and vegetable washing prototype cell than Bi_2WO_6-WO_3 electrodes. A prototype cell for the fruit and vegetable washing machine was established by utilizing a PEC process and WO_3/$BiVO_4$ electrodes for the anode and stainless steel for the cathode. The research revealed that the optimum condition was to use 15 L of a 2.5% NaCl electrolyte solution with a constant applied potential of 2.0 V under visible light catalysis while controlling the flow of solution on all four sides. The prototype cell could remove 100% of organic dyes in 6 minutes and 85% of pesticides in 20 minutes in an aqueous solution. The system was able to remove 60% of the pesticide Abamectin from yard long beans within 20 minutes. The prototype cell was also able to eliminate 100% of total coliform and *E. coli* $1x10^3$ CFU/mL microorganisms in apple samples within 10 minutes. It was confirmed that the prototype cell of our PEC vegetable and fruit washing machine significantly eliminated a greater quantity of microorganisms and pesticides than the ozone system, electrolyte water, and chemicals. The proposed PEC prototype cell exhibited potential for creating the fruit and vegetable washing machine, which could be further developed for commercial purposes to improve the quality of life for consumers.

Keywords: Photoelectrocatalytic, Pesticide degradation, Removal microorganism, Fruit and vegetable washing machine

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร. ฉัตรชัย พลเชี่ยว อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ดร. ชุมพล บุษบก ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร. อมร ไชยสัตย์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำงานวิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำการวิจัย ขอขอบพระคุณ อาจารย์ คัตสึยูกิ ทาคาฮาชิ ที่ตอบรับผู้วิจัยในการเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยนที่มหาวิทยาลัย อิวาเตะ เมืองโมริโอกะ จังหวัดอิวาเตะ ประเทศญี่ปุ่น ทำให้ผู้วิจัยได้ประสบการณ์ในการทำวิจัยเพิ่มขึ้น รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และบริษัท อีเกิ้ล ดรีม จำกัด ที่สนับสนุนทุนงานวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี ทำให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจเสมอมา ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชา ความรู้ คำปรึกษา ชี้แนวทางในการทำงานวิจัยจนกระทั่งมีวันนี้และขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จตามที่คาดหวังไว้เป็นไปได้ด้วยดี

ทิตสุชา อุทยานิล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....(3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....(5)

กิตติกรรมประกาศ .....(7)

สารบัญ .....(8)

สารบัญตาราง .....(13)

สารบัญรูปภาพ .....(14)

บทที่ 1 บทนำ.....20

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....20

1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงอุตสาหกรรม.....20

1.1.2 ที่มาของการศึกษาเชิงลึก.....21

1.1.3 ผลเสียอันเกิดจากปัญหาและมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น.....22

1.2 วัตถุประสงค์.....24

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....24

1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....25

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....29

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....30

2.1 ประเภทยาฆ่าแมลง (Pesticide).....30

2.1.1 สารกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine Pesticides).....30

2.1.2 สารกลุ่มออร์กะโนฟอสเฟต (Organophosphate).....31

2.1.3 สารกลุ่มคาร์บาเมต (Carbamate).....31

2.1.4 สารกลุ่มไพรีทอยด์ (Pyrethroid).....32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 สูตรผสมของสารฆ่าแมลง....33
2.2.1 องค์ประกอบหลักของสารฆ่าแมลง....33
2.2.2 ประเภทของสูตรผสมของสารฆ่าแมลง....34
2.3 วิธีการกำจัดยาฆ่าแมลงในผักและผลไม้....36
2.3.1 ล้างผักและผลไม้ด้วยน้ำไหลผ่าน....36
2.3.2 ล้างผักและผลไม้ด้วยน้ำส้มสายชู....37
2.3.3 ล้างผักและผลไม้ด้วยผงฟู....37
2.3.4 ล้างผักและผลไม้ด้วยด่างทับทิม....37
2.3.5 ล้างผักและผลไม้ด้วยเกลือ....37
2.3.6 ล้างผักและผลไม้ด้วยอัลตราซาวด์ (Ultrasound)....37
2.3.7 ล้างผักและผลไม้ด้วยโอโซน (Ozone)....38
2.3.8 ล้างผักและผลไม้ด้วยน้ำยาล้างผัก....38
2.3.9 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)....38
2.4 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์....39
2.4.1 อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $^{\bullet}OH$)....40
2.4.2 กรดไฮโปคลอรัส (HOCl)....40
2.4.3 ไฮโปคลอไรต์ ไอออน (Hypochlorite; ClO^{-})....40
2.4.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุมูลอิสระ....41
2.5 การพัฒนาขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก....41
2.5.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง....41
2.5.2 การพัฒนาการส่งผ่านอิเล็กตรอน....44
2.5.2.1 การใช้สารกึ่งตัวนำผสม....44
2.5.2.2 การเติมโลหะ....45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 การพัฒนาลักษณะผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า 45

2.6 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ.....46

2.6.1 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process) 47

2.6.2 วิธีการตรึงแบบสปัตเตอริง (Sputtering process).....47

2.6.3 วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....48

2.6.4 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating process) 49

2.6.5 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process).....50

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 51

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....54

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี 54

3.1.1 สารเคมี.....54

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....56

3.2 การทดลอง 57

3.2.1 ขั้นตอนการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแอโนด 57

3.2.1.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า FTO รองรับ.....58

3.2.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า.....58

3.2.1.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบ 60

3.2.1.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะและประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า.....60

3.2.2 การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า 62

3.2.3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้ากับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ 62

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอธิบายผล 64

4.1 ผลของการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition 64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1 ผลการศึกษาอัตราการสแกน (Scan rate).....64

4.1.1.1 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของสารกึ่งตัวนำในการตรึงขั้วไฟฟ้า.....64

4.1.1.2 สมบัติทางโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....66

4.1.1.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานและประจุทางเคมีไฟฟ้า.....67

4.1.1.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....69

4.1.1.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา.....71

4.1.1.6 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึก.....72

4.1.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะและประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้.....74

4.1.2.1 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดกลืนแสง.....75

4.1.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า.....76

4.1.2.3 ผลการเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....78

4.1.2.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์.....79

4.2 ผลของการศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า.....80

4.3 ผลของการศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้ากับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้.....82

4.3.1 เซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 1.....82

4.3.1.1 ผลการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า.....83

4.3.1.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด.....85

4.3.1.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์.....85

4.3.1.4 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้า.....87

4.3.1.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง.....88

4.3.2 เซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักระบบที่ 2.....92

4.3.2.1 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวในการทำงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO_3/$BiVO_4$.....93

4.3.2.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์.....94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2.3 ผลการศึกษาปริมาณแสงที่เหมาะสม 96
4.3.2.4 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 97
4.3.2.5 ผลการศึกษาผลของทิศทางการไหลเวียนของสารละลายในระบบ 99
4.3.2.6 ผลการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายในระบบ 101
4.3.2.7 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและความเสถียรของขั้วไฟฟ้า 103
4.3.2.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงในผักของเครื่องล้างผักเซลล์ต้นแบบกับเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด 105
4.3.2.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ 106
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 109
บรรณานุกรม 111
ภาคผนวก ก 120
ภาคผนวก ข 123
ประวัติผู้เขียน 137

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบเทคนิคการล้างผักและผลไม้แบบดั้งเดิม (คู่แข่ง 1, 2) กับเทคนิคที่นำเสนอ (เซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก) 28
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแรงในการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระ.....41
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสภาวะการศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าและเทคนิคหรือเครื่องมือที่ใช้ศึกษา 59
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s 68
ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ.....77
ตารางที่ 4.3 ค่าการกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ของ(a)control, (b)0 L/min, (c)1 L/min, (d)2 L/min, (e)3 L/min, (f)4 L/min, (g)5 L/min, (h)6 L/min (i)7 L/min, (j)8 L/min, และ(k)9 L/min 102

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 การเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารฆ่าแมลง (Pesticides) และเชื้อจุลินทรีย์ (microorganism) ที่ผิวของผักและผลไม้ด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก 26
ภาพที่ 1.2 การออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักผลไม้ 27
ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก 39
ภาพที่ 2.2 ปริมาณแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ 42
ภาพที่ 2.3 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง 42
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ 43
ภาพที่ 2.5 การเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ (a)การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) และช่องว่าง (h^+) (b)การเร่งการส่องผ่าน e^-แบบ Z-scheme junctions 45
ภาพที่ 2.6 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process).....47
ภาพที่ 2.7 วิธีการตรึงสปัตเตอริง (Sputtering process).....48
ภาพที่ 2.8 วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating process).....49
ภาพที่ 2.9 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating process).....50
ภาพที่ 2.10 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process) 50
ภาพที่ 3.1 การตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าแบบ 59
ภาพที่ 4.1 กราฟ Cyclic voltammograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากการศึกษาผลของอัตราการสแกนที่แตกต่างกันในการตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 มีค่าเท่ากับ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s และ (f)125 mV/s 65
ภาพที่ 4.2 กราฟ Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s และ (f)125 mV/s.....66

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.3 กราฟ Nyquist plot ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s และ (f)125 mV/s.....68

ภาพที่ 4.4 แสดงภาพขั้วไฟฟ้าและ Absorption spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s, (f)125 mV/s และ (g)FTO.....69

ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s, (f)125 mV/s และ (g)FTO 70

ภาพที่ 4.6 แสดงภาพ SEM ของขั้วไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s, (f)125 mV/s และ (g)FTO.....72

ภาพที่ 4.7 ภาพ XRD patterns ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)FTO, (b)10 mV/s, (c)25 mV/s, (d)50 mV/s, (e)75 mV/s, (f)100 mV/s และ (g)125 mV/s.....74

ภาพที่ 4.8 Absorption spectra (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (c)กระจกนำไฟฟ้า FTO.....75

ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า (a) ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (c)กระจกนำไฟฟ้า FTO.....76

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟ Nyquist plot ของ (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ.....77

ภาพที่ 4.11 กราฟ Amperograms การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ 0.5 M NaCl ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V vs. Ag/AgCl เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าทำงาน (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition กับ (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ 79

ภาพที่ 4.12 (a)เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 60 นาที (b)อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 และขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ กับระยะเวลา 60 นาที.....80

ภาพที่ 4.13 การจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับการศึกษากลไกเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า 81

ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 60 นาที ของระบบ (1) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง (Photocatalysis; PC), (2) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalysis; EC), (3) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalysis; PEC), (4) สภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การเร่งด้วยแสง (Light) และ (5) สภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การไม่มีแสง (Dark).....81

ภาพที่ 4.15 เซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 1 82

ภาพที่ 4.16 รูปแบบการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบ (A) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (B) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (C) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลาย และ(D) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลาย 84

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของรูปแบบการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบ (A) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (B) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (C) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลาย และ(D) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลาย.....84

ภาพที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด.....85

ภาพที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ในช่วง 0.5 – 3.0 %.....86

ภาพที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง 1.2 – 2.4 V.....88

ภาพที่ 4.21 แสดงภาพของผลิตภัณฑ์ยาฆ่าแมลง Chlorpyrifos (30% W/V), Triazophos (40% W/V), Cypermethrin (35% W/V), Lamda-cyhalothrin (2.5% W/V) และ Fenobucarb (50% W/V) และตัวอย่างสูตรโครงสร้างทั่วไปของยาฆ่าแมลง 89

ภาพที่ 4.22 การศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte และ(d) Ozone 2 90

ภาพที่ 4.23 แสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบการกำจัดยาฆ่าแมลง Chlorpyrifos, Triazophos, Cypermethrin, Lambda-cyhalothrin, และFenobucarb.....91

ภาพที่ 4.24 ภาพแสดงเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 2.....92

ภาพที่ 4.25 แสดงภาพการทดลองและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที (a)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 1 ขั้ว, (b)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 2 ขั้ว, (c)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 3 ขั้ว, และ(d)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 4 ขั้ว.....94

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที (a) ความเข้มข้น 1 ppm, (b)ความเข้มข้น 3 ppm, (c)ความเข้มข้น 5 ppm, (d)ความเข้มข้น 7 ppm, และ(e)ความเข้มข้น 9 ppm 95

ภาพที่ 4.27 (A)เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่ค่าความเข้มของแสงที่แตกต่างกันคือ (a)ปริมาณ 0%, (b)ปริมาณ 25%, (c)ปริมาณ 50%, (d)ปริมาณ 75%, และ(e) ปริมาณ 100% (B)ภาพการจัดอุปกรณ์สำหรับศึกษาความเข้มของแสงจากต้นกำเนิดแสงในระบบ PEC 97

ภาพที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ที่แตกต่างกันคือ (a)0.5% NaCl, (b)1.0% NaCl, (c)1.5% NaCl, (d)2.0% NaCl, (e)2.5% NaCl, และ (f)3.0% NaCl.....98

ภาพที่ 4.29 แสดงรูปแบบทิศทางการไหลของสารละลายในระบบเครื่องล้างผักและผลไม้ (a)แบบ A, (b)แบบ B, (c)แบบ C, (d)แบบ D, และ(e)แบบ E..... 100

ภาพที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่ความแตกต่างกันของระบบการทำให้เกิดน้ำไหลวน คือ (a)แบบ A, (b)แบบ B, (c)แบบ C, (d)แบบ D, และ (e)แบบ E 100

ภาพที่ 4.31 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่สภาวะอัตราการไหลที่แตกต่างกันคือ (a)control, (b)0 L/min, (c)1 L/min, (d)2 L/min, (e)3 L/min, (f)4 L/min, (g)5 L/min, (h)6 L/min (i)7 L/min, (j)8 L/min, และ(k)9 L/min 102

ภาพที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่สภาวะค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังนี้ (a)1 V, (b)2 V, (c)2.5 V, (d)3 V, (e)4 V, และ(f)5 V 104

ภาพที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์ค่าความเสถียรของขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการกำจัดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง. 104

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.34 แสดงภาพการทดลองของการล้างผักถั่วฝักยาว (a) control, (b)การแช่ด้วย NaCl, (c)การล้างด้วยเครื่องล้างผักโอโซน (Ozone) และ(d)เครื่องล้างผักด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (PEC) 106

ภาพที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินในถั่วฝักยาวที่เวลา 20 นาทีเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ คือ NaCl, Ozone, และระบบ PEC 106

ภาพที่ 4.36 แสดงภาพการทดลองการกำจัดเชื้อจุลลินทรีย์ *E. coli* 107

ภาพที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ Total coliform ด้วยการล้างด้วยน้ำเปล่า(Control), การแช่น้ำเกลือ(NaCl), การแช่ผงฟู($NaHCO_3$), การแช่ด้วยด่างทับทิม($KMnO_4$), การล้างด้วยระบบโอโซน(Ozone), และการใช้ระบบ PEC ในระยะเวลา 10 นาที 107

ภาพที่ 4.38 เปอร์เซ็นต์การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli* ด้วยการล้างด้วยน้ำเปล่า(Control), การแช่น้ำเกลือ(NaCl), การแช่ผงฟู($NaHCO_3$), การแช่ด้วยด่างทับทิม($KMnO_4$), การล้างด้วยระบบโอโซน(Ozone), และการใช้ระบบ PEC ในระยะเวลา 10 นาที 108

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงอุตสาหกรรม

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมให้ความสนใจกับการพัฒนานวัตกรรมหรือเครื่องมือเกี่ยวกับการดูแลสุขภาพและการจัดการอาหารให้สะอาดปลอดภัยจากการปนเปื้อนจากสารต่างๆ ที่ก่อให้เกิดโรค เพื่อตอบโจทย์ปัญหาตามความต้องการของคนในสังคมในการลดความเสี่ยงจากการรับประทานอาหารหรือการได้รับโดยตรงจากสิ่งแวดล้อม หนึ่งในความเสี่ยงดังกล่าวคือผักและผลไม้ที่คนไทยบริโภคเข้าไปล้วนเต็มไปด้วยอันตรายจากสารเคมีพวกยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายมีทั้งที่แสดงอาการแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง แม้แต่ผักผลไม้ที่ระบุไว้ข้างถุงว่าปลอดสารพิษแล้วก็ตามก็ยังพบว่ามีสารเคมีอันตรายต่างๆ รวมถึงยังมีเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคต่างๆ ได้ ถึงแม้จะมีหลากหลายวิธีการในการเตรียมผักผลไม้เพื่อลดการปนเปื้อนดังกล่าวทั้งการล้างหรือแช่น้ำนานๆ หรือการใช้สารเคมี เช่น น้ำเกลือ ด่างทับทิม น้ำส้มสายชู หรือการใช้ระบบโอโซน ก็ล้วนแล้วแต่เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายและมีขั้นตอนและใช้ระยะเวลาในการทำนานเกินไป รวมถึงระบบดังกล่าวยังไม่สามารถกำจัดสารเคมีอันตรายที่ตกค้างที่ผักและผลไม้ได้อย่างประสิทธิภาพมากพอที่จะสามารถยืนยันได้ถึงความปลอดภัยของผักผลไม้ดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ศึกษาและพัฒนาเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้หลักการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ ในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความร่วมมือกับ บริษัท อีเกิ้ล ดรีม จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทที่ให้การสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรมจากนักวิจัยคนไทยเพื่อตอบโจทย์ปัญหาสังคมทั้งด้านการบริหารจัดการน้ำ การจัดการขยะ และมีความสนใจในการพัฒนานวัตกรรมด้านอาหารปลอดภัย โดยมีแนวคิดในการพัฒนาต่อยอดเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก สำหรับผลิตเครื่องล้างผักผลไม้สำหรับกำจัดสารปนเปื้อนในผักผลไม้เพื่อใช้ในครัวเรือน ซึ่งมุ่งเน้นทั้งด้านการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องและออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อการผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ภายใต้การศึกษาวิจัยร่วมกันของทีมวิศวกรของบริษัท อีเกิ้ล ดรีม จำกัด และนักวิจัยในการพัฒนาต้นแบบ

เครื่องล้างผักผลไม้สำหรับใช้ระดับสเกลครัวเรือน ซึ่งได้ศึกษาวิจัยและพัฒนาตั้งแต่การเพิ่มประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้า สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อนในผักผลไม้ การออกแบบเซลล์ต้นแบบทั้งระบบวงจรไฟฟ้า การออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวก กะทัดรัด และสวยงามน่าใช้ โดยทีมผู้วิจัยและบริษัท อีเกิ้ล ดรีม จำกัด มีความมั่นใจเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถสร้างนวัตกรรมใหม่ในการผลิตเครื่องล้างผักผลไม้ เพื่อให้เข้าถึงผู้บริโภคระดับครัวเรือนให้สามารถรับประทานผักผลไม้ที่ปลอดภัยอย่างแท้จริงและจะเป็นการสร้างรายได้ให้สถานประกอบการจากการผลิตเครื่องล้างผักจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้เป็นอย่างดี

1.1.2 ที่มาของการศึกษาเชิงลึก

โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกเป็นเทคนิคเชิงเคมีไฟฟ้าขั้นสูงที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม ได้รับการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานต่ำกระบวนการไม่ยุ่งยากและยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวยังต้องมีการพัฒนาในระดับสเกลที่สามารถใช้งานได้จริง โดยมีหลักในการพัฒนาสองส่วน คือ 1. การพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มสารกึ่งตัวนำบนวัสดุรองรับที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าให้มีความสามารถในการขยายสเกลได้ง่าย ยังคงมีประสิทธิภาพและความเสถียรสูง เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในระดับสเกลขนาดใหญ่และสามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน และ 2. การพัฒนาการออกแบบเซลล์ต้นแบบให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยามีความกะทัดรัดและสะดวกในการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มสารกึ่งตัวนำที่มีความง่าย สะดวก สามารถขยายสเกลได้ดี และที่สำคัญคือให้มีศักยภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและการควบคุมศักย์ไฟฟ้า เพื่อการกำจัดสารปนเปื้อนที่ผิวของผักและผลไม้ โดยได้ศึกษาและพัฒนาทั้งการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมและเทคนิคการตรึงด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเทคนิคการจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ซึ่งเน้นที่ความสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ทั้งสมบัติการเกิดปฏิกิริยากับสารเป้าหมายและความสม่ำเสมอของคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้ ซึ่งคณะผู้วิจัยมีเครือข่ายความร่วมมือกับ ห้องปฏิบัติการ Iwate University Pulsed Power Plasma Laboratory ที่ Iwate University ประเทศญี่ปุ่น โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคือ รองศาสตราจารย์ Takahashi Katsuyuki ซึ่งมีความเชี่ยวชาญทางด้านเทคโนโลยีพัลส์พาวเวอร์ที่สามารถสร้างพลังงานขนาดใหญ่และไฟฟ้าแรงสูงได้ โดยเก็บพลังงานขนาดเล็กและปล่อยในลำดับนาโนวินาที และใช้พลาสมา

ในด้านการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำเสียทางการเกษตรมลพิษในแม่น้ำที่เกิดจากวัสดุที่ถูกทิ้ง รวมถึงการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์อีกด้วย ซึ่งมีประสิทธิภาพย่อยสลายสารมลพิษรวมถึงสารตกค้างในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่ใช้สารเคมี สามารถส่งเสริมและพัฒนาร่วมกับงานวิจัยของเราในการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อการประยุกต์ใช้ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยห้องปฏิบัติการดังกล่าวมีความร่วมมือกับห้องปฏิบัติการของคณะผู้วิจัยในการส่งนักศึกษาเพื่อไปฝึกประสบการณ์ในด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่ และที่สำคัญสามารถใช้เครื่องมือชั้นสูงดังกล่าวในการศึกษาวิจัยร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการพัฒนางานวิจัยของโครงการวิจัยดังกล่าวนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาจากความร่วมมือดังกล่าวซึ่งทำให้งานวิจัยสามารถพัฒนาได้อย่างสมบูรณ์และสามารถนำเทคโนโลยีที่ได้จากการแลกเปลี่ยนมาประยุกต์ใช้กับการทำงานวิจัยในประเทศไทยได้เป็นอย่างดีต่อไป และที่สำคัญคือการพัฒนาและออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกให้ประสิทธิภาพสูงให้มีความสะดวกในกระบวนการทำงาน เพื่อการประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักผลไม้ โดยผู้วิจัยมีเครือข่ายความร่วมมือกับบริษัท อีเกิ้ล ดรีม จำกัด ที่มีความเชี่ยวชาญด้านการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมที่มีขนาดใหญ่เพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ โดยผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากทีมงานดังกล่าวในการช่วยสนับสนุนทีมวิศวกรด้านการออกแบบเพื่อช่วยออกแบบระบบให้กับผู้วิจัย เพื่อพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกให้มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักผลไม้ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยดังกล่าวนี้จะสามารถตอบโจทย์ให้กับสถานประกอบการ และภาคอุตสาหกรรมในการผลิตเครื่องล้างผักผลไม้เพื่อใช้ในครัวเรือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถตอบโจทย์ของ บริษัท อีเกิ้ล ดรีม จำกัด เพื่อการพัฒนานวัตกรรมด้วยเทคโนโลยีใหม่เพื่อผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งเมื่องานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จะสามารถผลิตนวัตกรรมที่เป็นทางเลือกใหม่ให้กับประชาชนในราคาที่ทุกครัวเรือนสามารถเข้าถึงได้ และยังคาดหวังว่าจะสามารถผลิตเพื่อการส่งออกเพื่อจำหน่ายต่างประเทศเป็นการสร้างรายได้ให้กับประเทศไทยจากเทคโนโลยีดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

1.1.3 ผลเสียอันเกิดจากปัญหาและมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น

สารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักผลไม้ ถือเป็นภัยเงียบที่แฝงตัวอยู่ผักและผลไม้โดยที่เรารับประทาน และสะสมเข้าสู่ร่างกายเข้าไปทุกวันโดยไม่รู้ตัว หากไม่ได้ผ่านกระบวนการล้างที่มีประสิทธิภาพจะเกิดสารพิษตกค้างตามผักผลไม้รวมถึงเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคต่างๆเข้าสู่ร่างกายซึ่งมีผลต่อสุขภาพรวมถึงการตกค้างบางส่วนในน้ำที่ใช้ในการล้าง เมื่อมีการชะล้างและปล่อยลงสู่

แหล่งน้ำสาธารณะจะเกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ และจะส่งผลกระทบอย่างรุนแรงที่ไม่สามารถประมาณค่าความเสียหายได้ การใช้กระบวนการล้างแบบดั้งเดิมยังมีปัญหาเรื่องการตกค้างของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการล้าง ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพไม่ใช้สารเคมีอันตรายและต้นทุนต่ำ จะสามารถช่วยกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนของการล้างผักผลไม้ได้เป็นอย่างดี ที่สำคัญคือเมื่อพัฒนานวัตกรรมสำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักผลไม้ได้สำเร็จ จะสามารถผลิตเครื่องล้างผักและผลไม้เพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะสามารถสร้างรายได้ให้กับสถานประกอบการ และยังสามารถผลิตเพื่อส่งออกจำหน่ายต่างประเทศได้อีก จะเป็นการลดการนำเข้าและเพิ่มการส่งออกได้เป็นอย่างดี ที่สำคัญคือเป็นทางเลือกที่ดีให้กับประชาชนที่ใส่ใจดูแลการรับประทานผักผลไม้ปลอดสารปนเปื้อนอันตราย ซึ่งจะสร้างเสริมสุขภาพและอนามัยให้กับประชาชนให้มีความแข็งแรงต่อสู้กับโรคภัยต่างๆ ที่มีอยู่มากมายในปัจจุบัน ซึ่งนับเป็นมูลค่าที่ไม่สามารถประเมินเป็นตัวเงินได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้ถือได้ว่ามีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนานวัตกรรมเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนให้มีความปลอดภัยในการรับประทานผักและผลไม้ที่ปลอดสารปนเปื้อนที่เป็นอันตราย โดยเน้นที่ทุกครัวเรือนสามารถเข้าถึงนวัตกรรมดังกล่าวได้อย่างเท่าเทียมกัน สำหรับด้านการพัฒนาบุคคลากรด้านงานวิจัย งานวิจัยนี้สามารถผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโทที่มีศักยภาพด้านการวิจัยวัสดุศาสตร์ที่สามารถพัฒนานวัตกรรมใหม่เพื่อตอบโจทย์สังคมและภาคอุตสาหกรรมได้ รวมถึงการพัฒนาศักยภาพอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการในการพัฒนางานวิจัยร่วมกับภาคอุตสาหกรรมและผลักดันงานวิจัยให้สามารถนำไปใช้จริงในการผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป และที่สำคัญคือการตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัทผู้ร่วมสนับสนุนและร่วมออกแบบพัฒนางานวิจัยดังกล่าวนี้จะสามารถส่งเสริมให้บริษัทสามารถพัฒนานวัตกรรมเพื่อการผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์ต่อไป ซึ่งจะสามารถสร้างรายได้ให้กับสถานประกอบการและประเทศต่อไปได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ สารฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆ และกลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้น

1.2.3 เพื่อพัฒนานวัตกรรมต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับล้างผักผลไม้ ให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารปนเปื้อนเพื่อประยุกต์ใช้ในระดับครัวเรือน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

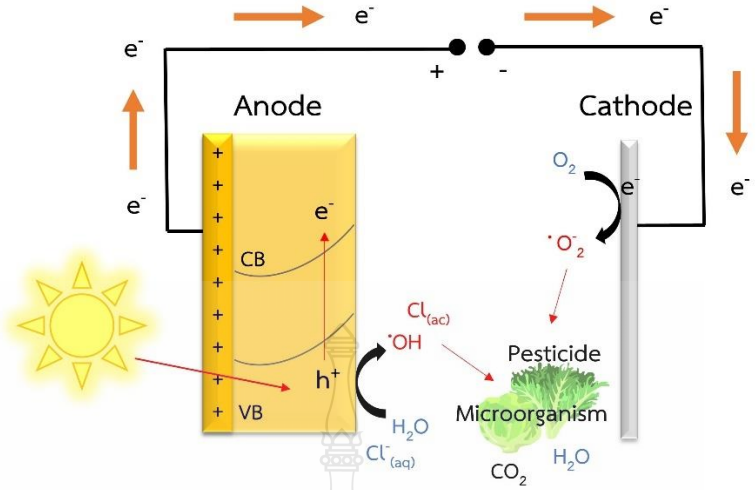
1.3.1 ศึกษาและพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าจากสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด ทั้งชนิดของสารกึ่งตัวนำ และเทคนิคการตรึงแบบเคมีไฟฟ้าและการจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine) และศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างเช่น การดูดกลืนแสง โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงเคมีไฟฟ้า และสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

1.3.2 ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทั้งการเร่งด้วยแสง การเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า และการเร่งทั้งศักย์ไฟฟ้าและแสง เพื่อใช้ในการทำนายการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์สารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนต่อไป

1.3.3 ศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นกับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก เพื่อการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักผลไม้ ทั้งการจัดวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า แหล่งกำเนิดแสง การไหลเวียนของสารละลาย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ให้มากที่สุด เพื่อให้เหมาะสมกับการศึกษาการผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์

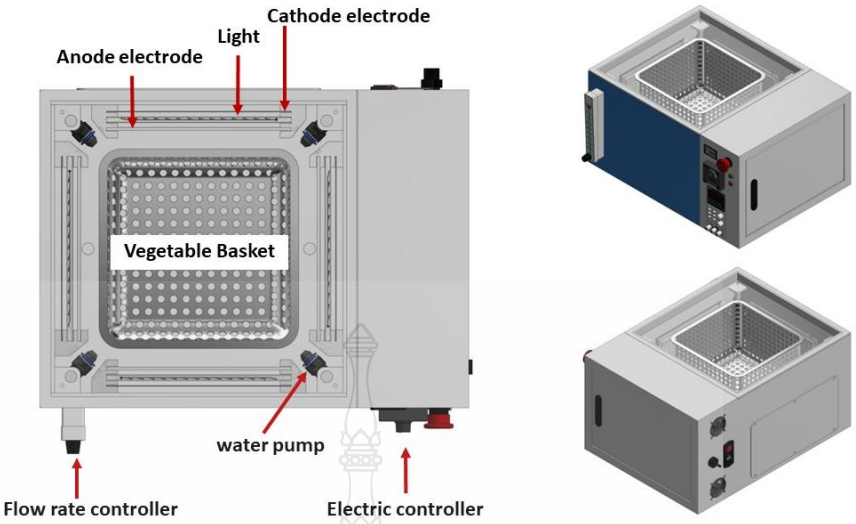
แนวคิดการพัฒนาของงานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 การพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยการตรึงด้วยสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมและเทคนิคการตรึงที่มีประสิทธิภาพ เพื่อใช้กับเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic ; PEC) ซึ่งจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหลักสองขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยมีหลักการทำงานดังแสดงในภาพที่ 1.1 คือ ที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานที่ได้พัฒนาขึ้นโดยการตรึงสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจะสามารถกระตุ้นการแยกกันของอิเล็กตรอน (e^-) ไปที่ชั้นการนำ (conduction band, CB) และจะเกิดช่องว่างที่มีประจุบวก (hole; h^+) ที่ชั้นวาเลนซ์ (valence band, VB) ซึ่ง h^+ ที่ VB จะมีศักยภาพสูงในการออกซิไดซ์น้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดให้กลายเป็นอนุมูลของไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $^{\bullet}OH$) นอกจากนี้ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีคลอไรด์ไอออนอยู่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเป็นสารประกอบแอคทีฟคลอรีน (active chlorine, Cl_{ac}) ได้อีกทางหนึ่ง ซึ่ง $^{\bullet}OH$ และ Cl_{ac} ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นสารที่มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ ทำให้มีสมบัติในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงมากและสามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าแพร่ไปยังสารละลายส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของผักและผลไม้ทำให้เกิดกระบวนการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของผักและผลไม้ได้เป็นอย่างดี และจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอีกทางด้วยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าด้านบวกที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นที่ชั้น CB ของสารกึ่งตัวนำที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดและเหนี่ยวนำ e^- ให้เข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อทำให้เกิดการไหลต่อไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งเป็นกระบวนการป้องกันการเกิดปรากฏการณ์การรวมกันของ e^- และ h^+ (Recombination effect) ได้เป็นอย่างดี เรียกเทคนิคที่มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าและแสงกับขั้วไฟฟ้าดังกล่าวนี้ว่า โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากว่าเทคนิคที่มีการกระตุ้นขั้วไฟฟ้าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic; EC) หรือกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic; PC) เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 1.1 การเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารฆ่าแมลง (Pesticides) และเชื้อจุลินทรีย์ (microorganism) ที่ผิวของผักและผลไม้ด้วยเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก

ดังนั้นด้วยหลักการและจุดเด่นของเทคนิคดังกล่าว จึงมีศักยภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อทำให้เกิดกระบวนการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของผักและผลไม้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากเทคนิคดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการล้างด้วยน้ำธรรมดาหรือการออกซิไดซ์ด้วยสารเคมีแล้ว ยังมีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีดั้งเดิมคือ มีความปลอดภัยและประหยัดเพราะไม่ใช้สารเคมีอันตรายในระบบ

ส่วนที่สองของงานวิจัยคือ การออกแบบเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งได้ออกแบบเพื่อให้เข้าใจในหลักการดังแสดงในภาพที่ 1.2 โดยได้ศึกษาลักษณะรูปแบบของเซลล์ ระยะตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดแสง จำนวนขั้วไฟฟ้า ขนาดขั้วไฟฟ้า ทิศทาง และรูปแบบการไหลเวียนของสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการการกำจัดสารอินทรีย์สารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่ติดอยู่บนผักผลไม้ ผู้วิจัยสามารถสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่ตกค้างในผักผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อการผลิตเครื่องล้างผักผลไม้เพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ต่อไป



ภาพที่ 1.2 การออกแบบเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักผลไม้

งานวิจัยดังกล่าวนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาศักยภาพและความสามารถในกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี โดยได้พัฒนางานวิจัยร่วมกับบริษัท อิเกิ้ล ดรีม จำกัด เพื่อพัฒนาเครื่องล้างผักสำหรับครัวเรือนให้สามารถจำหน่ายเชิงพาณิชย์ เพื่อให้ผู้บริโภคได้มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นจากการรับประทานผักผลไม้ที่ลดการตกค้างและการปนเปื้อนของสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจะสามารถแข่งขันกับคู่แข่งที่มีอยู่ในท้องตลาดได้เป็นอย่างดี โดยได้สรุปเปรียบเทียบเทคนิคล้างผักแบบดั้งเดิมกับเทคนิคที่นำเสนอดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบเทคนิคการล้างผักและผลไม้แบบดั้งเดิม (คู่แข่ง 1, 2) กับเทคนิคที่นำเสนอ (เซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก)

หัวข้อ เปรียบเทียบ	**ผลิตภัณฑ์ /เทคโนโลยีจากงานวิจัย** (เซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก)	**คู่แข่ง 1** (การใช้สารเคมี เช่น ด่างทับทิม น้ำเกลือ)	**คู่แข่ง 2** (การใช้โอโซน)
ประสิทธิภาพ คุณภาพ	มีประสิทธิภาพสูงกว่าคู่แข่งเพราะเทคโนโลยีที่จะใช้สามารถกำจัดสารฆ่าแมลงได้ดีกว่า ด้วยหลักการผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $^{\bullet}OH$) และแอคทีฟคลอรีน (Cl_{ac}) ซึ่งมีศักยภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้มากกว่า อีก 2 วิธี โดยเรียงลำดับค่า Oxidation potential ของสาร $^{\bullet}OH > O_3 > KMnO_4 > HOCl > ClO^-$ ได้เท่ากับ 2.86 > 2.07 > 1.70 > 1.49 > 0.95 ตามลำดับ ที่มา www.oxidationtech.com	มีประสิทธิภาพน้อยกว่าคู่แข่งที่ 2 และงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น	มีประสิทธิภาพ แต่น่าจะน้อยกว่างานวิจัยที่จะพัฒนาขึ้น เนื่องจากหลักการที่ว่า โอโซน (O_3) จะมีขนาดใหญ่กว่าอนุมูลไฮดรอกซิล ($^{\bullet}OH$) ที่ผลิตได้ จากเทคนิคที่จะพัฒนาขึ้นซึ่ง $^{\bullet}OH$ ที่มีขนาดเล็กกว่า O_3 ทำให้มีอำนาจในการแทรกซึมเข้าไปกำจัดยาฆ่าแมลงและเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของผักผลไม้ได้ดีกว่า O_3 และที่สำคัญอีกอย่างคือ O_3 มีความสามารถละลายในน้ำได้น้อย ทำให้หลุดออกจากสารละลายน้ำได้ง่ายส่งผลทำให้ประสิทธิภาพลดลง
ความปลอดภัย	ไม่มีสารพิษตกค้างเนื่องจากสารอนุมูล$^{\bullet}OH$ ที่เกิดขึ้นจะสลายตัวได้เร็วหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดแล้ว ส่วน HOCl ถือเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค	มีสารเคมีตกค้าง	ไม่มีสารพิษตกค้าง
ต้นทุน	ต้นทุนอยู่ที่อุปกรณ์การทำชุดต้นแบบครั้งแรก ซึ่งสามารถใช้ได้นาน โดยสามารถใช้ซ้ำได้	ด่างทับทิมราคาสูงกว่าและใช้แล้วหมดไป	ราคาอุปกรณ์แพงกว่าวิธีที่จะพัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและสากลในฐานข้อมูลที่เป็นที่ยอมรับ และยื่นจดรับรองสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรเพื่อคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาจากผลงานวิจัยทั้งการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำและการประยุกต์ใช้กับเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์

2. ได้องค์ความรู้และสามารถพัฒนาอาจารย์นักวิจัยและบัณฑิตที่มีความเชี่ยวชาญทั้งด้านการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ และการการออกแบบเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก

3. ได้พัฒนาต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อพัฒนาต่อยอดสำหรับจำหน่ายเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประเภทยาฆ่าแมลง (Pesticide)

แมลงสำหรับพืชนั้นมีประโยชน์ในการช่วยผสมเกสรดอกไม้ เพื่อให้เกสรตัวผู้ผสมกันกับเกสรตัวเมียจากนั้นจะเจริญเติบโตเป็นผลผลิตของผักและผลไม้ นอกจากแมลงจะให้ประโยชน์แก่พืชผักผลไม้ทางเกษตรแล้ว ยังมีแมลงบางชนิดที่เป็นโทษและก่อโรคทำให้พืชผักผลไม้เกิดความเสียหายเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการใช้สารกำจัดศรัตรูพืชหรือยาฆ่าแมลงฉีดพ่นทางอากาศ บริเวณใบ ราก ลำต้น รวมถึงดอกผล ให้แก่ผลผลิตทางการเกษตรเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งในปัจจุบันมียาฆ่าแมลงทั้งแบบชีวภาพและสารเคมี ถึงแม้ยาฆ่าแมลงแบบชีวภาพจะไม่เป็นอันตราย แต่ประสิทธิภาพการกำจัดแมลงอาจไม่มากพอและมีราคาที่สูง เกษตรกรจึงนิยมใช้ยาฆ่าแมลงแบบสารเคมี จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีการตกค้างหรือปนเปื้อนของยาฆ่าแมลงในผักผลไม้ดังกล่าว ซึ่งยาฆ่าแมลงดังกล่าวถือว่าเป็นสารเคมีอันตรายที่มีพิษรุนแรงมากต่อผู้บริโภคหรืออาจถึงชีวิตได้ โดยประเภทของยาฆ่าแมลงแบ่งออกได้ 4 กลุ่มใหญ่ๆ ตามสูตรโครงสร้างได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 สารกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine Pesticides)

ออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) เป็นสารประกอบที่มีไฮโดรเจน (H) คาร์บอน (C) และคลอรีน (Cl) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยเรียกสารประกอบชนิดนี้อีกอย่างหนึ่งว่า คลอริเนเตดไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbons) โดยสารที่อยู่ในกลุ่มนี้ที่สำคัญ ได้แก่ ออลดริน (Aldrin), ดีลดริน (Dieldrin), เฮปตาคลอร์ (Heptachlor), คลอร์เดน (Chlordane) และ DDT เป็นสารที่ไม่มีในธรรมชาติต้องสังเคราะห์ขึ้น มีคุณสมบัติการละลายในไขมันหรือน้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ จะละลายในน้ำได้น้อยมากจนถึงไม่ละลายในน้ำเลย เป็นสารที่มีความเสถียรมากสลายตัวได้ยาก จึงทำให้สารชนิดนี้สะสมอยู่ตามดินตามแหล่งน้ำในปริมาณที่สูงและเกิดปัญหาสภาวะสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สารกลุ่มนี้เข้าไปสะสมอยู่ในพืชผักผลไม้ได้

กลไกออกฤทธิ์ของสารกลุ่มออการ์โนคลอรีน คือ อาการพิษเฉียบพลัน มีพิษต่อระบบประสาทส่วนกลาง ผู้ป่วยจะแสดงอาการไวต่อสิ่งเร้ามาก กระวนกระวาย เวียนศีรษะ อาเจียน มึนงง กล้ามเนื้อขาดการประสานงาน ทำให้มีอาการสั่น เสียการทรงตัว บางครั้งมีการชักเกร็ง ผู้ป่วยอาจตายด้วยระบบหายใจล้มเหลว ไม่นิยมใช้เพราะมีความคงทนในสภาวะแวดล้อมสูงทำให้เกิดพิษตกค้างมากสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันสารในกลุ่มนี้หลายชนิดจัดเป็น วัตถุอันตรายชนิดที่ 4 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 คือห้ามมิให้มีการผลิต นำเข้า ส่งออก หรือมีไว้ในครอบครอง เพราะมีพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ก่อให้เกิดมะเร็ง ตกค้างในสิ่งแวดล้อม แพร่กระจายและสะสมเพิ่มขึ้นในสัตว์ต่าง ๆ ตามลำดับในชั้นห่วงโซ่อาหาร

2.1.2 สารกลุ่มออร์กะโนฟอสเฟต (Organophosphate)

เป็นสารอินทรีย์ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบสำคัญ และเป็นสารที่ละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ ยาฆ่าแมลงกลุ่มนี้ที่มีความสำคัญทางการค้าและพิษวิทยา คือ เอสเทอร์ และไทออล โดยสารเคมี ในกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดีคือ มาลาไธออน (malathion) ไดอาซินอน (diazinon) เฟนนิโตรไธออน (fenitrothion) พิริมิฟอสเมธิล (pirimiphos methyl) และไดคลอวอส (dichlorvos หรือ DDVP) เป็นต้น สารเคมีในกลุ่มนี้สลายตัวได้ง่ายในธรรมชาติจึงมีพิษตกค้างน้อย มีประสิทธิภาพในการป้องกันในการกำจัดศัตรูพืชได้สูง บางชนิดมีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นน้อย บางชนิดก็มีความเป็นพิษต่อคนและสัตว์ที่มีกระดูกสันหลัง โดยมีความเป็นพิษต่อการทำงานของเอนไซม์ในระบบประสาท คือ โคลีนเอสเตอเรส (Cholinesterase) แต่สารในกลุ่มนี้จะย่อยสลายได้เร็วกว่ากลุ่มแรก

เมื่อได้รับทั้งทางปาก ผิวหนัง และสูดดม จะมีอาการมึนงง ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย กระวนกระวาย อาการสั่นที่ปลายลิ้นและเปลือกตา ม่านตาหรี่ คลื่นไส้ อาเจียน น้ำตา น้ำลายไหล เหงื่อออกมาก ปวดท้องเกร็ง ชีพจรเต้นช้า กล้ามเนื้อเกร็ง ในรายที่มีอาการรุนแรงจะท้องเสีย ตาหรี่ หายใจลำบาก ปอดบวม ขาดออกซิเจน ตัวเขียวคล้ำ (cyanosis) กล้ามเนื้อหูรูดไม่ทำงานชักและตายเพราะหัวใจไม่ทำงาน ในรายที่มีพิษสะสมระบบประสาทถูกทำลายและกล้ามเนื้ออ่อนเปลี้ย

2.1.3 สารกลุ่มคาร์บาเมต (Carbamate)

เป็นยาฆ่าแมลงกลุ่มหนึ่งที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน สารเคมีในกลุ่มนี้ตัวแรกที่มีประวัติในการใช้คือ อีเซอรีน (Eserine) หรือไฟโสสติกมีน (Physostigmine) สารนี้เป็นสารพิษที่พบในเมล็ดถั่วคาลาบาร์ (Calabar beans) ซึ่งเป็นพืชในวงศ์เลกูมิโนเซ (Leguminosae) ซึ่งอีเซอรีนเป็นสารยับยั้งอะเซทิล

โคลิเนสเทอเรส (Acetylcholinesterase inhibitor) ตัวแรกที่เป็นที่รู้จักโดยในหนูมีขนาดที่ทำให้ประชากร 50% ตาย หรือที่เรียกว่า แอลดี50 (LD_{50}) เท่ากับ 4.5 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม โดยการกินและ 0.64 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม โดยการฉีดเข้าทางช่องท้อง โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมตจะมีคาร์บาริลเป็นองค์ประกอบสำคัญมักใช้ฆ่าแมลงศัตรูพืชในผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ และเมล็ดพืชที่เป็นอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้กับสัตว์ปีก ปศุสัตว์และสัตว์เลี้ยง เพื่อกำจัดแมลงรบกวนและยังใช้กำจัดหอยทากและหนอนตัวกลม (Nematodes) บางชนิดได้

ผู้ได้รับพิษจะมีอาการปวดศีรษะ วิงเวียน กล้ามเนื้ออ่อนแรง กระตุกหรือสั่น หัวใจเต้นช้าลง รู้สึกบวมหรือแน่นหน้าอก เหงื่อออก คลื่นไส้ นอกจากนี้ยังมีผลต่อตา คือระคายเคืองต่อตา ทำให้สายตาขาดความคมชัด ตาแดง น้ำตาไหล การควบคุมกล้ามเนื้อตาลำบากและม่านตาหด

2.1.4 สารกลุ่มไพรีทอยด์ (Pyrethroid)

เป็นสารเคมีกลุ่มที่สังเคราะห์ขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ตามโครงสร้างของไพรีทริน ซึ่งเป็นสารธรรมชาติที่สกัดได้จากพืชไพรีทรัม สารเคมีในกลุ่มนี้มีความเป็นพิษต่อแมลงสูง แต่มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นต่ำ อย่างไรก็ตามสารเคมีกลุ่มนี้มีราคาแพงจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้สารเคมีกำจัดแมลง ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เดลตาเมธริน (Deltamethrin) เพอร์เมธริน (Permethrin) เรสเมธริน (Resmethrin) และไบโอเรสเมธริน (Bioresmethrin) ไซเพอร์เมทริน (cypermethrin) เพอร์เมทริน (permethrin) ไซฟลูทริน (cyfluthrin) เป็นต้น

ผู้ได้รับจะมีอาการคัน ผื่นแดง บางรายก็มีอาการจามคัดจมูก โดยเฉพาะในรายที่เคยเป็นโรคหอบ เมื่อสูดหายใจเอาวัตถุอันตรายพวกนี้เข้าไปจะมีอาการหอบปรากฏขึ้นมาอีก ในรายที่ได้รับเข้าไปจำนวนมาก จะทำให้มีอาการชักกระตุก กล้ามเนื้อกระตุก และขั้นสุดท้ายจะเป็นอัมพาต

2.2 สูตรผสมของสารฆ่าแมลง

สูตรของสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช เป็นสภาพหรือรูปแบบของสารเคมีหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมปรุงแต่งระหว่างสารสำคัญกับส่วนผสมอื่น เพื่อให้สารผสมปรุงแต่งหรือผลิตภัณฑ์นั้นเหมาะสำหรับการนำไปใช้ การที่ต้องผสมปรุงแต่งให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะกับสภาพการใช้นั้น เนื่องจากสารสำคัญมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น ของแข็ง ของเหลว หรือความสามารถในการละลายในสารละลายต่างๆ รวมถึงอัตราหรือปริมาณการใช้ จึงจำเป็นต้องผสมปรุงแต่งกับสารผสมอื่นๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ควบคุมศัตรูพืชได้ การผสมปรุงแต่งสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชมีเป้าหมายหลักอยู่ 2 ประการ คือ เพื่อกระจายสารสำคัญให้ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมายอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เพื่อเสริมประสิทธิภาพการควบคุมศัตรูพืชให้สูงขึ้น เช่น เพิ่มความเป็นพิษต่อศัตรูพืช เพิ่มการดูดซึมเข้าสู่ต้นพืช ความคงทนต่อการสลายตัว การจับเกาะเป้าหมายได้นานขึ้น ลดอันตรายที่มีต่อผู้ใช้ ลดการปลิว หรือการระเหย เป็นต้น

2.2.1 องค์ประกอบหลักของสารฆ่าแมลง

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์สารป้องกันกำจัดศัตรูพืช ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก 2 ส่วน ได้แก่ สารสำคัญและส่วนผสมอื่น (1) สารสำคัญ เป็นสารเคมีที่ออกฤทธิ์ทำลายศัตรูพืชได้ โดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ (2) ส่วนผสมอื่น เป็นสารชนิดอื่นที่ผสมในผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นอยู่ในรูปที่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สารกลุ่มนี้รวมถึงสารตัวทำละลาย สารทำให้เจือจาง หรือสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น ซึ่งสารผสมปรุงแต่งที่นำมาใช้ผสมควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

- มีราคาถูก และสามารถนำไปใช้ได้ง่าย
- สะดวกในการเก็บรักษาและการขนส่ง
- มีความคงทนและคงสภาพได้นานพอสมควร
- ทำให้สารเคมีที่ไม่ละลายน้ำสามารถรวมกับน้ำได้
- ทำให้สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชติดกับผิวศัตรูพืชได้ดี
- ลดแรงตึงผิวทำให้สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชกระจายตามผิวใบพืชได้ดี

2.2.2 ประเภทของสูตรผสมของสารฆ่าแมลง

สูตรผสมของสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชตามการจัดแบ่งขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ที่มีในประเทศไทยสรุปได้ ดังนี้

2.2.2.1 กลุ่มสารผสมรูปแบบของของเหลว สารเคมีกลุ่มนี้ผสมอยู่ในรูปแบบของของเหลวจำเป็นต้องผสมน้ำก่อนนำไปใช้ประกอบด้วย ดังนี้

- สารผสมน้ำมันข้น (emulsifiable concentrate: EC) เป็นสูตรผสมที่นิยมใช้มากที่สุด สารผสมเป็นสภาพของเหลวเนื้อเดียว ได้จากการละลายสารสำคัญในตัวทำละลายและผสมสาร emulsifier เพื่อให้สารออกฤทธิ์สามารถรวมกับน้ำได้ สารนี้เมื่อผสมรวมกับน้ำจะได้สารละลายมีสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม เช่น อิมิดาโคลพริด 050 EC หรือคาร์โบซัลแฟน 20 เปอร์เซ็นต์ EC เป็นต้น

- สารผสมข้นละลายน้ำ (Water soluble concentrate: WSC) เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชที่มีลักษณะแบบเดียวกับชนิดแรก แต่เนื่องจากสารสำคัญสามารถละลายน้ำได้จึงไม่ใส่สาร emulsifier ดังนั้นเวลาผสมกับน้ำจะไม่มีสีขาวขุ่น

- สารผสมของเหลวข้น (Soluble concentrates: SL) เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชคล้ายกับ WSC สีใส ผสมกับน้ำจะไม่มีสีขาวขุ่น เช่น อิมิดาโคลพริด 100 SL เป็นต้น

- สารผสมแขวนลอยข้น (suspension concentrates: SC หรือ flowable concentrates: F หรือ FL) เป็นสูตรสำเร็จแบบใหม่คล้ายคลึงกับ wettable powder ซึ่งอยู่ในรูปของครีมหรือของเหลวเข้มข้นสามารถรวมกับน้ำได้ดีและอนุภาคของสารสามารถแขวนลอยอยู่ได้นานในสารละลาย โดยปกติสารสำคัญไม่ละลายหรือละลายได้น้อยมากในน้ำหรือตัวทำละลาย และตัวสารนั้นถูกบดให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดของ wettable จึงทำให้แขวนลอยอยู่ได้นาน เช่น แอสเซ็นต์ 5 เปอร์เซ็นต์ SC เป็นต้น

- สารผสมแขวนลอยข้นสำหรับคลุกเมล็ด (flowable concentrate for seed treatment: FS) เป็นของเหลวในรูปของสารแขวนลอยใช้คลุกเมล็ดหรือผสมน้ำพ่น

- สารผสมแคปซูลแขวนลอย (capsule suspensions: CS) เป็นสารผสมเหลวที่ได้จากการกระจายแขวนลอยของสารสำคัญในรูปแคปซูลขนาดเล็กต้องผสมน้ำก่อนใช้

- สารผสมน้ำมันแขวนลอยในน้ำ (Aqueous suspo-emulsion: SE) เป็นสารผสมเหลว ที่ได้จากการกระจายแขวนลอยของอนุภาคของสารสำคัญในน้ำ

- สารเข้มข้นผสม organic solvent (OD Oil-based suspension concentrates: OD) เช่น โมเวนโต โอดี

- สารผสมแขวนลอยข้นผสมสารผสมแคปซูลแขวนลอย (microcapsule/suspension combinations: ZC) เช่น เอฟโฟเรีย 247 ZC

2.2.2.2 กลุ่มสารผสมรูปแบบของผงหรือฝุ่น สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชในกลุ่มนี้ผลิตออกมาจำหน่ายในลักษณะต่างๆ กันคือ

- สารผสมชนิดผงละลายน้ำ (Wettable powder: WP) ประกอบด้วยสารสำคัญและสารที่ทำให้เจือจาง ซึ่งเป็นสารผสมอื่นโดยปกติจะเป็นดินหรือ synthetic silica (Hydrate silicon dioxide) และนิยมผสมสารทำให้เปียก (Wetting agent) และตัวกระจาย (Dispersing agent) สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชชนิดนี้อยู่ในรูปผง การบรรจุควรมิดชิดไม่ให้ถูกความชื้นจะทำให้สารผสมรวมตัวกันเป็นก้อน สารออกฤทธิ์อาจเสื่อมได้ เช่น คาร์บาริล 85 WP เป็นต้น

- สารผสมชนิดผง (dust: D หรือ Dustable power: DP) เป็นผงแห้ง ประกอบด้วยสารสำคัญและสารผสมอื่น ซึ่งอาจเป็นผงของหินบางชนิด เช่น talc และ bentonite สารชนิดนี้มีความเข้มข้นต่ำสามารถใช้ได้ทันทีโดยเครื่องพ่นผงไม่ต้องผสมน้ำ

- สารผสมชนิดเม็ด (granules: G หรือ GR) คล้ายๆ ชนิดผงแต่มีขนาดของผงหรือเม็ดใหญ่กว่า เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชที่มีสารสำคัญเคลือบอยู่ด้านนอก สารผสมอื่นที่นิยมใช้คือดินและทราย เป็นต้น การใช้สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชกระทำได้โดยการหว่านบนดินหรือในน้ำคล้ายกับใส่ปุ๋ย เช่น ฟูราดาน 3 เปอร์เซ็นต์ G หรือ คูราแทร์ 3 G เป็นต้น

- สารผสมแคปซูลขนาดเล็ก (microcapsule) เป็นสูตรสำเร็จใหม่ โดยการใช้สารที่ไม่ระเหย เช่น สารผสมของ gelatin เคลือบสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชทำให้ตัวสารสำคัญไม่ซึมผ่านออกมาจึงไม่มีพิษในทางสัมผัสแต่จะมีพิษเมื่อกินเข้าไป ในกรณีที่ต้องการให้สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชนั้นมีฤทธิ์ทางสัมผัสด้วยจะเคลือบด้วยสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชอีกชนิดหนึ่ง เช่น ในรูปของ juvenile hormone mimic Altosid สามารถออกฤทธิ์ได้นานเพียง 1-2 วัน แต่ถ้าเคลือบด้วยสาร polyurethane จะสามารถออกฤทธิ์ได้นานถึง 53 วัน เป็นต้น

- สารผสมเหยื่อพิษ (Bait: B) หมายถึงเหยื่อพิษ โดยการผสมสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชกับอาหารหรือสารดึงดูดแมลงทำให้แมลงเข้าหาเหยื่อพิษในปริมาณมาก เช่น สะตอม 0.005 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

2.2.2.3 กลุ่มสารผสมรูปแบบของสารรม สารเคมีในกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิห้องได้ดี มีความเข้มข้นสูงพอที่จะกำจัดศัตรูพืช อัตราการใช้จะกำหนดเป็นน้ำหนักของสารต่อปริมาตรที่จะทำการรมสาร เช่น สารเมทิล โบร์ไมด์ จะกำหนดอัตราการใช้เป็น 24 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นต้น สารรมที่ดีต้องสามารถแทรกกระจายตัวได้ดี กลุ่มสารรมนี้ประกอบด้วย

- สารรมชนิดพ่นฝอย (aerosol) สารควบคุมแมลงในรูปแบบนี้จะมีขนาดของละอองเล็กมาก สามารถลอยอยู่ในอากาศได้นาน ตัวสารจะอยู่ในสภาพที่รวมตัวกับก๊าซเหลวในกระป๋องที่ปิดสนิทหรือให้ตัวสารโดนความร้อนจะเปลี่ยนเป็นควัน โดยใช้เครื่องพ่นเฉพาะเรียกว่าเครื่องพ่นหมอก ขนาดของละอองจะอยู่ระหว่าง 0.1-50 ไมโครเมตร (ไมครอน)

- สารรม (fumigant) เป็นสารรมควันที่ออกฤทธิ์ในรูปของก๊าซพิษ จำเป็นต้องใช้ในสถานที่ปิดสนิท โดยปกติใช้ในการฆ่าศัตรูพืชในโรงเก็บหรือเป็นสารรมดิน สารนี้อาจอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งก็ได้ แต่มีคุณสมบัติระเหยตัวได้ดีที่อุณหภูมิห้อง จะมีพิษโดยเข้าทำลายทางระบบหายใจ เช่น สารเมทิลโบรไมด์ หรือสารฟอสฟีน เป็นต้น

2.3 วิธีการกำจัดยาฆ่าแมลงในผักและผลไม้

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการล้างผักผลไม้หรือกำจัดยาฆ่าแมลงในผักผลไม้มีหลากหลายวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ดังต่อไปนี้

2.3.1 ล้างผักและผลไม้ด้วยน้ำไหลผ่าน

การล้างผักและผลไม้ด้วยวิธีใช้น้ำล้างไหลผ่านจะช่วยลดสารพิษตกค้างได้ 54-63% ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้กันอย่างมาก แต่ต้องอาศัยความพิถีพิถันคือการเปิดน้ำก๊อกให้ไหลผ่านผักและผลไม้ เปิดให้น้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง แล้วค่อยๆล้างค่อยๆถูผักทีละใบผลไม้ทีละลูก เท่านี้ก็ช่วยลดสารพิษตกค้างได้ นอกจากนั้นวิธีการล้างผักผลไม้ให้สะอาดควรล้างให้ถูกวิธีตามประเภทของผักและผลไม้ ที่มา: www.gj.mahidol.ac.th

2.3.2 ล้างผักและผลไม้ด้วยน้ำส้มสายชู

เป็นวิธีที่ช่วยลดสารพิษตกค้างได้ 29-38% ผสมน้ำส้มสายชู 1 ช้อนโต๊ะ นำมาผสมกับน้ำเปล่าอุณหภูมิห้อง 4 ลิตร แช่ผักหรือผลไม้ลงไปทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที ล้างผักและผลไม้ออกด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ ก่อนนำมารับประทานหรือปรุงอาหาร แต่การล้างผักด้วยวิธีนี้ผักบางชนิด เช่น ผักกาดขาวอาจดูดกลิ่นของน้ำส้มสายชูได้ ที่มา: www.ofm.co.th

2.3.3 ล้างผักและผลไม้ด้วยผงฟู

การล้างผักโดยการใช้ผงฟู หรือที่เรียกว่าเบคกิ้งโซดา (baking soda) มีชื่อทางเคมีว่าโซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) ช่วยลดสารพิษตกค้างได้ 80-95% ผสมผงฟู (Baking Soda) 1 ช้อนโต๊ะ กับน้ำอุณหภูมิปกติประมาณ 20 ลิตร แช่ผักหรือผลไม้ลงไปทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ล้างผักและผลไม้ออกด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ ก่อนนำไปรับประทานหรือปรุงอาหาร ที่มา: www.gj.mahidol.ac.th

2.3.4 ล้างผักและผลไม้ด้วยด่างทับทิม

การล้างผักและผลไม้ให้สะอาดด้วยด่างทับทิมหรือชื่อทางเคมี เรียกว่าสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) มีคุณสมบัติเป็นเกลือที่เป็นเบสอ่อนๆ มักถูกนำไปใช้กำจัดเชื้อโรค เชื้อราบนพืชผลต่างๆ ช่วยลดสารพิษตกค้างได้ 35-45% ผสมด่างทับทิม 20-30 เกล็ด กับน้ำอุณหภูมิปกติประมาณ 4 ลิตร แช่ผักหรือผลไม้ลงไปทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นล้างผักและผลไม้ออกด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ ที่มา: www.gj.mahidol.ac.th

2.3.5 ล้างผักและผลไม้ด้วยเกลือ

ล้างผักและผลไม้ให้สะอาดด้วยเกลือจะช่วยลดสารพิษตกค้างได้ 27-38% วิธีการคือ ผสมเกลือป่น 1 ช้อนโต๊ะ กับน้ำอุณหภูมิปกติประมาณ 4 ลิตร แช่ผักหรือผลไม้ลงไปทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที ล้างผักและผลไม้ออกด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ หรืออาจล้างด้วยน้ำสะอาดจำนวนหลายๆรอบเพื่อลดความเค็มของเกลือลงก่อนนำไปรับประทาน ที่มา: www.gj.mahidol.ac.th

2.3.6 ล้างผักและผลไม้ด้วยอัลตราซาวด์ (Ultrasound)

อัลตราซาวด์ (Ultrasound) คือเทคโนโลยีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้ 20-70% และยังสามารถลด

การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ได้ โดยทำให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง สิ่งสกปรกจะหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น ทำลายไข่ของแมลง หนอน แมลงตัวเต็มไวให้หลุดออกจากผัก ลดการใช้น้ำได้ถึง 50% ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ ที่มา: https://www.nstda.or.th

2.3.7 ล้างผักและผลไม้ด้วยโอโซน (Ozone)

โอโซนจัดเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ที่แรง สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในเยื่อผนังของแบคทีเรีย เมื่อทำปฏิกิริยากับโอโซนทำให้ผนังเซลล์อ่อนแอและแตกออกทำให้เซลล์ตาย โอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ส่วนใหญ่รวมทั้งสารอนินทรีย์ ทำให้เกิดการแตกตัวและสลายตัวในกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพได้ง่าย สารอินทรีย์บางชนิดทำปฏิกิริยากับโอโซนอย่างสมบูรณ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โอโซนสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส สปอร์ เชื้อรา ตามปริมาณความเข้มข้นและระยะเวลาที่ใช้ต่างกัน และสามารถกำจัดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ประมาณ 60-70% ที่มา: https://kukr.lib.ku.ac.th

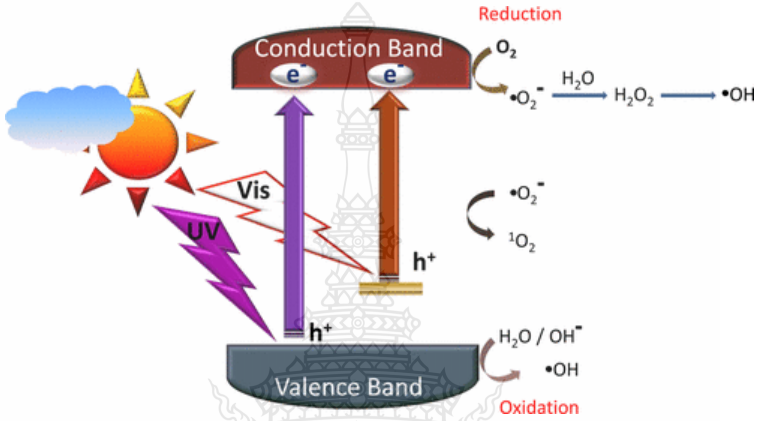
2.3.8 ล้างผักและผลไม้ด้วยน้ำยาล้างผัก

น้ำยาล้างผักหรือน้ำอิเล็กโทรไลต์ก็คือกรดไฮโปคลอรัส ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรค ไวรัส เชื้อรา รวมไปถึงสปอร์ของเชื้อราได้และสามารถดับกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้อย่างดี และสามารถทำให้พันธะทางเคมีในโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์แตกออกและเกิดเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้ ปัจจุบันมีน้ำยาล้างผักให้เลือกใช้มากมายในท้องตลาด ควรเลือกใช้ส่วนผสมที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน food grade หรือสูตรออแกนิค วิธีการใช้คือนำผักผลไม้ไปแช่ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ไม่ควรแช่นานเกินกว่านี้ เพราะน้ำยาจะซึมเข้าในผักผลไม้จนอาจเป็นอันตรายต่อร่างกายได้ จากนั้นล้างออกด้วยน้ำสะอาด วิธีนี้จะช่วยลดปริมาณสารพิษจากยาฆ่าแมลงได้ประมาณ 25-70% ที่มา: https://www.cleanipedia.com

2.3.9 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic; PC) เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์รวมถึงยาฆ่าแมลง โดยมีหลักการของกระบวนการคือเมื่อสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าค่า Eg ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron, e^-)

จากแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) ไปยังแถบชั้นการนำ (Conduction band; CB) ซึ่ง e^- ที่แถบการนำจะไปรีดิวซ์ออกซิเจน (O_2) ให้กลายเป็นอนุมูลของซุปเปอร์ออกไซด์ ($^{\bullet}O_2^-$) และทำให้ช่องว่าง (hole; h^+) ที่ชั้นวาเลนซ์ ซึ่ง h^+ ที่เกิดขึ้นจะไปออกซิไดซ์น้ำ (H_2O) ให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $^{\bullet}OH$) ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

2.4 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ด้วยหลักการ Advance oxidation process เช่น ผ่านกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกหรือโฟโตคะตะไลติก จะผ่านตัวกลางในสารละลายน้ำที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าโฟโตแอโทดภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง ตัวอย่างเช่น อนุมูลอิสระ (free radicals) เป็นสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (unpaired electron) อยู่วงนอกของอะตอมหรือโมเลกุล อนุมูลอิสระส่วนใหญ่มีความไม่คงตัวและมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยา โดยรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นๆ เพื่อให้ตัวเองเสถียรขึ้น ส่งผลทำให้สารที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปนั้นเกิดการสลายตัวหรือโครงสร้างถูกทำลายไป อนุมูลอิสระที่อาจเกิดจากกระบวนการดังกล่าว คือ อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $^{\bullet}OH$) นอกจากนี้ส่วนใหญ่สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีคลอไรด์ไอออนละลายอยู่ในสารละลายน้ำจะมีสารแอคทีฟคลอรีน เช่น กรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorus, HOCl) และไฮโปคลอไรต์ไอออน (Hypochlorite; OCl^-) ซึ่งสารต่างๆ ดังกล่าวมีสมบัติ ดังนี้

2.4.1 อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; •OH)

อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical; •OH) ซึ่งจัดเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงสูง (reactive oxygen species; ROS) มีความว่องไวสูงสุด สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่างๆ ที่อยู่รอบข้างในทันทีที่ถูกสร้างขึ้น ยังส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่องค์ประกอบต่างๆของเซลล์ ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างดีเอ็นเอ (DNA) การเปลี่ยนสภาพโปรตีนตลอดจนไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์หรือการสร้างพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับโปรตีนหรือเอนไซม์บางชนิดจนทำให้การทำงานของโปรตีนหรือเอนไซม์นั้นๆ ผิดปกติไป อนุมูลไฮดรอกซิลยังผ่านโครงสร้างผนังเซลล์ชั้นนอกของแบคทีเรียและออกซิไดซ์เมมเบรนในส่วนที่ขนส่งอิเล็กตรอน ทำให้สิ่งมีชีวิตนั้นถูกทำลายและตายลงในที่สุด ส่วนกลไกการสลายสารอินทรีย์และยาฆ่าแมลงเกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิลที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง จะเข้าไปดึงอิเล็กตรอนของสารประกอบต่างๆ ของสารอินทรีย์หรือยาฆ่าแมลง ทำให้โครงสร้างสารประกอบเหล่านั้นถูกทำลายให้มีความเป็นพิษลดน้อยลงจนถึงทำลายโครงสร้างให้สลายไป

2.4.2 กรดไฮโปคลอรัส (HOCl)

กรดไฮโปคลอรัส หรือ Hypochlorous Acid มีสูตรโมเลกุลทางเคมีว่า HOCl มีสมบัติเป็นกรดอ่อนๆ ชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นโดยธรรมชาติโดยเซลล์เม็ดเลือดขาวในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทุกชนิดเพื่อรักษาและปกป้องร่างกาย ซึ่งกรดไฮโปคลอรัสมีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อไวรัส แบคทีเรีย เชื้อรา รวมไปถึงสปอร์ของเชื้อราได้ โดยการเข้าไปทำลายผนังหุ้มเซลล์ของเชื้อโรค เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคเหล่านั้น เนื่องจากกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) เป็นกรดชนิดเดียวกันกับที่อยู่ในระบบภูมิคุ้มกันในเม็ดเลือดขาวของร่างกายมนุษย์จึงปลอดภัยไม่เป็นอันตรายต่อผิวบอบบางหรือดวงตา ไม่ทำให้เกิดอาการแสบและมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าสารฟอกขาวประเภทคลอรีนถึง 80-120 เท่า

2.4.3 ไฮโปคลอไรต์ ไอออน (Hypochlorite; ClO^-)

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือไฮโปคลอไรต์ (OCl^-) ออกฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์หรืออาจเกิดการออกซิไดซ์ (oxidize) โซเดียมไฮโปคลอไรต์มีราคาถูกฆ่าเชื้อได้ดีโดยขึ้นกับความเข้มข้นที่ใช้แต่ก็เป็นสารที่มีความคงตัวต่ำ เมื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือสัมผัสสารที่มีฤทธิ์เป็นกรด จะทำให้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ปลดปล่อยแก๊สคลอรีนออกมาจนเกิดอันตรายต่อผู้สูดดมได้

2.4.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุมูลอิสระและแอคทีฟคลอรีน

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุมูลอิสระและแอคทีฟคลอรีน ที่ค่าความสามารถในการออกซิไดซ์และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ยาฆ่าแมลง รวมถึงเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าอนุมูลไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับ 2.8 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดไฮโปคลอรัส (1.49 โวลต์) และไฮโปคลอไรต์ (0.94 โวลต์) ตามลำดับ ดังนั้นอนุมูลไฮดรอกซิลจึงมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงที่สุด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแรงในการออกซิไดซ์ของอนุมูลอิสระ

Oxidant	Oxidation potential (Volts)
Hydroxyl Radical ($^{\bullet}OH$)	2.8
Hypochlorus acid, HOCl	1.49
Hypochlorite ion (OCl^{-})	0.94

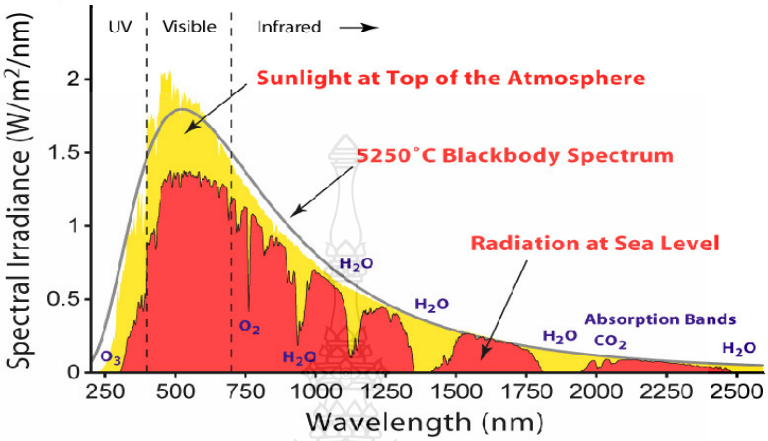
2.5 การพัฒนาขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก

สำหรับการพัฒนาขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกนั้นมีอยู่ ด้วยกันหลากหลายวิธี ดังต่อไปนี้

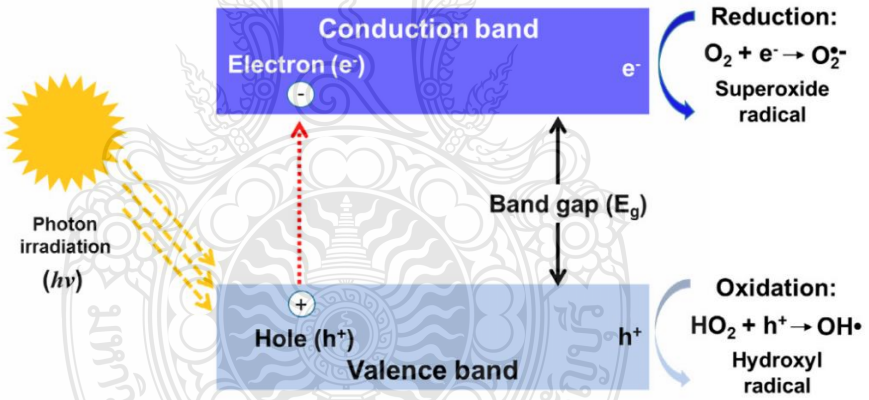
2.5.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง

แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงธรรมชาติที่พบมากที่สุดบนโลก ประกอบไปด้วยช่วงแสงหลายช่วง ได้แก่ แสงอินฟราเรด (Infrared radiation; IR) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง >800 นาโนเมตร ประมาณ 53%, แสงที่ตามองเห็น (Visible light) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-800 นาโนเมตร ประมาณ 43% และแสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation; UV) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 200 - 400 นาโนเมตร ประมาณ 3% จากข้อมูลข้างต้นพบว่าแสงที่มีปริมาณช่วงแสงต่อพื้นที่สูงที่สุดคือแสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible radiation) ดังแสดงในส่วนประกอบของแสง (Spectral irradiance) ตามช่วงความยาวคลื่นแสงของแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งแสงช่วงแสงที่ตามองเห็นมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับแสงในช่วงอื่นๆ ดังนั้นเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำมีสมบัติในการดูดกลืนแสงธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตา

มองเห็นก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าให้ตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงธรรมชาติได้ดีขึ้น



ภาพที่ 2.2 ปริมาณแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์



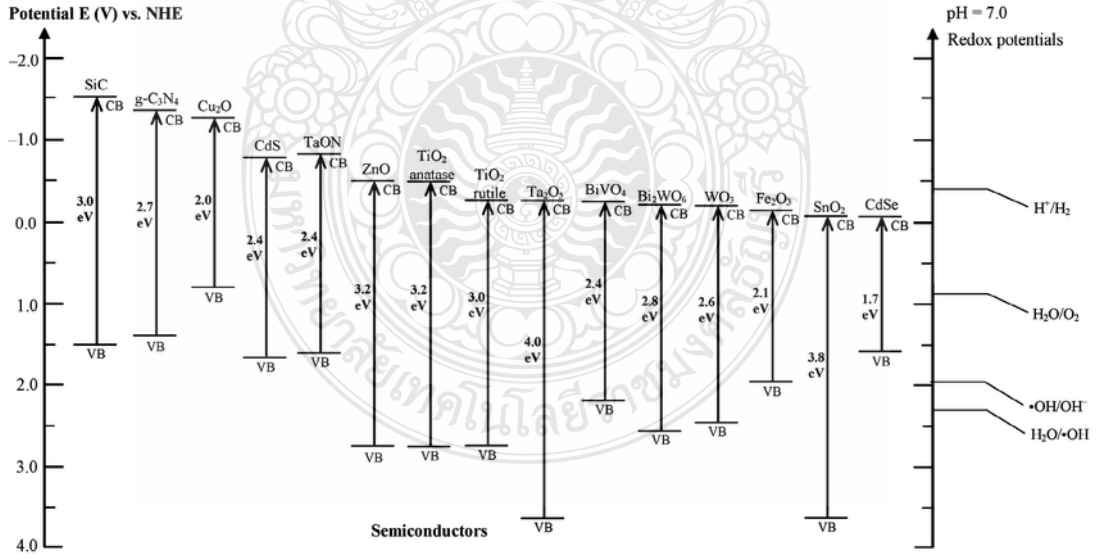
ภาพที่ 2.3 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง

จากภาพที่ 2.3 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ถูกการกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) ไปยังแถบการนำ(Conduction band; CB) ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานต่างๆ มากระตุ้นได้แก่ พลังงานแสง พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อน ที่มีค่าพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy; Eg) จึงจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า

แถบพลังงาน (Eg) ของสารกึ่งตัวนำกับค่าความยาวคลื่นของแสง (λ) ซึ่งสามารถใช้สมการนี้ในการทำนายค่าพลังงานที่ใช้กระตุ้นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดในช่วงความยาวคลื่นแสงได้

$$Eg\ (eV) = 1{,}240/\lambda\ (nm) \qquad (2.1)$$

จากสมการข้างต้นสามารถทำนายได้ว่าสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ได้นั้นควรเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่น้อยกว่า 3.1 eV และนอกจากนี้ระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์และระดับชั้นพลังงานของแถบการนำก็มีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อให้เกิดการกำจัดยาฆ่าแมลง ดังแสดงในภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของน้ำ เพื่อเน้นการกำจัดยาฆ่าแมลงโดยมีหลักการคือ ถ้าต้องการให้สารกึ่งตัวนำเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้ำสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นต้องมีแถบวาเลนซ์ที่ต่ำกว่าหรือไปทางบวกมากกว่า (more positive potential) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้ำ (หรือกล่าวได้คือต้องมีค่ามากกว่า 2.3 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน SHE) จึงจะสามารถเกิดการออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical ; •OH) ได้ ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถออกซิไดซ์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้

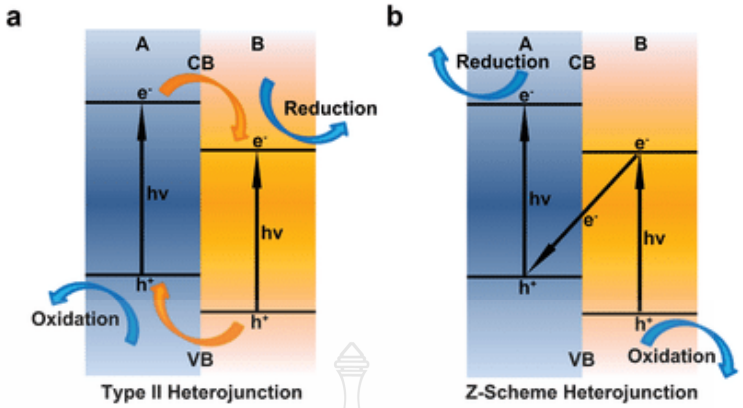
ที่มา: www.researchgate.net

2.5.2 การพัฒนาการส่งผ่านอิเล็กตรอน

จากสารกึ่งตัวนำที่ได้กล่าวมาจะประกอบไปด้วยคู่อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งเป็นสภาพที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valance band; VB) ของสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นจากพลังงานแสง พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อน ที่มีค่าพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy; Eg) จนมีพลังงานสูงพอที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) ทำให้เกิดช่องว่างที่เรียกว่าโฮล (hole, h^+) ขึ้นในแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปซึ่งจะคงสภาพในช่วงเวลานั้นสั้นๆ ก่อนที่อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานและเกิดการตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิมหรือที่เรียกว่า Recombination effect ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพความเป็นโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกลดลง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก จึงต้องมีการพัฒนาการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีหลากหลายวิธีด้วยกัน ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 การใช้สารกึ่งตัวนำผสม

การใช้สารกึ่งตัวนำผสม 2 ชนิด หรือมากกว่า 2 ชนิด สามารถออกแบบรูปแบบกลไกได้หลากหลายแบบ เช่น n-n junctions, p-n junctions และ Z-scheme junctions เป็นต้น โดยมีหลักการในการจับคู่สารกึ่งตัวนำดังนี้ การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) สามารถพัฒนากระบวนการส่งผ่านประจุดังกล่าวได้โดยการเพิ่มสารกึ่งตัวนำเข้าไป โดยจะต้องเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีแถบการนำและแถบวาเลนซ์ที่เหมาะสมควบคู่กับสารกึ่งตัวนำที่มีอยู่เดิม ซึ่งในกระบวนการเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนสามารถทำได้โดยการเพิ่มสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานที่แถบการนำต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำเดิม สำหรับการเร่งการส่งผ่านโฮล (h^+) สามารถทำได้โดยการตรึงสารกึ่งตัวนำที่มีค่าระดับพลังงานที่แถบวาเลนซ์สูงกว่าแถบวาเลนซ์สารกึ่งตัวนำตัวเดิม หลักการคือเมื่อสารกึ่งตัวนำเดิมได้รับพลังงานแสงจะเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนขึ้นไปยังแถบการนำ จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนไปยังแถบการนำของสารกึ่งตัวนำที่ได้เติมเข้าไป ทำให้เกิดการแยกระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.5 นอกจากนี้ยังมีการผสมสารกึ่งตัวนำในรูปแบบ Z-scheme junctions คือการนำสารกึ่งตัวนำที่ 1 ที่มีค่าแถบวาเลนซ์ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าค่าแถบการนำของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากชั้นแถบการนำของสารกึ่งตัวนำตัวที่ 2 ไปรวมกับโฮลที่ชั้นแถบวาเลนซ์ของสรกึ่งตัวนำตัวที่ 1 เป็นรูปแบบตัว Z เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 การเร่งการส่งผ่านประจุของสารกึ่งตัวนำ (a)การเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน (e^-) และช่องว่าง (h^+) (b)การเร่งการส่องผ่าน e^-แบบ Z-scheme junctions

ที่มา: www.researchgate.net

2.5.2.2 การเติมโลหะ

การเติมโลหะลงบนสารกึ่งตัวนำเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอน ซึ่งนิยมใช้โลหะที่มาช่วยประสิทธิภาพ เช่น Au, Ag และ Pt เป็นต้น ซึ่งจะมีตำแหน่ง Fermi level ของโลหะอยู่ต่ำกว่าชั้นแถบการนำของสารกึ่งตัวนำ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น

2.5.3 การพัฒนาลักษณะผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

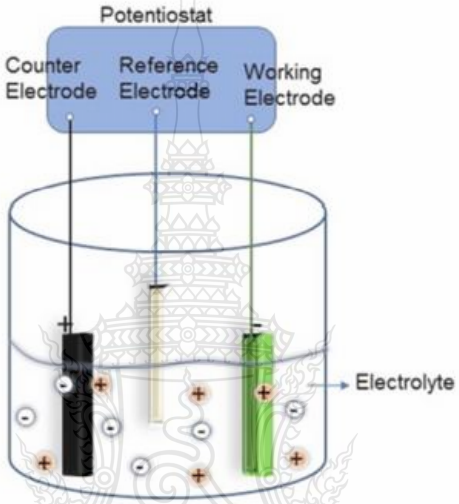
ลักษณะผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นบริเวณที่สารจะเข้ามาเคลือบเกาะติด ซึ่งในการพัฒนาลักษณะผิวหน้าขั้วไฟฟ้าคือการปรับปรุงพื้นผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าโดยทำให้ลักษณะผิวหน้ามีความขรุขระหรือมีพื้นที่ผิวมาก เพื่อให้มีการเกาะติดของสารที่เราต้องการให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีและเป็นบริเวณที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่จะเกิดที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาการเตรียมสารกึ่งตัวนำให้มีลักษณะฟิล์มต่างๆ เช่น ลักษณะเป็นท่อนาโน นาโนชีท นาโนดอท เป็นต้น หรือแม้แต่การตรึงสารกึ่งตัวนำร่วมกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

2.6 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

การพัฒนากระบวนการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำลงบนวัสดุรองรับ ถือเป็นอีกหัวข้อที่เป็นปัจจัยสำคัญและได้รับความสนใจในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก โดยเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวที่ดีต้องสามารถควบคุมคุณภาพของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี มีขั้นตอนการเตรียมไม่ยุ่งยากใช้สารเคมีไม่มากและไม่อันตราย ที่สำคัญคือต้องมีความเสถียรของฟิล์มบางที่ได้และต้องเป็นเทคนิคที่สามารถขยายขนาดสเกลได้ดี สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ในการใช้งานจริงได้อย่างหลากหลาย ซึ่งมีเทคนิคในการเตรียมฟิล์มสารกึ่งตัวนำที่หลากหลายที่นักวิจัยนิยมพัฒนาเพื่อเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เช่น วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process) และวิธีการตรึงสปัตเตอริง (Sputtering process) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี แต่มีขั้นตอนที่ค่อนข้างหลายขั้นตอนใช้สารเคมีเครื่องมือที่มีราคาแพง วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นักวิจัยนิยมพัฒนาเพื่อเตรียมฟิล์มบางที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก แต่อย่างไรก็ตามยังมีขีดจำกัดด้านการควบคุมความหนาของฟิล์มที่มีความเฉพาะเจาะจงและความสามารถในการขยายขนาดสเกล ดังนั้นการผสมผสานเทคนิคที่มีกระบวนการไม่ยุ่งยากได้ฟิล์มที่มีความคงทนมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยา และสามารถขยายสเกลได้ง่ายจึงเป็นเป้าหมายหลักของนักวิจัยในการพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก ซึ่งกระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating process) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับความสนใจพัฒนาเพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว เนื่องด้วยความสะดวกและความง่ายในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางและยังมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อยอดเพื่อการขยายสเกลในระดับที่ใหญ่ขึ้นได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคการจุ่มเคลือบยังต้องมีการพัฒนาเกี่ยวกับการควบคุมความหนาและการเตรียมซ้ำหลายๆ ครั้งให้มีความสม่ำเสมอกัน เนื่องจากการใช้คนจุ่มเคลือบไม่สามารถควบคุมความเร็วและระยะเวลาในการจุ่มให้เท่ากันได้ทุกครั้ง รวมถึงตำแหน่งมุมของการวางวัสดุรองรับขณะทำการจุ่มจะไม่เท่ากันในทุกๆ ครั้งและเมื่อขยายขนาดสเกลของวัสดุตัวรองรับให้มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้การจุ่มด้วยคนจะมีความยุ่งยากและไม่สามารถทำได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการพัฒนาเทคนิคการจุ่มเคลือบด้วยด้วยการใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine) ที่สามารถควบคุมอัตราเร็วและระยะเวลาในการจุ่มได้ ซึ่งเป็นเครื่องมือจุ่มเคลือบขนาดใหญ่สำหรับการขยายขนาดสเกลของการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำรองรับ โดยรายละเอียดวิธีการตรึงมีดังนี้

2.6.1 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process)

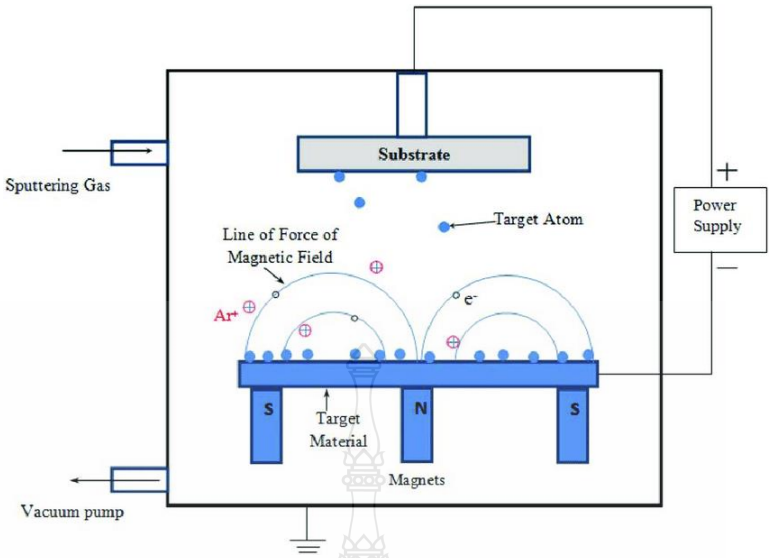
เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยใช้หลักการทางเคมี โดยทำการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้ากับสารละลายที่มีโลหะไอออนอยู่และเกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้โลหะไอออนหรือสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าด้านลบและเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งไปพอกพูนหรือเกาะติดอยู่ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าลบดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 วิธีการตรึงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition process)[1]

2.6.2 วิธีการตรึงแบบสปัตเตอริง (Sputtering process)

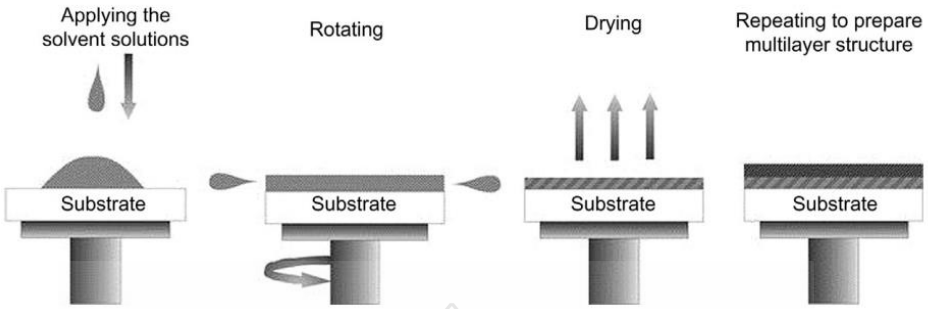
กระบวนการสปัตเตอริงคือ กระบวนการที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง (Thin film process) โดยใช้ไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition process; PVD) ที่อยู่ในสุญญากาศ โดยใช้หลักการส่งผ่านโมเมนตัมด้วยการปล่อยให้ผิวหน้าของของแข็ง (Target) ถูกระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานจลน์ อะตอมที่ผิวของแข็งจะหลุดกระเด็นออกมาเนื่องจากการชนกันระหว่างอะตอมที่ผิวและอนุภาคพลังงาน จากนั้นอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของแข็งนี้จะไปก่อตัวบนชิ้นงาน (Substrate) เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้นตามที่ต้องการ ข้อดีของเทคนิคนี้คือได้การเคลือบที่บริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปนมีการยึดติดเกาะที่แน่นหนา ผิวหน้าเรียบเนียนสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 วิธีการตรึงสปัตเตอริง (Sputtering process)[2]

2.6.3 วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

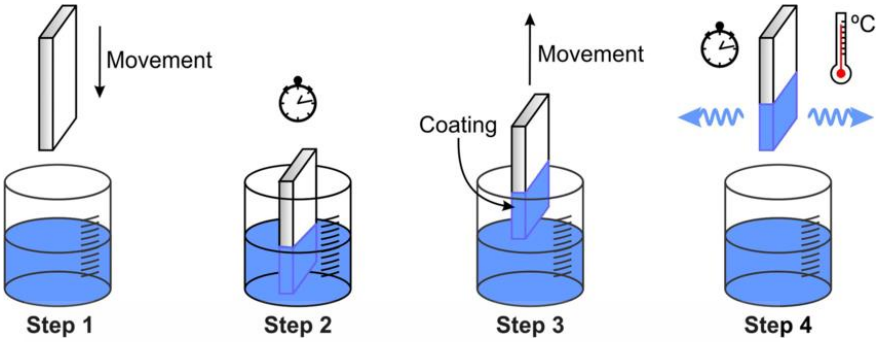
กระบวนการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) เป็น วิธีการเคลือบฟิล์มด้วยสารเคลือบที่เป็นของเหลวโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง เมื่อทำการหยดสารเคลือบที่เป็นของเหลวบนจุดศูนย์กลางของวัสดุรองรับหรือชิ้นงาน (Substrate) จากนั้นทำการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงสารเคลือบจะเกิดการกระจายตัวไปทั่ววัสดุรองรับเกิดเป็นชั้นฟิล์มเคลือบบนผิวหน้าวัสดุ ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ความหนืดของสารเคลือบ (Viscosity) ที่ต่างกันและความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนกับระยะเวลาที่ใช้ในการหมุน การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงมี 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ดังนี้ (1) ขั้นตอน Deposition คือการหยดสารเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่ติดตั้งบนฐานหมุน (2) ขั้นตอน Spin-up คือการหมุนวัสดุฐานรองรับด้วยความเร็วสูงโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนกับระยะเวลาในการหมุนเพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ (3) ขั้นตอน Spin-off คือการหยุดหมุนวัสดุฐานรองรับตามเวลาที่กำหนดในขั้นตอนนี้สารเคลือบจะกระจายทั่วผิววัสดุรองรับ (4) ขั้นตอน Evaporation คือขั้นตอนการระเหยสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องหรือไม่ต้องการออกไปเพื่อให้โมเลกุลของสารที่ต้องการเกิดการฟอร์มตัวโดยจะนิยมใช้ความร้อนช่วยในการระเหย



ภาพที่ 2.8 วิธีการตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating process)[3]

2.6.4 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating process)

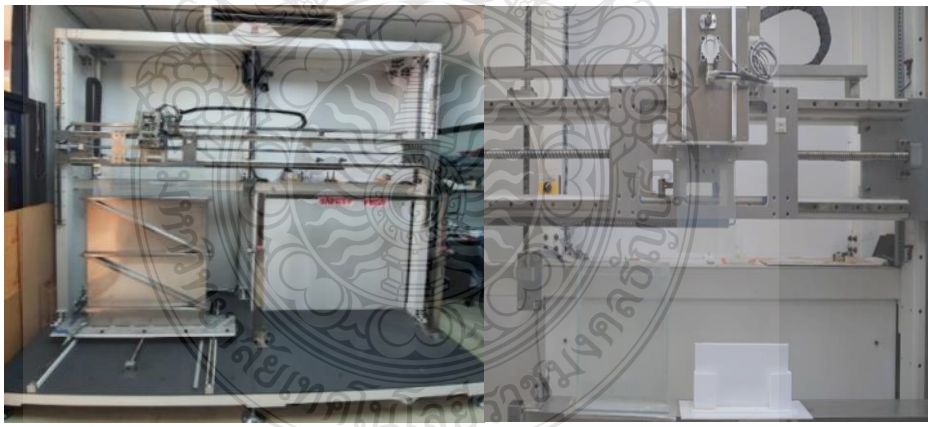
การเคลือบแบบจุ่ม (Dip Coating) เป็นวิธีการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์ม บาง โดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวตัวรองรับ ทำได้โดยนำวัสดุรองรับจุ่มลงในสารละลายสารกึ่งตัวนำจากนั้นสารละลายจะเข้ามาเคลือบบนพื้นผิวอย่างช้าๆ เมื่อทำการจุ่มเรียบร้อยแล้วจะนำวัสดุรองรับที่มีแผ่นฟิล์มเคลือบไปให้ความร้อนเพื่อทำให้ฟิล์มสามารถยึดติดบนผิวของแผ่นรองรับได้ดี ขั้นตอนในการจุ่มเคลือบ มี 4 ขั้นตอนด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ดังนี้ (1) การจุ่มลง (Immersion) เป็นขั้นตอนการนำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบมาจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ (2) การดึงขึ้น (Retract) เป็นขั้นตอนของการดึงวัสดุรองรับที่จุ่มเคลือบขึ้นจากสารละลาย ซึ่งขณะดึงขึ้นควรควบคุมความเร็วในการดึงให้คงที่เพื่อให้สารละลายสามารถเกาะติดวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอ (3) การเกาะติด (Deposition) เป็นขั้นตอนที่ใช้พิจารณาความสามารถของสารละลายว่าสามารถเกาะติดกับพื้นผิวของวัสดุรองรับได้หรือไม่ ถ้าสารละลายไม่สามารถเกาะติดกับผิววัสดุได้สารละลายจะไหลออกจากผิววัสดุทำให้การเคลือบผิววัสดุเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และไม่มีความสม่ำเสมอ และ(4) การระเหย (Evaporation) เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารละลายที่เกาะติดอยู่ที่พื้นผิววัสดุรองรับมีลักษณะคล้ายกับเจลหรือแผ่นฟิล์ม เนื่องจากมีการระเหยสารละลายบางส่วนออกไปทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นและจะเกิดการยึดเกาะบนผิวของวัสดุรองรับ



ภาพที่ 2.9 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating process)[4]

2.6.5 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process)

เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวอย่างช้าๆ เช่นเดียวกันกับเทคนิคการจุ่มเคลือบที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยมีการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้เครื่องจุ่มเคลือบที่มีความสามารถในการควบคุมอัตราเร็วและระยะเวลาในการจุ่ม ซึ่งเป็นเครื่องมือจุ่มเคลือบขนาดใหญ่เพื่อการขยายขนาดสเกลของการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ เพื่อรองรับการพัฒนาต่อยอดกับการออกแบบระบบที่มีขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วิธีการตรึงแบบจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (Automatic dip coating machine process)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารฆ่าแมลงถูกใช้จำนวนมากสำหรับเกษตรกรสำหรับฉีดบนผักผลไม้เพื่อควบคุมและกำจัดแมลงที่เป็นศรัตรูพืช ทั้งผักและผลไม้เพื่อทำให้ผักผลไม้มีผิวที่น่ารับประทานและได้ราคาสูงก่อนการจำหน่าย แต่อย่างก็ตามสารฆ่าแมลงที่ตกค้างที่ผักและผลไม้ดังกล่าวถือเป็นสารเคมีอันตรายที่มีพิษรุนแรงมากต่อผู้บริโภคซึ่งอาจถึงชีวิตได้[5-8] โดยเฉพาะสารฆ่าแมลงบางตัวจะมีสมบัติคงทนสูง ทำให้ยากต่อการกำจัดตัวอย่างเช่น สารพวก Thiamethoxam ซึ่งเป็นสารกำจัดศรัตรูพืชที่นิยมนำมาเป็นสารฆ่าแมลงจำพวกหนอน เพลี้ย ในผักผลไม้ [9, 10] นอกจากนี้สารดังกล่าวยังสามารถละลายน้ำได้ดีทำให้มีโอกาสหลุดไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เช่น Cypermethrin (หรือ Pyrethroid) [11-13] ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการตกค้างของยาฆ่าแมลงดังกล่าวเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเคมีอันตรายที่ตกค้างที่ผักและผลไม้ดังกล่าว จากการศึกษาพบว่ามีวิธีการหลากหลายในการกำจัดสารฆ่าแมลงที่ปนเปื้อนบนผัก ผลไม้ เช่น การล้างด้วยน้ำซึ่งจะละลายได้เฉพาะสารฆ่าแมลงที่ละลายน้ำได้ดีเท่านั้น แต่ส่วนใหญ่สารฆ่าแมลงจะเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำและถูกดูดซึมที่ผิวของผักและผลไม้ซึ่งการล้างด้วยน้ำจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสารฆ่าแมลงได้น้อยมาก นอกจากนี้ ยังมีการล้างหรือแช่ผักผลไม้ที่ผสมสารเคมีเช่น ด่างทับทิม ผงฟู น้ำเกลือ หรือสารประกอบคลอรีน [14-16] แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเรื่องสารเคมีตกค้างในระบบซึ่งจะเป็นอันตรายกับผู้บริโภคได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารกำจัดศรัตรูพืชดังกล่าว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมคือ เทคนิคที่เน้นการหลักการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation process)[17] เช่น การใช้โอโซนโดยการใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่มีสมบัติในการออกซิไดซ์สูงแต่อย่างไรก็ตามก๊าซโอโซนเป็นสารที่ละลายในน้ำได้น้อยมากทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายน้ำลดลง[18, 19] เทคนิคโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์อันตรายภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง [20-24] โดยใช้สารกึ่งตัวนำในรูปของอนุภาคเดี่ยวๆทำงานภายใต้การเร่งด้วยแสงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามเทคนิค Photocatalytic ซึ่งยังมีข้อจำกัดหลายข้อที่ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องด้วยการเกิดการรวมกันของ e^- กับ h^+ (Recombination effect) และความสะดวกในการใช้งานจริงเนื่องจากยังต้องมีขั้นตอนในการนำสารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการออกจากระบบอีกขั้นตอนหนึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากไม่สะดวกในการทำงานจริง จึงได้มีการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวโดยการตรึงสารกึ่งตัวนำลงบนขั้วไฟฟ้าแล้วเพิ่มการให้ศักย์ไฟฟ้าร่วมกับการให้แสงเข้าไปเพื่อลดผลของการเกิด Recombination effect และทำให้มีความสะดวกในการนำออกจากระบบทำให้ง่ายต่อการปฏิบัติงานจริง ซึ่งเรียกเทคนิค

ดังกล่าวว่า โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) [17, 25-27] และถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่รวมเอาเทคนิค อิเล็กโตรคะตะไลติก (Electrocatatic; EC) และ โฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic; PC) เข้าด้วยกันทำให้ได้เทคนิคใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงมากสามารถกำจัดสารอินทรีย์อันตรายให้กลายเป็น CO_2 และ H_2O ซึ่งไม่เกิดการตกค้างของสารเคมีอันตรายในระบบและที่สำคัญมีความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานจริงจากรายงานการวิจัยนิยมใช้สารกึ่งตัวนำ TiO_2 ในเทคนิค PEC กันอย่างแพร่หลาย[28] เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก และมีความเสถียร แต่อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำ TiO_2 ยังมีข้อจำกัดเรื่องการดูดกลืนได้เฉพาะแสงช่วงอัลตราไวโอเลต (UV) ซึ่งมีปริมาณน้อยมากในช่วงแสงธรรมชาติประมาณ 3-5% ในแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) กว้างซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับแสงในธรรมชาติ ดังนั้นทางเลือกที่ดีในการพัฒนาขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การใช้สารกึ่งตัวนำผสมที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็น และมีศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งแถบการนำและแถบวาเลนซ์เหมาะสมในการช่วยส่งผ่านประจุทั้ง e^- และ h^+ ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่าง WO_3 และ TiO_2 [29] หรือการใช้สารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นได้ดี เช่น $BiVO_4$ [30, 31], WO_3 [32, 33], Bi_2WO_6[34, 35] หรือ Fe_2O_3[36] ปัจจัยสำคัญอีกอย่างในการควบคุมคุณภาพและประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำคือกระบวนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดังกล่าว ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น เทคนิคการหมุนเหวี่ยง (Spin coating)[33, 37] ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างง่าย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความสามารถในการออกแบบและ ควบคุมความหนาของฟิล์มสารกึ่งตัวนำให้มีความเฉพาะเจาะจงและ ที่สำคัญคือการขยายขนาดของขั้วไฟฟ้ายังเป็นปัญหาสำคัญของเทคนิคดังกล่าว เทคนิคสปัตเตอริง (sputtering) [38, 39] เป็นการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะสุญญากาศที่สามารถควบคุมคุณภาพและความหนาของฟิล์มบางที่ผิวหน้าวัสดุรองรับ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดด้านราคาของเครื่องมือและความสามารถในการขยายขนาดสเกล ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคที่สามารถตรึงสารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการไม่ยุ่งยาก งบประมาณไม่แพง และสามารถขยายขนาดสเกลได้ดี จึงเป็นเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาเทคนิคการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำบนผิววัสดุรองรับ การตรึงด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดเทคนิคพื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้เป็นอย่างดี[40-45] โดยเทคนิคการตรึงฟิล์มด้วยเคมีไฟฟ้ามีความหลากหลายในกระบวนการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นมาเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าวัสดุเพื่อให้เกิดการเกาะติดด้วยแรงทางเคมีไฟฟ้าทำให้คุณสมบัติของฟิล์มบางที่ได้มีความแข็งแรงและคงทน ที่สำคัญลักษณะฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอกระจายทั่วทั้งแผ่นวัสดุรองรับ[46-48] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาเทคนิคเคมีไฟฟ้าในการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ เมื่อได้

ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพแล้ว สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งในการพัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก คือ การออกแบบเซลล์ต้นแบบ ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเป้าหมายที่ต้องการนำไปประยุกต์ใช้งาน[49] ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม ยังไม่มีรายงานการพัฒนานวัตกรรมเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักและผลไม้ ที่สามารถใช้งานในระบบจริงได้

จากการสืบค้นสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรทั้งในและต่างประเทศ พบว่ามีการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องล้างผักผลไม้ในรูปแบบต่างๆ ดังนี้ อนุสิทธิบัตรไทยเลขที่ 11363 (2559) และ 13591 (2561) ได้พัฒนาเครื่องล้างผักและผลไม้ระบบน้ำวนและฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวี โดยมีระบบโครงสแตนเลสและระบบไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงาน อย่างไรก็ตามสิ่งประดิษฐ์ดังกล่าว ยังต้องใช้หลอดแสงยูวีที่ต้องใช้พลังงานสูงมีความความเสี่ยงต่อผู้ใช้ นอกจากนี้ยังมีสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16412 (2563) ได้พัฒนาและออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักด้วยระบบโอโซนซึ่งสามารถฆ่าเชื้อโรคได้แต่มีข้อจำกัดเรื่องความแรงในการออกซิไดซ์ของโอโซนส่งผลต่อลักษณะผิวของผักผลไม้ ทำให้ลักษณะไม่น่ารับประทาน สำหรับสิ่งประดิษฐ์ต่างประเทศพบว่ามีสิทธิบัตรประเทศสหรัฐอเมริกา เลขที่ US20060078661A1 เป็นเครื่องล้างผักผลไม้ที่สามารถฆ่าเชื้อที่มีลักษณะเด่นคือภาชนะที่ออกแบบ ให้เกิดการหมุนของตะกร้าประกอบกับเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้สร้างความถี่ในการสั่นสะเทือนสามารถเขย่าสิ่งสกปรกและสารพิษออกไปได้ มีระบบผลิตโอโซนให้ละลายในน้ำผ่านระบบฟองอากาศเพื่อการฆ่าเชื้อโรค ด้านล่างมีอุปกรณ์ระบายน้ำอัตโนมัติ สิทธิบัตรยุโรปEP2005846A1 ได้พัฒนาวิธีการและอุปกรณ์การล้างผักและผลไม้แบบประหยัดน้ำ โดยออกแบบระบบสเปรย์ล้างที่ปรับระดับให้ไหลอย่างมีปรประสิทธิภาพเพื่อประหยัดน้ำ ตะกร้าหมุนไปในทิศทางของการไหลของน้ำ รวมกับการล้างด้วยโอโซนแบบหมุนวน ส่วนด้านล่างของรางล้างมีระบบการจ่ายน้ำไหลย้อนกลับพร้อมท่อระบายน้ำ

จากการศึกษาดังกล่าวพบว่ายังไม่มีเครื่องล้างผักผลไม้ที่มีหลักการด้านโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ คล้ายกับงานวิจัยที่เสนอนี้ ดังนั้นผู้วิจัยมั่นใจเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีความใหม่และมีความเป็นไปได้สูงในพัฒนานวัตกรรมเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับล้างผักเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนในผักและผลไม้ ด้วยจุดแข็งของเทคนิคดังกล่าวจะสามารถพัฒนาประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีและที่สำคัญจะสามารถพัฒนาขยายสเกลเพื่อประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคตต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
1. กรดไดเอทิลีนไทรเอมีนเพนทาอะเซทิก (Diethylenetriamine pentaacetic acid ; DTPA)	Analytical reagent	SIGMA
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH)	Analytical reagent	J.T.Baker
3. บิสมัท (III) ออกไซด์ (Bismuth (III) oxide; Bi_2O_3)	Analytical reagent	ALDRICH
4. แอมโมเนียมเมทะทังสเตทไฮเดรท (Ammonium metatungstate hydrate; $(NH_4)_6H_2W_{12}O_{40} \cdot H_2O$)	Analytical reagent	ALDRICH
5. กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3)	Analytical reagent	Univar
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2)	Analytical reagent	Chem-supply
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)	Analytical reagent	Univar
8. เอทานอล (Ethanol; C_2H_5OH)	Analytical reagent	Rcl Lab scan
9. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)	Analytical reagent	Univar

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
10. กรดทังสติก (Tungstic acid; H_2WO_4)	Analytical reagent	Sigma-aldrich
11. บิสมัท (III) ไนเตรท เพนตะไฮเดรต (Bismuth (III) nitrate pentahydrate; $Bi(NO_3)_3 \bullet 5H_2O$)	Analytical reagent	Sigma-Aldrich
12. วานาเดียม (IV) ออกไซด์ อะซีติลอะซิโตเนท (Vanadium (IV) oxide acetylacetonate; $C_{10}H_{14}O_5V$)	Analytical reagent	Merk
13. กรดอะซีติก (Acetic acid; CH_3COOH)	Analytical reagent	RCI Lab scan
14. อะซีติล อะซีโตน (Acetylacetone; $CH_3COCH_2COCHA_3$)	Analytical reagent	Penreac
15. สีผสมอาหาร (Orange red color)	-	ฟาร์มาเคม
16. ดีเทอร์เจน (Detergent)	-	Teepol pure
17. คลอร์ไพริฟอส (Chlorpyrifos 30% W/V)	-	คลอร์ไพริฟอส
18. ไตรอะโซฟอส (Triazophos 40% W/V)	-	ไปเปอร์
19. ไซเพอร์เมททริน (Cypermethrin 35% W/V)	-	ไซมา35
20. แลมด้าไซฮาโลทริน (Lamda-cyhalothrin 2.5% W/V)	-	แลมด้าทรีน
21. ฟีโนบูคาร์บ (Fenobucarb 50% W/V)	-	ฟีโนเต้

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
1. กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped Tin Oxide : FTO)	-	Bangkok Solar Co., Ltd. Thailand.
2. สายไฟ (Copper wire)	UL 1007	ALPS
3. อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)	DURO 20	Pettex, Thailand
4. ตู้ดูดควัน (Hood)	-	VATIGUL, Thailand
5. เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)	MSH-20A	Wisd, China
6. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)	WUC-A02H	Wisd, China
7. เตาเผา (Furnace)	-	Wisd, China
8. เครื่องวัดประมาณค่าทางไฟฟ้า (Multimeter)	PM3	Sanwa
9. หัวแร้งบัดกรี	Model CT-30B	SOLDERING IRON
10. เครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (Electrochemical analysis)	Polarization unit PS 07	Ametek
11. เครื่องจ่ายไฟดีซี (DC power supply)	NPS306W	WANPTEK
12. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter)	FG2-l	Mettler Toledo, Thailand
13. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)	Ag/AgCl	-
14. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode)	Pt	-

เครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
15. ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล (Stainless steel)	-	-
16. หลอดไฟ UV (UV Lamp)	-	UV LED Black, China
17. เครื่องวัดยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)	UV-1601	SHIMADZU, Japan
18. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	JSM 6510	JEOL
19. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis)	RINT 200HT	Rigaku
20. เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-Ray System)	Oxford INCA x-act	OXFORD
21. เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy)	JPS-9010TR	JEOL

3.2 การทดลอง

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ 1. ขั้นตอนการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเทคนิคจุ่มเคลือบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ 2. ขั้นตอนการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อการกำจัดสารอินทรีย์สารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ และ3. ขั้นตอนการพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักผลไม้โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแอโนด

เป็นการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าจากสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยจะพัฒนาการตรึงสารกึ่งตัวนำคือ Bi_2WO_6-WO_3 โดยใช้เทคนิคการตรึงแบบเคมีไฟฟ้า และสารกึ่งตัวนำ WO_3 กับ $BiVO_4$ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบโดยใช้เครื่องจุ่มเคลือบ (Dip coating machine) โดยได้

ศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ เช่น ชนิดสารกึ่งตัวนำ จะเน้นการใช้กระจกนำไฟฟ้าเป็นวัสดุที่ใช้เป็นตัวรองรับ (Substrate) จะศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการตรึงด้วยเทคนิคการตรึงแบบเคมีไฟฟ้า เช่น การควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นค่ากระแส ระยะเวลาในการตรึง ศึกษาความเสถียรของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเน้นเรื่องประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ จะศึกษาสมบัติด้านเคมีไฟฟ้า ความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า สมบัติด้านการดูดกลืนแสง ลักษณะสัณฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึกของฟิล์มสารกึ่งตัวนำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

3.2.1.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า FTO รองรับ

ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ขนาด 2x3 เซนติเมตร ด้วยการ Sonicate กับดีเทอร์เจน เป็นเวลา 10 นาที ตามด้วย 3 M NaOH เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตามด้วยเอทานอล 10 นาที และน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้ผิวของกระจกแห้งสนิทก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนการตรึงต่อไป

3.2.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

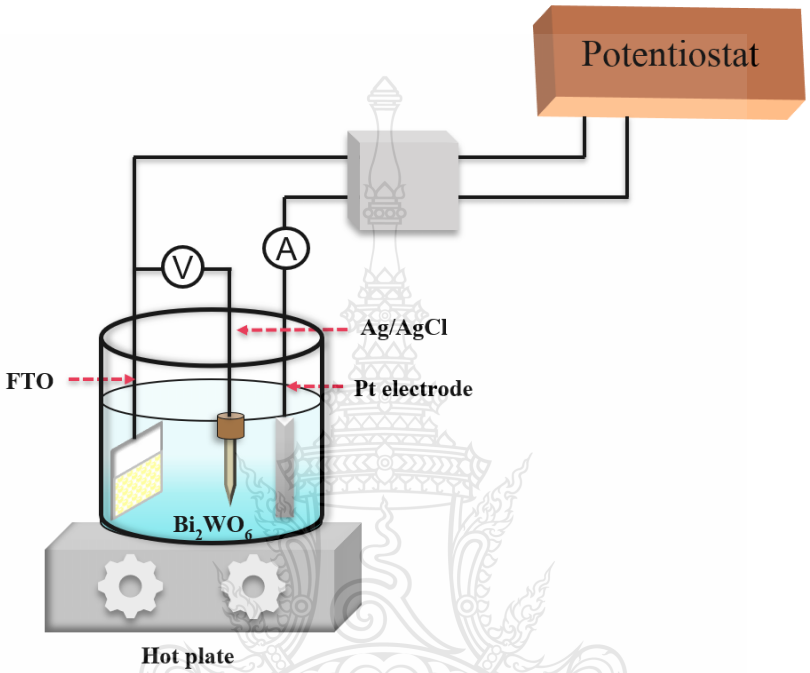
- การเตรียมสารละลาย Bi_2WO_6-WO_3

เตรียมได้จากการชั่งสาร Diethylenetriamine penta acetic acid (DTPA) 0.83 กรัม ละลายใน 2.5 มิลลิลิตร ของแอมโมเนีย 30% (NH_4OH) และเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย และคนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นเติม 0.4 กรัม Bismuth(III) oxide (Bi_2O_3) และ Ammonium metatungstate hydrate ($(NH_4)_6H_2W_{12}O_{40}$ H_2O) 0.15 กรัม หลังจากนั้นคนให้เข้ากันภายใต้การควบคุมอุณหภูมิที่ 80 ℃ จนสารละลายหมด เติมกรดไนตริก (HNO_3) 1,190 ไมโครลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 77 ไมโครลิตร กวนต่อไปที่ 80 ℃ เป็นเวลา 15 นาที และนำไปตรึงด้วยเทคนิคไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค Cyclic voltammetry deposition (CV)

- กระบวนการตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ลงบนตัวรองรับ FTO

เมื่อทำความสะอาดกระจก FTO เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry ในสารละลาย Bi_2WO_6-WO_3 ดังภาพที่ 3.1 แสดงการตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยมีขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode): FTO ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode): Pt และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference

electrode): Ag/AgCl ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง 0.8 V ควบคุมอุณหภูมิที่ 80°C ตลอดระยะเวลาการตรึง และศึกษาอัตราการสแกนที่ 10, 25, 50, 75, 100 และ 125 mV/s, จำนวนของการตรึงคือ 30 รอบ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จแล้วจะทำการต่อสายไฟ ปิดรอยต่อด้วย Epoxy resin และปล่อยให้แห้ง จะได้ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3



ภาพที่ 3.1 การตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าแบบ Cyclic voltammetry

จากนั้นนำขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่ได้จากสภาวะการศึกษาต่างๆ ไปศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสภาวะการศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าและเทคนิคหรือเครื่องมือที่ใช้ศึกษา

สภาวะการศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้า	เทคนิคหรือเครื่องมือที่ใช้ศึกษา
ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก	Electrochemical Analyzer (Amperometry)
ศึกษาความต้านทานและประจุทางเคมีไฟฟ้า	Electrochemical Analyzer (EIS)
ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง	UV-Vis Spectrophotometer
ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา	Scanning Electron Microscope (SEM)
ศึกษาโครงสร้างผลึก	X-ray Diffractometer (XRD)

3.2.1.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบ

- การเตรียมสารละลาย WO_3

เตรียมสารละลาย Tungstic acid (WO_3) 0.1 M จากกรดทังสติก (H_2WO_4) 24.985 กรัม ละลายใน 30% Ammonia (NH_4OH) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการ reflux ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายใสไม่มีสีแล้วนำสารละลายที่ได้มา sonicate เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปจุ่มเคลือบในขั้นตอนต่อไป

- การเตรียมสารละลาย $BiVO_4$

เตรียมสารละลาย 0.1 M Bismuth (III) nitrate pentahydrate ($Bi(NO_3)_9$•$5H_2O$) โดยชั่ง 24.254 กรัม ละลายใน Acetic acid 500 มิลลิลิตร และเตรียม 0.1 M Vanadium (IV) oxide acetylacetonate ($C_{10}H_{14}O_5V$) โดยชั่ง 13.258 กรัม ละลายใน Acetyl acetone 500 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย $BiVO_4$ สีเขียวอมฟ้า แล้วนำสารละลายที่ได้มา sonicate เป็นเวลา 120 นาที หลังจากนั้นเก็บสารละลายไว้ในที่มืด 1 คืน เพื่อรอให้ตกตะกอนก่อนนำส่วนสารละลายไปจุ่มเคลือบในขั้นตอนต่อไป

- กระบวนการตรึงสารกึ่งตัวนำ WO_3/$BiVO_4$ ลงบนตัวรองรับ FTO

นำกระจก FTO ไปจุ่มเคลือบในสารละลาย WO_3 ในอัตราเร็วคงที่ด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติสารละลายจะเกาะติดบนผิวหน้า จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที หลังเผาเสร็จนำไปจุ่มเคลือบด้วย $BiVO_4$ ในอัตราเร็วการจุ่มเคลือบคงที่ด้วยเครื่องจุ่มอัตโนมัติ สารละลายมาเกาะติดบนผิวหน้า จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จแล้วจะทำการต่อสายไฟ ปิดรอยต่อด้วย Epoxy resin และปล่อยให้แห้ง จะได้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$

3.2.1.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะและประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า

เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆของขั้วไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่ตรึงด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า และขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่ตรึงด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ ที่สภาวะที่ดีที่สุดทั้งคุณสมบัติการดูดกลืนแสง ความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก จากนั้นเลือก

ขั้วไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้สำหรับศึกษาและออกแบบต้นแบบเครื่องล้างผักด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกต่อไป

3.2.1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง

นำขั้วไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm และคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Bandgap Energy) จากสูตร **Eg=1240/λ** โดยค่า Eg คือค่าแถบช่องว่างพลังงาน และ **λ** คือค่าความยาวคลื่น (nm)

3.2.1.4.2 ศึกษาสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า

นำขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการพัฒนาขึ้นมาเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า Electrochemical analysis และศึกษาหาความต้านทานและความจุทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) เพื่อยืนยันสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์

3.2.1.4.3 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก โดยนำขั้วไฟฟ้าที่เราพัฒนาขึ้นมาวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยค่าที่ได้นี้มาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Amperometry) เป็นเวลา 90 วินาที โดยสลับสภาวะให้แสงและไม่ให้แสงทุกๆ 10 วินาที จนครบตามเวลา ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ในการวิเคราะห์ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) คือ FTO/Bi_2WO_6-WO_3 หรือ FTO/WO_3/$BiVO_4$ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) คือ Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) คือ Pt

3.2.1.4.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์

ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก โดยติดตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer โดยพิจารณาการลดลงของสารอินทรีย์สีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm เป็นระยะเวลา 20 นาที ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M

NaCl ในการวิเคราะห์ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดคือขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ และใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ Stainless steel

3.2.2 การศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า โดยจะศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงและศักย์ไฟฟ้า ศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทั้งการเร่งด้วยแสงและการเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า โดยติดตามการลดลงของสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm เป็นระยะเวลา 20 นาที ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer เพื่อใช้ในการทำความเข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าและใช้ในการทำนายและออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งได้ศึกษาในสภาวะดังต่อไปนี้

- ศึกษาภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง (Photocatalysis; PC)
- ศึกษาภายใต้สภาวะเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalysis; EC)
- ศึกษาภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalysis; PEC)
- ศึกษาสภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การเร่งด้วยแสง (Light)
- ศึกษาสภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การไม่มีแสง (Dark)

3.2.3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้ากับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้

ศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นที่สภาวะที่ดีที่สุดกับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก สำหรับการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ โดยเน้นผักและผลไม้เป้าหมายที่มีการใช้สารฆ่าแมลงสูง เช่น ถั่วฝักยาว และแอบเปิ้ล จากสวนของเกษตรกรและจากแผงขายผักผลไม้โดยตรง ทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ตกค้างจริงก่อนและหลังผ่านระบบด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน ซึ่งได้ศึกษาในระดับสเกลห้องปฏิบัติการจนได้ประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว จากนั้นได้ศึกษาการเพิ่มขนาดของระบบเพื่อใช้เป็นเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ของงานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นต่อไป โดยศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์และประเมินความเป็นไปได้สำหรับการขยายขนาดสเกลเพื่อใช้จริงต่อไป ดังนี้

- ศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า
- ศึกษาลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด
- ศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์
- ศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้า
- ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง
- ศึกษาพื้นที่ผิวในการทำงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด
- ศึกษาความสามารถในการกำจัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์
- ศึกษาปริมาณแสงที่เหมาะสม
- ศึกษาผลของทิศทางการไหลเวียนของสารละลายในระบบ
- ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายในระบบ
- ศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและความเสถียรของขั้วไฟฟ้า
- เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงในผักของเครื่องล้างผักเซลล์ต้นแบบกับเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด
- ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอธิบายผล

4.1 ผลของการพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition

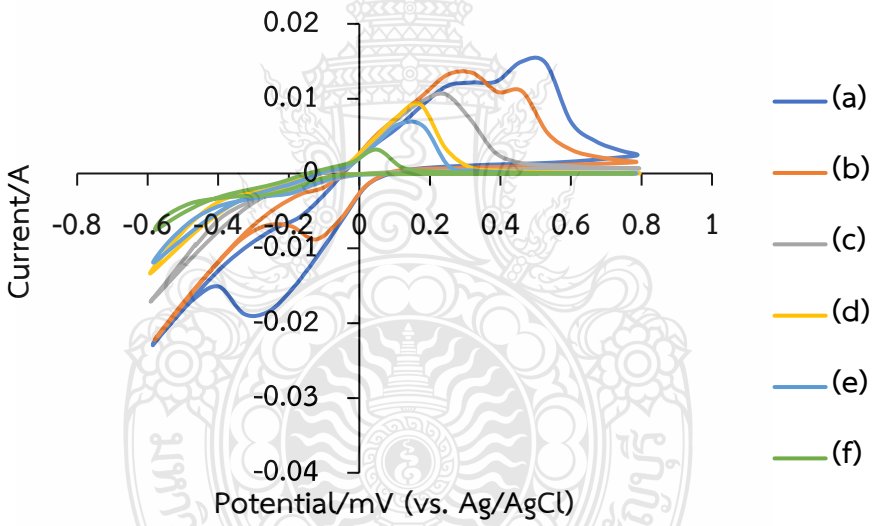
การศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเป็นการตรึงสารกึ่งตัวนำลงบนกระจกไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดทำงานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ตรึงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry โดยให้ศักย์ไฟฟ้าไปทางลบที่ -0.6 V สแกนไปทางศักย์ไฟฟ้าทางบวกที่ +0.8 V

4.1.1 ผลการศึกษาอัตราการสแกน (Scan rate)

4.1.1.1 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของสารกึ่งตัวนำในการตรึงขั้วไฟฟ้า

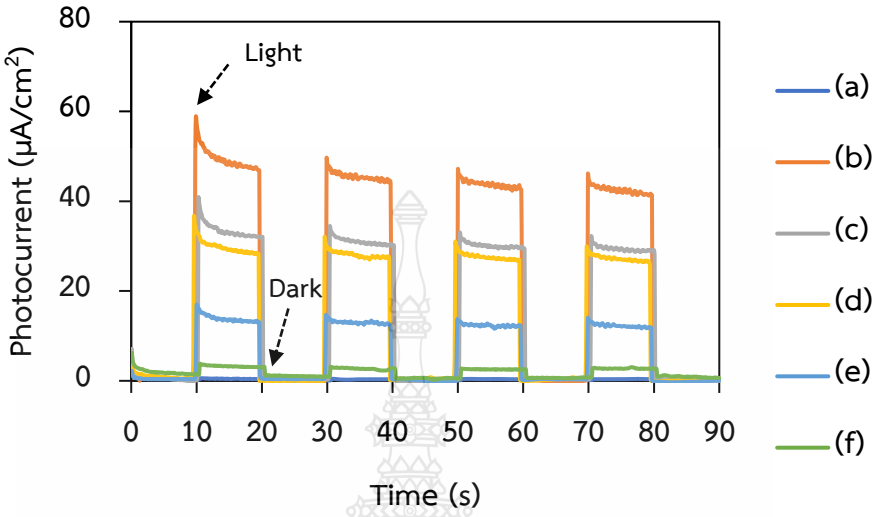
เพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เราพัฒนาขึ้น โดยตรึง Bi_2WO_6-WO_3 ลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO อัตราการสแกนที่ใช้ศึกษาสำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าคืออัตราการสแกนที่ 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s ซึ่งได้ศึกษาลักษณะโวล แทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าในระหว่างการตรึงในสารละลายตั้งต้น โดยได้เปรียบเทียบอัตราการสแกนที่แตกต่างกันในการเกิดปฏิกิริยาการตรึงฟิล์มของ Bi_2WO_6-WO_3 ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO ดังแสดงในภาพที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่ากราฟ Cyclic voltammograms ที่เราให้ศักย์ไฟฟ้าทางลบช่วง 0.0 ถึง -0.6 V ขั้นตอนนี้จะเกิดค่ากระแสจากปฏิกิริยารีดักชันของสารตั้งต้น (precursor solution) ที่ทำให้เกิดฟิล์มบาง Bi_2WO_6-WO_3 มาเกาะบริเวณพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน FTO พบว่าเกิดค่ากระแสจากปฏิกิริยารีดักชันมากที่อัตราการสแกนที่ต่ำ และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนในการตรึงสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นในช่วง 10 – 125 mV/s แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการสแกนช้าๆ ในช่วงศักย์ไฟฟ้าด้านลบซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

จากการเกิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ได้ดี และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไปทางบวก ช่วง 0.0 ถึง +0.8 V จะเกิดค่ากระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากสารปนเปื้อนและสาร precursor ที่เป็นส่วนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 พบว่าที่อัตราการสแกนช้าๆ จะเกิดกระบวนการออกซิเดชันเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนและสารละลาย precursor ส่วนเกินได้มากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่าสาเหตุเกิดจากในช่วงกระบวนการตรึงสารกึ่งตัวนำที่อัตราการสแกนช้าๆ สารตั้งต้น (precursor) ที่ทำให้เกิดฟิล์มบาง Bi_2WO_6-WO_3 เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 อย่างช้าๆ และเกิดการเกาะติดเป็นฟิล์มในปริมาณที่มากกว่าที่สภาวะอัตราการสแกนที่เร็วกว่า นอกจากนี้กระบวนการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรียังมีจุดเด่นอีกเรื่องคือความบริสุทธิ์ของฟิล์มบางคือเมื่อสแกนศักย์ไฟฟ้าไปด้านบวกขณะตรึงฟิล์มจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารปนเปื้อนหรือสาร precursor ที่มากเกินพอให้หลุดออกมาจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า



ภาพที่ 4.1 กราฟ Cyclic voltammograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากการศึกษาผลของอัตราการสแกนที่แตกต่างกันในการตรึงสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 มีค่าเท่ากับ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s และ (f)125 mV/s

4.1.1.2 สมบัติทางโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ



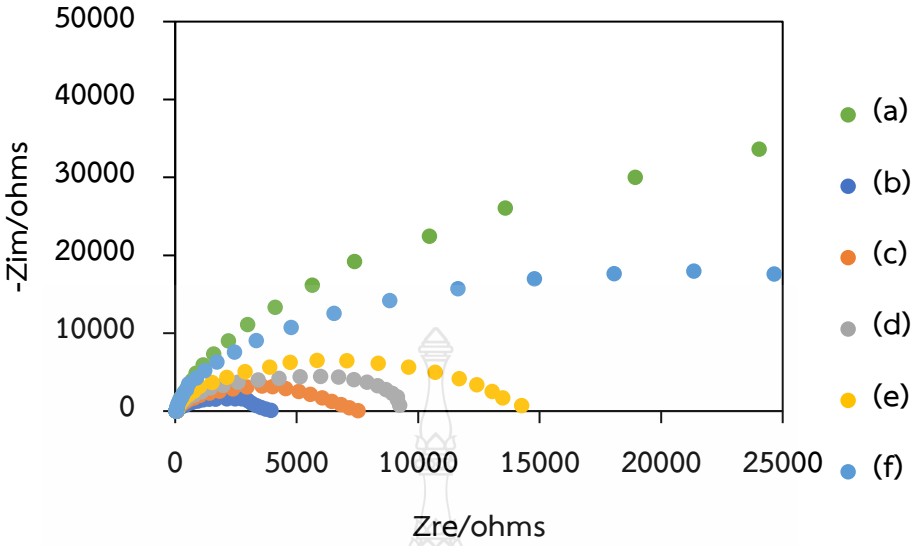
ภาพที่ 4.2 กราฟ Amperograms ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s และ (f)125 mV/s

จากผลของการศึกษาสมบัติทางโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราสแกนที่ 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราสแกน 10 mV/s มีค่ากระแสไฟฟ้าจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำต่ำสุด เกิดจากการสะสมของฟิล์มบาง Bi_2WO_6-WO_3 มากจนเกินไปส่งผลทำให้อัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวของขั้วไฟฟ้านั้นลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการสแกนเป็น 25 mV/s พบว่าขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมได้มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดและในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนเร็วเพิ่มขึ้นที่ 50, 75, 100, 125 mV/s พบว่าขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมได้มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงตามลำดับ เนื่องจากอัตราการสแกนเร็วขึ้นส่งผลทำให้การสะสมและการจัดเรียงตัวของอนุภาคของฟิล์ม Bi_2WO_6-WO_3 ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าลดลงหรือไม่เหมาะสม จึงทำให้กระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมได้มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลาย

น้ำลดลงตามลำดับ งานวิจัยนี้ค้นพบว่าอัตราการสแกนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิค Cyclic voltammograms คือ 25 mV/s

4.1.1.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานและประจุทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของอัตราการสแกนที่มีต่อค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนกับอิเล็กโทรไลต์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราการสแกนที่ 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่อัตราการสแกนที่ 10 mV/s ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงมีรัศมีครึ่งวงกลมที่ใหญ่ที่สุดของการพล็อต Nyquist ของขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 บ่งบอกถึงค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าในการถ่ายโอนประจุที่มากที่สุดแสดงถึงอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้ามีค่าต่ำซึ่งสอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากภาพที่ 4.2 ก่อนหน้านี้ และรัศมีครึ่งวงกลมที่เล็กที่สุดของพล็อต Nyquist ของขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราการสแกนที่ 25 mV/s บ่งบอกถึงค่าความต้านทานการถ่ายโอนประจุต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสูงที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าหรือทำได้ดี ผลลัพธ์ที่ได้นี้ช่วยทำให้มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีถึงผลของอัตราการสแกนที่แตกต่างกันในการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีซึ่งมีความสำคัญในการควบคุมค่าความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้าในระบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี



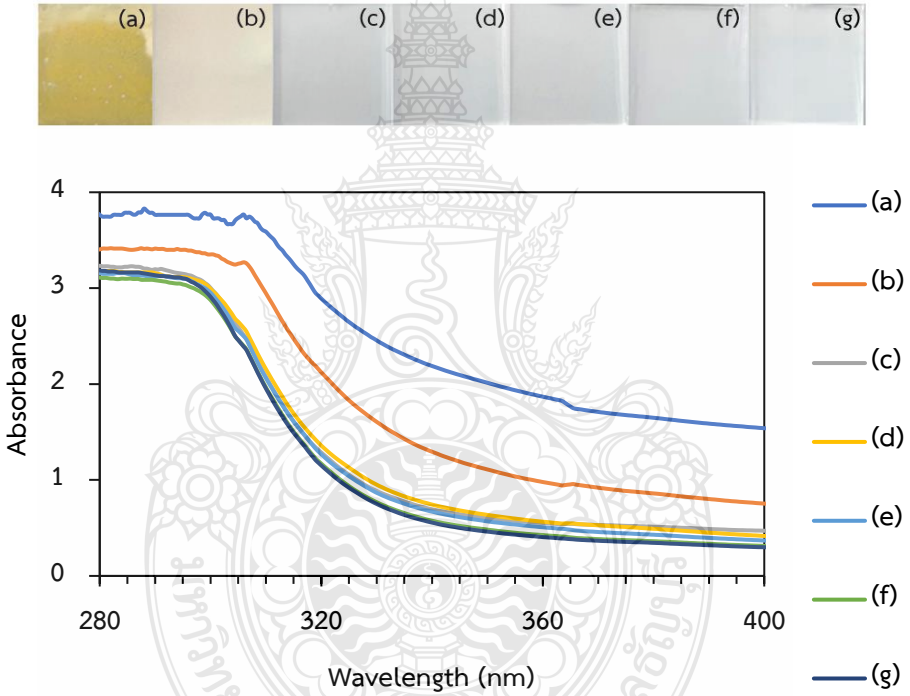
ภาพที่ 4.3 กราฟ Nyquist plot ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s และ (f)125 mV/s

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s

อัตราการสแกน; Scan rate (mV/s)	**ความต้านทาน;** R_{ct} (ohm)
10	94,080
25	3,824
50	6,791
75	9,132
100	13,074
125	35,063

4.1.1.4 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

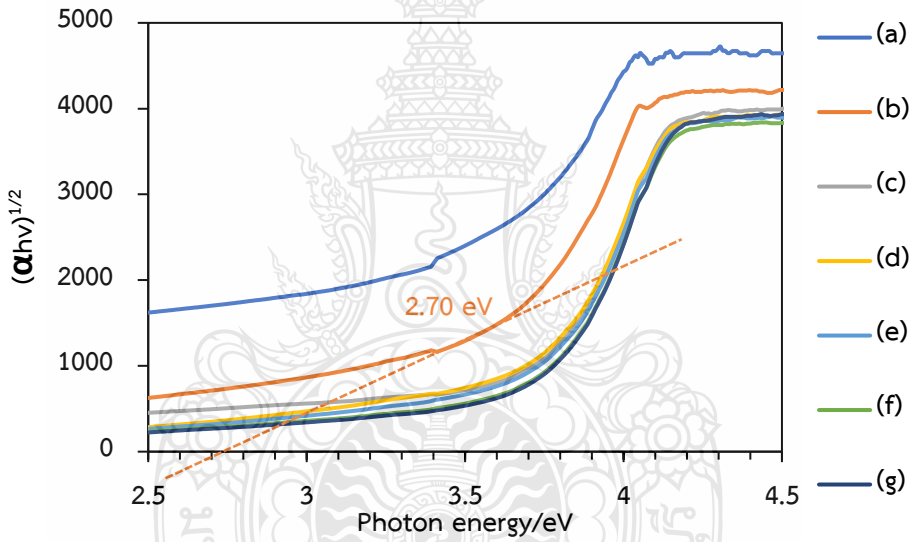
จากการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราการสแกนที่ 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s พบว่าอัตราการสแกนที่ 10 mV/s มีความหนาของฟิล์ม Bi_2WO_6-WO_3 มากที่สุดและมีความหนาลดลงตามอัตราสแกนที่เพิ่มเร็วขึ้นตามลำดับ ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากอัตราการสแกนต่างๆ เริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามมองเห็นโดยเฉพาะขั้วไฟฟ้าที่เตรียมที่อัตราการสแกน 10 และ 25 mV/s จะมองเห็นสีเหลืองชัดเจนสามารถยืนยันได้ถึงความสามารถในการดูดแสงในช่วงที่ตามมองเห็นได้เป็นอย่างดี ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 แสดงภาพขั้วไฟฟ้าและ Absorption spectra ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s, (f)125 mV/s และ (g)FTO

อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าฟิล์มบาง Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราการสแกนที่ 50, 75, 100 and 125 mV/s ไม่มีสีเกิดขึ้นบนวัสดุรองรับ ในขณะเดียวกันการเตรียมด้วยอัตราการสแกนที่ 10 และ 25 mV/s มีสีเหลืองอ่อนเกิดขึ้น เป็นผลมาจากมีการสะสมของฟิล์มบาง Bi_2WO_6-WO_3

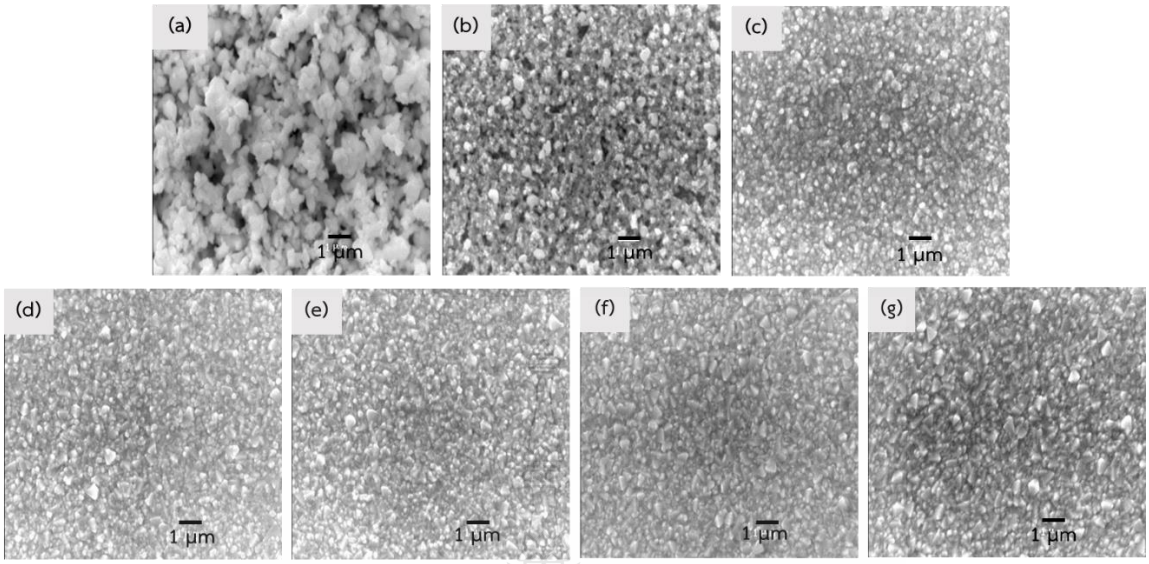
ที่จัดตัวเรียงอย่างช้าๆ มีอนุภาคที่เหมาะสมและมีค่าแถบพลังงานที่แคบกว่าส่งผลทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงยูวีและช่วงที่ตามองเห็นได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราการสแกนอื่นๆ แต่เนื่องจากอัตราสแกนที่ 10 mV/s มีการสะสมฟิล์ม Bi_2WO_6-WO_3 ที่ปริมาณมากเกินอาจส่งผลต่อคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกบางประการ ดังนั้นการเตรียมด้วยอัตราสแกน 25 mV/s จึงมีความเหมาะสมมากกว่าการเตรียมด้วยอัตราสแกนอื่นๆ เมื่อคำนวณค่าแถบพลังงาน (Energy band gap; Eg) ของขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ที่สภาวะที่เหมาะสมคือขั้วไฟฟ้าที่เตรียมที่อัตราการสแกน 25 mV/s จากภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและพลังงานแถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมได้มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 2.70 eV สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s, (f)125 mV/s และ (g)FTO

4.1.1.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราการสแกน 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s ที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 มีลักษณะพื้นผิวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เชื่อมติดกันโดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 500 – 1,000 nm และมีลักษณะเป็นรูพรุนมากที่สภาวะการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยอัตราการสแกน 10 mV/s ดังแสดงในภาพที่ 4.6(a) เนื่องจากเกิดการสะสมของฟิล์ม Bi_2WO_6-WO_3 มีปริมาณมากทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ในช่วงที่มีการสแกนศักย์ไฟฟ้าไปด้านลบ และในขณะเดียวกันจะเกิดการปลดปล่อยสารปนเปื้อนหรือการจัดเรียงตัวกันได้นานขึ้นในช่วงการสแกนศักย์ไฟฟ้าไปด้านบวกของเทคนิคการเตรียมฟิล์มแบบไซคลิกโวลแทมเมทรี เมื่อเพิ่มอัตราการสแกนที่เร็วขึ้นพบว่าฟิล์ม Bi_2WO_6-WO_3 มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงประมาณ 100-200 nm ที่อัตราการสแกน 25-50 mV/s ที่สำคัญคือจะสังเกตได้ว่าที่อัตราการสแกน 25 mV/s มีลักษณะของพื้นผิวที่เป็นรูพรุนและมีความขรุขระมากกว่าอัตราการสแกนอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.6(b) ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกันกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในก่อนหน้านี้ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าพื้นผิวที่เตรียมด้วยอัตราการสแกนที่ 25 mV/s นั้นมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมขั้วไฟฟ้าหรือกล่าวคือยิ่งมีความขรุขระของพื้นที่ผิวมากยิ่งมีประสิทธิภาพในการสัมผัสกับสารละลายได้มากและถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ดี ผลลัพธ์ที่ได้นี้ช่วยสนับสนุนคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะฟิล์ม Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมจากสภาวะอัตราการสแกนตั้งแต่ 50 – 125 mV ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีความแน่นและมีรูพรุนที่ลดลงและจัดเรียงตัวไม่สม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 4.6(c-f) ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าดังแสดงก่อนหน้านี้

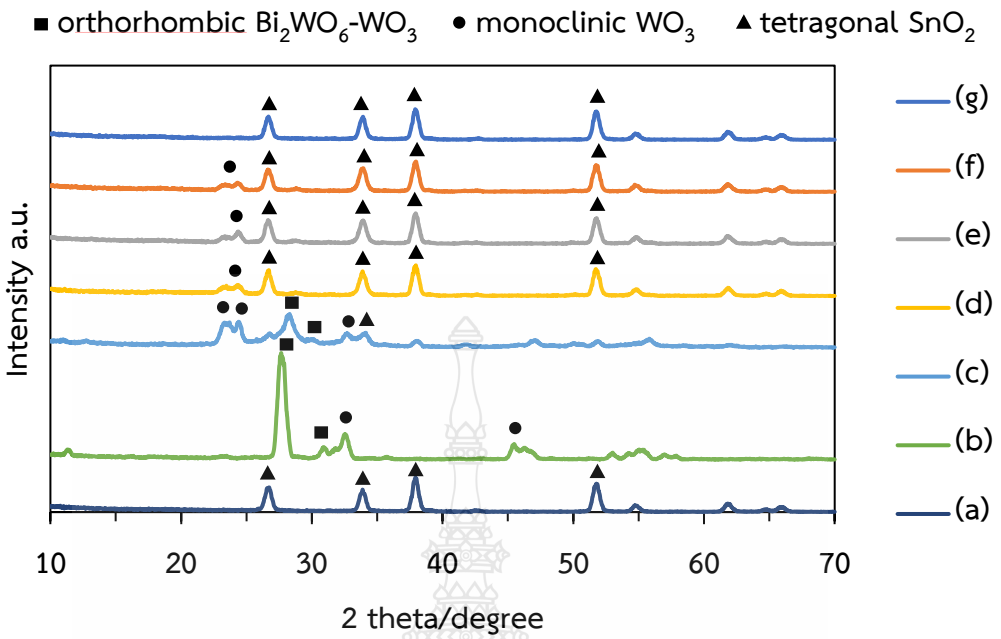


ภาพที่ 4.6 แสดงภาพ SEM ของขั้วไฟฟ้า FTO/ Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)10 mV/s, (b)25 mV/s, (c)50 mV/s, (d)75 mV/s, (e)100 mV/s, (f)125 mV/s และ (g)FTO

4.1.1.6 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึก

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยอัตราการสแกน 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s และ 125 mV/s ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่ามีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึกตัวรองรับ FTO มี SnO_2 เป็นองค์ประกอบ ที่ 2θ เท่ากับ 26.84˚, 34.08˚, 38.06˚ และ 51.92˚ ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกของ tetragonal SnO_2 (ICSD 84576)[50] และสามารถยืนยันการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ WO_3 ที่ตรึงลงบนผิวหน้ากระจกรองรับ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ monoclinic WO_3 พบพีคที่ 2θ เท่ากับ 23.82˚, 32.74˚ และ 45.84˚ ซึ่งตรงกับ (200), (022) และ (222) ตามลำดับ (JCPDS 83-0950) [51] และสามารถยืนยันการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Bi_2WO_6 ที่ตรึงลงบนผิวหน้ากระจกรองรับ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ orthorhombic Bi_2WO_6 พบพีคที่ 2θ เท่ากับ 27.82˚ และ 28.52˚ ซึ่งตรงกับ (131) (JCPDS N˚97-2381) [52] ดังแสดงในภาพที่ 4.7 จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถยืนยันได้ถึงความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 บนผิววัสดุรองรับกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่มี SnO_2 เป็นองค์ประกอบได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้จากการศึกษาและเปรียบเทียบผลของอัตราการสแกนของ

ขั้วไฟฟ้ากับโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมที่อัตราการสแกนที่ 10 mV/s มีความเป็นผลึกของ Bi_2WO_6 ที่สูงมาก แต่อย่างไรก็ตามไม่พบโครงสร้างผลึก WO_3 ปรากฏที่อัตราการสแกนดังกล่าว ซึ่งถือว่าเป็นเหตุผลสำคัญที่ยืนยันได้ว่าที่อัตราการสแกนเท่า 10 mV/s มีปริมาณสารที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามากแต่มีสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกน้อย เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำไม่เหมาะสมคือมีเฉพาะ Bi_2WO_6 อย่างเดียวซึ่งส่งผลต่อสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาอย่างชัดเจน และยังเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าการผสมสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 ส่งเสริมให้เกิดการส่งผ่านประจุและเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในสารละลายน้ำได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6 เพียงอย่างเดียว และจะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการสแกนสามารถทำให้เกิดฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกที่ดีทั้ง Bi_2WO_6 และ WO_3 โดยจะเห็นความสูงของพีคหลักโครงสร้างผลึก Bi_2WO_6 และ WO_3 ชัดเจนที่สุดที่อัตราการสแกนที่ 25 mV/s และลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนสูงขึ้นจาก 50 – 100 mV/s และพบเฉพาะโครงสร้างผลึกของ Bi_2WO_6อย่างเดียวโดย ไม่พบโครงสร้างผลึกของ WO_3 เมื่อเพิ่มอัตราการสแกนสูงถึง 125 mV/s จากผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีถึงผลของอัตราการสแกนในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีส่งผลโดยตรงในการควบคุมการเกิดฟิล์มและโครงสร้างผลึกของ Bi_2WO_6 และ WO_3 อย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกของขั้วไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นอัตราการสแกน 25 mV/s จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการเตรียมฟิล์มจึงส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำสำหรับกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก



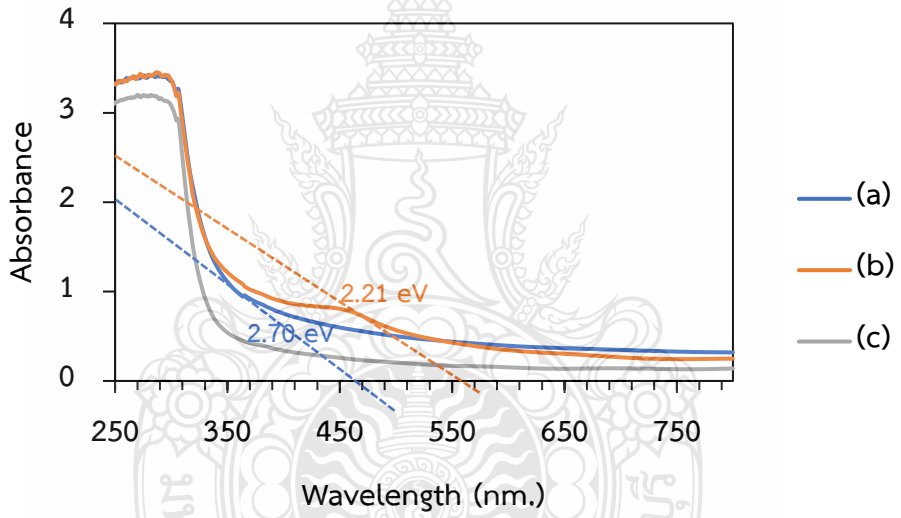
ภาพที่ 4.7 ภาพ XRD patterns ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition จากผลการศึกษาอัตราการสแกนที่ (a)FTO, (b)10 mV/s, (c)25 mV/s, (d)50 mV/s, (e)75 mV/s, (f)100 mV/s และ (g)125 mV/s

4.1.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะและประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับเกิดกระบวนการออกซิเดชันในสารละลายน้ำ โดยได้นำมาเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ กับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ ซึ่งได้เปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดกลืนแสง ความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก เพื่อนำไปศึกษาและออกแบบต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.2.1 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดกลืนแสง

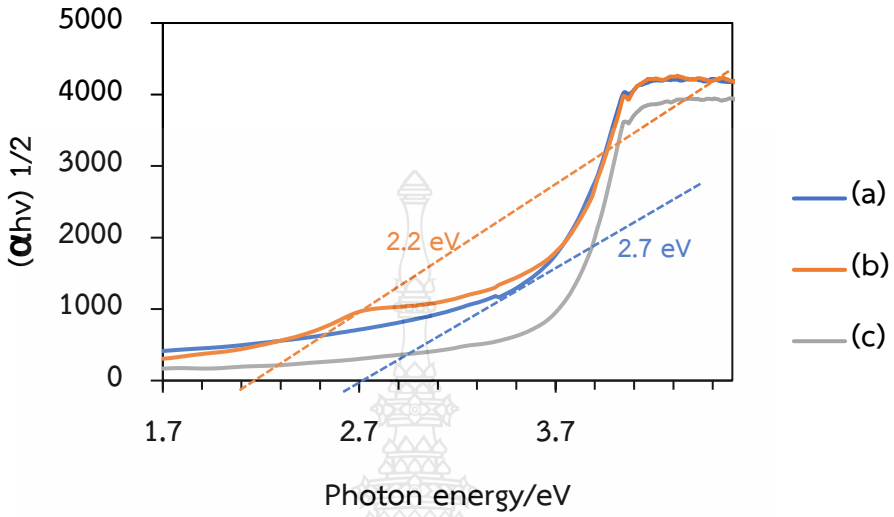
จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ในสภาวะที่เหมาะสมดังที่กล่าวไปข้างต้นกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เมื่อคำนวณค่าแถบพลังงาน (Energy band gap; Eg) จากสมการ Eg = 1240/λ จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 460 nm เมื่อคำนวณค่าแถบพลังงาน (Eg) ได้เท่ากับ 2.70 eV ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบเริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 nm เมื่อคำนวณค่าแถบพลังงาน (Eg) ได้เท่ากับ 2.21 eV ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และ 4.9



ภาพที่ 4.8 Absorption spectra (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (c)กระจกนำไฟฟ้า FTO

จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลได้มากกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นซึ่งมีการดูดกลืนแสงในช่วงของยูวีและขั้วไฟฟ้า

FTO/WO_3/$BiVO_4$ มีค่าแถบพลังงาน (Eg) ที่แคบกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ซึ่งส่งผลทำให้มีคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำได้ดี

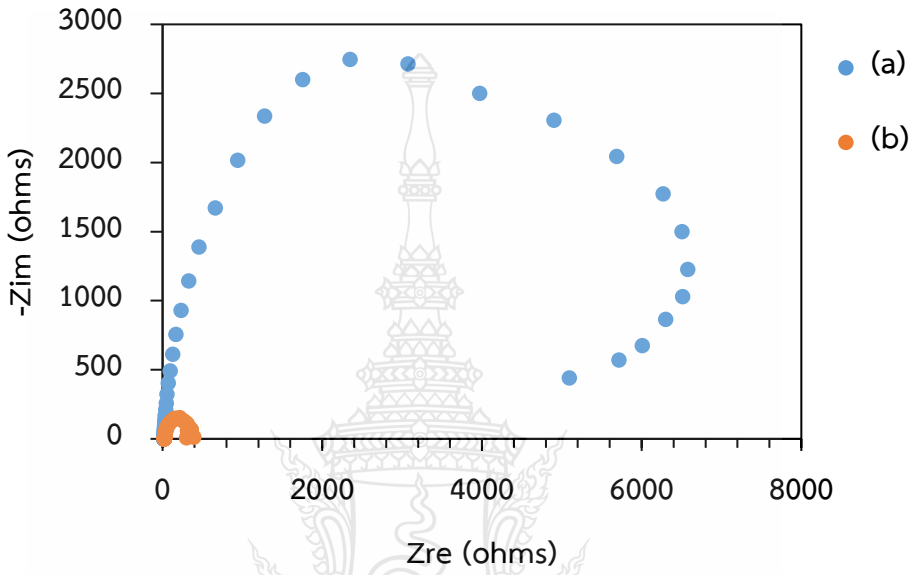


ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ (c)กระจกนำไฟฟ้า FTO

4.1.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาหาความต้านทานและความจุทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) เพื่อยืนยันสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition กับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition มีค่าเท่ากับ 6,118 ohm และขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบอัตโนมัติมีค่าเท่ากับ 318 ohm ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.2 กล่าวคือขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 มีค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนมากทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้น้อย ในขณะที่

ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ มีค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนน้อยส่งเสริมให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำได้ดีมากกว่า ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.10



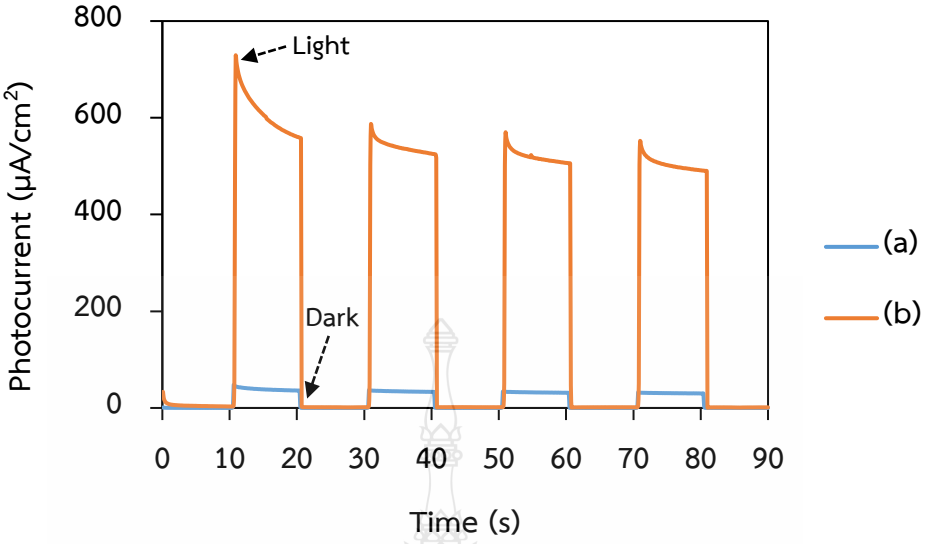
ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟ Nyquist plot ของ (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

ขั้วไฟฟ้า	**ความต้านทาน; R_{ct} (ohm)**
FTO/Bi_2WO_6-WO_3	6,118
FTO/WO_3/$BiVO_4$	318

4.1.2.3 ผลการเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

จากผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก โดยนำขั้วไฟฟ้าที่ได้พัฒนามาวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยค่าที่ได้นี้มาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในสารละลายน้ำด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Amperometry) เป็นเวลา 90 วินาที โดยสลับสภาวะที่ให้แสงและไม่ให้แสงทุกๆ 10 วินาที จนครบตามเวลาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ในการวิเคราะห์ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) คือ ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) คือ Ag/AgCl และใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) คือ Pt จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติมีค่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่มากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition ดังแสดงในภาพที่ 4.11 จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าเดียวกันที่ 1.0 V vs. Ag/AgCl ซึ่งขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติมีค่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นสูงกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition เนื่องจากมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับการศึกษาสมบัติทางแสงที่ดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลและมีค่าพลังงานแถบที่แคบกว่าดังกล่าวไปในหัวข้อ 4.1.2.1 และมีผลที่สอดคล้องกับการศึกษาสมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่น้อยส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลายที่มาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจึงได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition และขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์สำหรับเลือกขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมไปออกแบบเป็นเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้สำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป

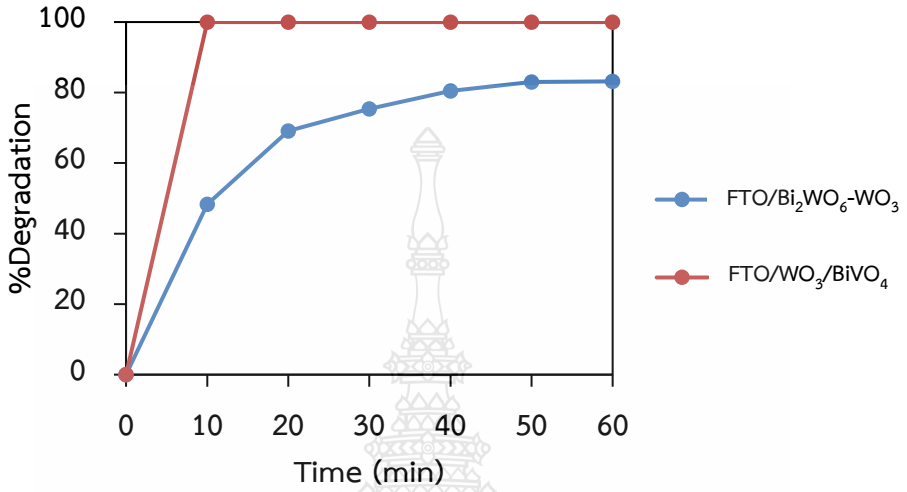


ภาพที่ 4.11 กราฟ Amperograms การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ 0.5 M NaCl ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V vs. Ag/AgCl เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าทำงาน (a)ขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6 ที่เตรียมด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry Deposition กับ (b)ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ

4.1.2.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์

เมื่อศึกษาและพัฒนาขั้วไฟฟ้าสำเร็จแล้วจึงได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ดีที่สุดระหว่างขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ซึ่งได้ติดตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer โดยพิจารณาการลดลงของสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm เป็นระยะเวลา 20 นาที ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ในการวิเคราะห์ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดคือ FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ Stainless steel เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO_3/$BiVO_4$ ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ Stainless steel ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าพบว่าการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ของขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติสามารถกำจัดสีได้ 100% ในระยะเวลา 10 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมากกว่าการกำจัดสีผสมอาหารของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วย

เทคนิคเคมีไฟฟ้ากำจัดสีได้เพียง 48% ในระยะ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.12 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหารในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ต่อไป



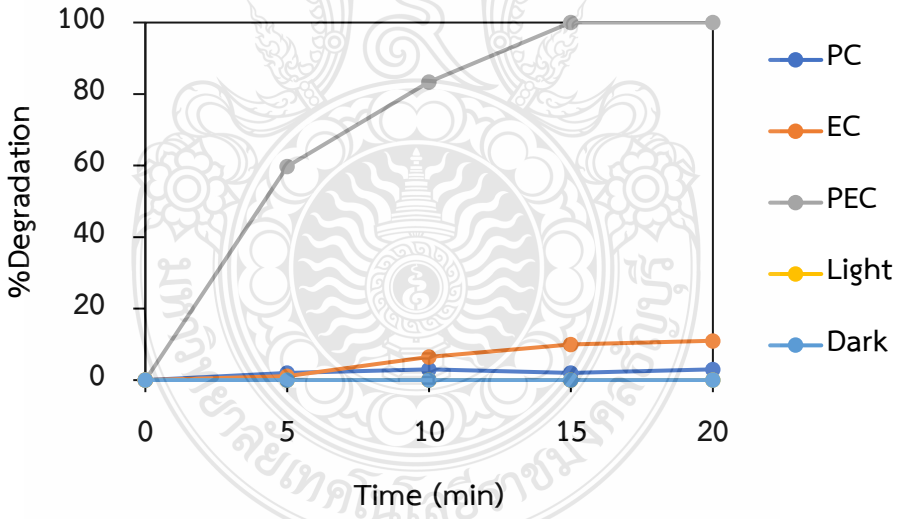
ภาพที่ 4.12 (a)เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 60 นาที (b)อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 และขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ กับระยะเวลา 60 นาที

4.2 ผลของการศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

จากผลการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า โดยศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ โดยได้ศึกษากลไกการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color 5 กลไก ดังนี้ (1)ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง (Photocatalysis; PC), (2)ภายใต้สภาวะเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalysis; EC), (3)ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalysis; PEC), (4)สภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การเร่งด้วยแสง (Light) และ(5)สภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การไม่มีแสง (Dark) ซึ่งติดตามการลดลงของสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer เป็นระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.13 จากการทดลองพบว่าระบบ PC กำจัดสีผสมอาหารได้ 3% ระบบ EC กำจัดสีผสมอาหารได้ 11% ระบบ PEC กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ระบบ Light กำจัดสีผสมอาหารได้ 0% และระบบ Dark กำจัดสีผสมอาหารได้ 0% ดังแสดงใน

ภาพที่ 4.14 ซึ่งจากผลการทดลองระบบ PEC สามารถกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ได้ดีที่สุด และสามารถยืนยันกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสีผสมอาหารของระบบ PEC มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าช่วยทำให้เร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้มากกว่า จึงเหมาะสำหรับนำไปกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในอนาคตต่อไป

ภาพที่ 4.13 การจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับการศึกษากลไกเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า



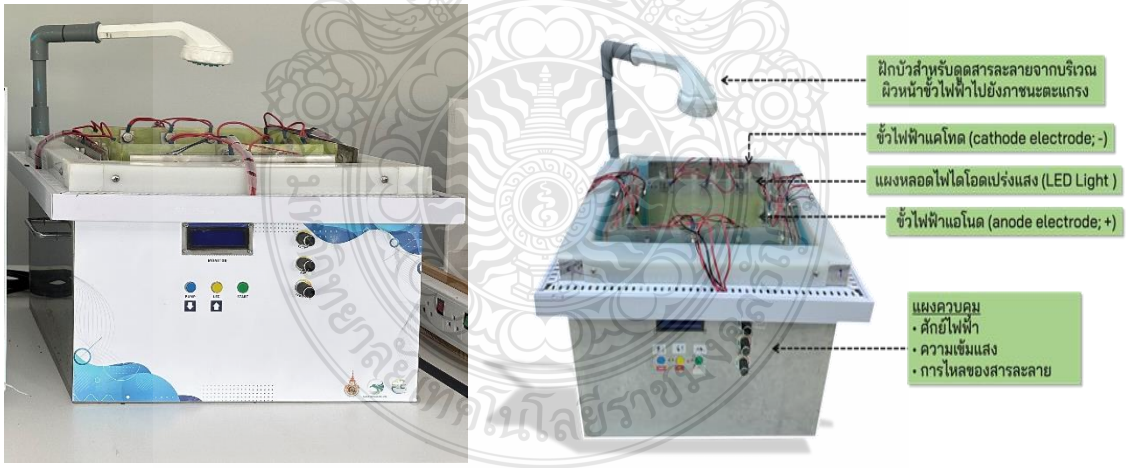
ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 60 นาที ของระบบ (1) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสง (Photocatalysis; PC), (2) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalysis; EC), (3) ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalysis; PEC), (4) สภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การเร่งด้วยแสง (Light) และ (5) สภาวะที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าภายใต้การไม่มีแสง (Dark)

4.3 ผลของการศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้ากับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นที่สภาวะที่ดีที่สุดกับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ โดยแบ่งการศึกษาสภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ออกเป็นเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผัก 2 ระบบด้วยกัน ดังต่อไปนี้

4.3.1 เซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 1

เป็นเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ ซึ่งภายในระบบจะบรรจุสารละลายปริมาตร 10 ลิตร ที่จะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO_3/$BiVO_4$ ขนาด 18x25 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น, แผงหลอดไฟในการให้แสงและขั้วไฟฟ้าแคโทด Stainless steel ขนาด 18x25 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น มีฝักบัวสำหรับดูดสารละลายจากด้านล่างปล่อยออกด้านบน เพื่อเกิดการหมุนเวียนของสารละลายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดผักและผลไม้และส่งเสริมการเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์

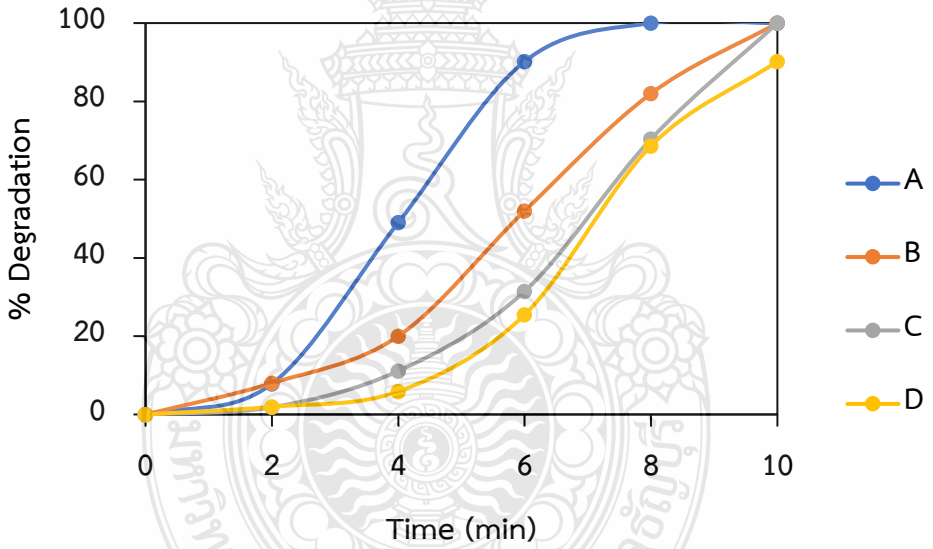


ภาพที่ 4.15 เซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 1

4.3.1.1 ผลการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า

ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าให้เหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color โดยมีการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าดังนี้ (A): ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทด ขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง (B): ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทด ขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง (C): ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทด ขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลาย (D): ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทด ขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลาย โดยมีแผงหลอดไฟ LED หันเข้าหาขั้วแอโนด ดังแสดงในภาพที่ 4.16 จากการทดลองพบว่าผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm ในระยะเวลา 10 นาที โดยเปรียบเทียบตำแหน่งของการวางขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสี Orange red color การวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าแบบ (A) สามารถกำจัดสีได้ 100 เปอร์เซ็นต์ภายในระยะเวลา 8 นาที การวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าแบบ (B) และแบบ (C) สามารถกำจัดสีได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 10 นาที และการวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าแบบ (D) สามารถกำจัดสีได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.17 เนื่องจากตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าแบบ (A) เป็นการหันผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดเข้าหาสารละลายบริเวณตรงกลาง ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแพร่ไปกำจัดสีผสมอาหารได้โดยตรง ร่วมกับการไหลเวียนของน้ำที่มีปั๊มน้ำดูดสารละลายบริเวณด้านล่างตรงกลางและไหลจากฝักบัวด้านบนลงสู่ด้านล่างโดยตรง จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการวางแบบผิวหน้าขั้วไฟฟ้าหันหลังเข้าบริเวณด้านตรงกลาง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกการวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าแบบ (A) ในการใช้เป็นเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ต่อไป

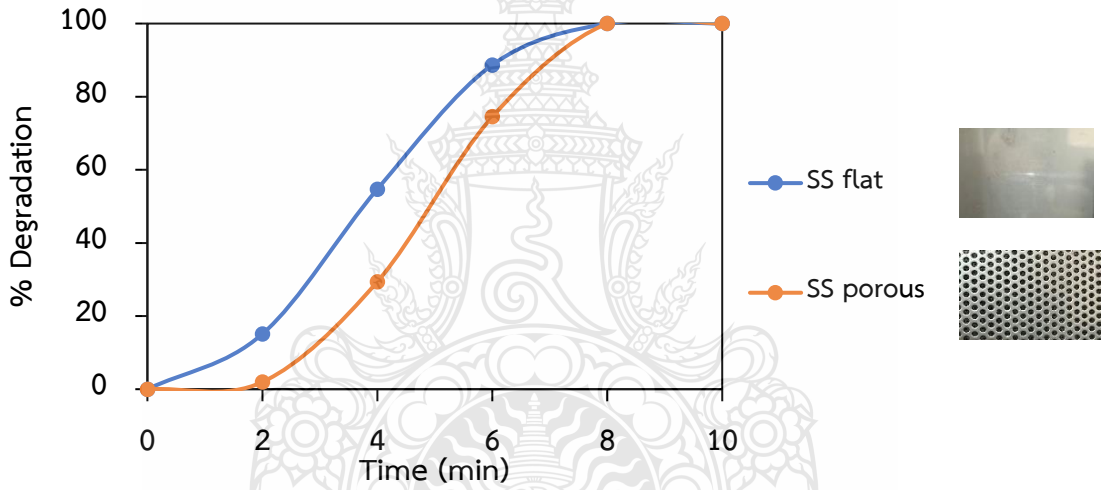
ภาพที่ 4.16 รูปแบบการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบ (A) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (B) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (C) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลาย และ(D) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลาย



ภาพที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของรูปแบบการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบ (A) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (B) ขั้วแอโนดวางด้านหน้าแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลายบริเวณตรงกลาง, (C) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหลังสัมผัสสารละลาย และ(D) ขั้วแอโนดวางด้านหลังแคโทดขั้วแอโนดด้านหน้าสัมผัสสารละลาย

4.3.1.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด

เนื่องจากขั้วไฟฟ้าแคโทดจะต้องมีประสิทธิภาพที่ดีในการส่งผ่านอิเล็กตรอน จากการศึกษาประสิทธิภาพของพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดสี Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm ในเวลา 10 นาที โดยศึกษาชนิดของพื้นที่ผิวขั้วแคโทด Stainless steel แบบเรียบ (ss flat) เปรียบเทียบกับขั้วแคโทด Stainless steel แบบรูพรุน (ss porous) ดังแสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสี Orange red color ขั้วไฟฟ้า Stainless steel แบบเรียบสามารถกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ได้รวดเร็วและดีกว่าขั้วไฟฟ้า Stainless steel แบบรูพรุน เนื่องจาก Stainless steel แบบเรียบมีประสิทธิภาพและมีพื้นที่ผิวมากในการไหลและส่งผ่านของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดได้ดีกว่า

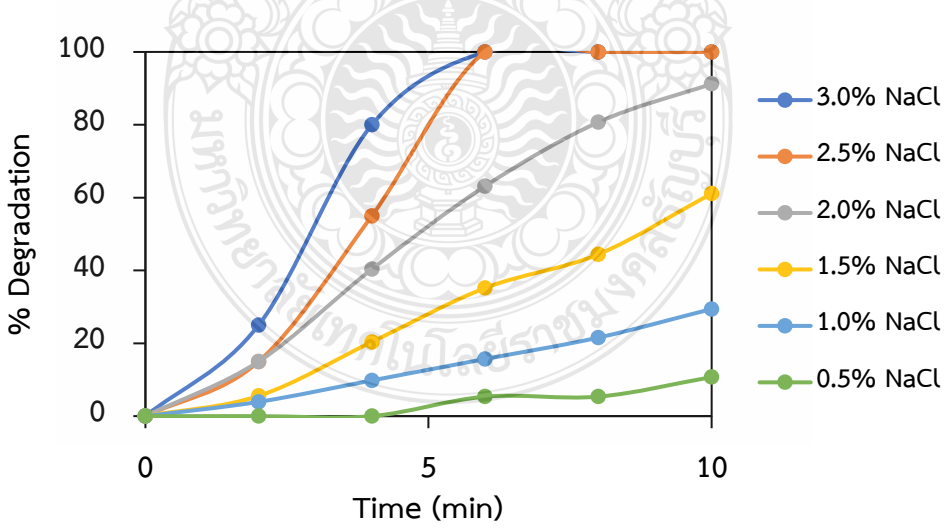


ภาพที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด

4.3.1.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

จากการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% และ3.0% NaCl ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm ในเวลา 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.19 พบว่าที่ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5%, และ2.0% NaCl สามารถกำจัดสีผสมอาหารได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl คือ 10, 29, 61, และ91%

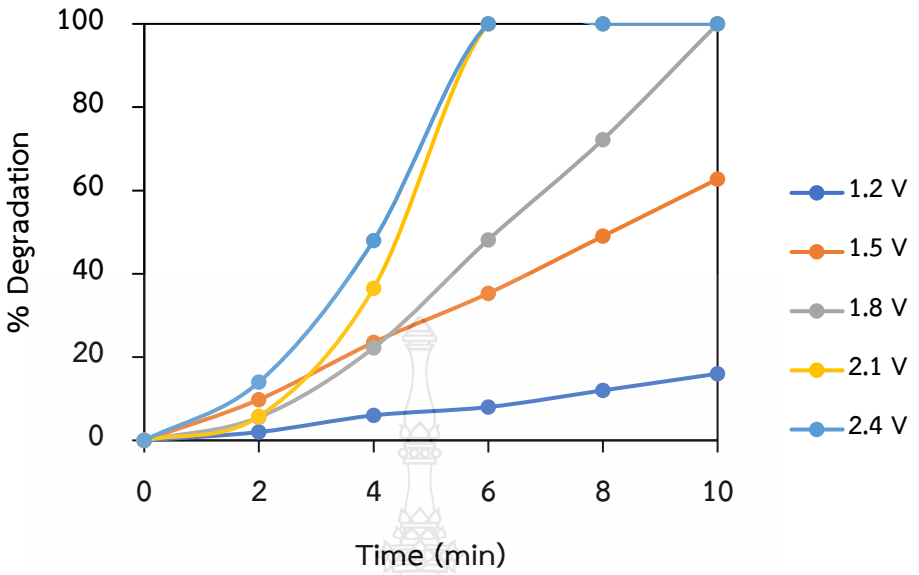
ตามลำดับและความเข้มข้น 2.5% NaCl และ3.0% NaCl สามารถกำจัดสีผสมอาหารได้ถึง 100% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหารพบว่าความเข้มข้น 2.5% NaCl มีการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ได้ดีเทียบเท่ากับความเข้มข้น 3% NaCl ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ว่าเมื่อมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่สูงๆ จะทำให้มีการแตกตัวของไอออนที่ปริมาณมากส่งผลทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหารได้ดีตามผลการทดลอง นอกจากนี้ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลายยังสามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบแอคทีฟคลอรีนซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในสารละลายน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl มากขึ้น นอกจากจะส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าในสารละลายระหว่างขั้วไฟฟ้าแล้วยังส่งเสริมการเกิดสารที่มีสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้อีกทางด้วยจึงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้นที่ความเข้มข้น NaCl สูง แต่อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่จะเกิดขึ้นกับรสชาติหรือผลทางกายภาพที่จะเกิดขึ้นกับผักผลไม้ที่จะใช้กับระบบที่มีค่าความเค็มสูง ดังนั้นจึงต้องมีสภาวะที่เหมาะสมของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในการนำมาเป็นสารอิเล็กโทรไลต์สำหรับส่งผ่านอิเล็กตรอนในระบบให้ดี เบื้องต้นเมื่อพิจารณาส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์อย่างเดียวผู้วิจัยจึงเลือกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 2.5% NaCl เนื่องจากต้องการใช้ปริมาณความเข้มข้นของเกลือที่ไม่สูงมากและต้องการลดความเค็มของสารละลายลง



ภาพที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ในช่วง 0.5–3.0%

4.3.1.4 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้า

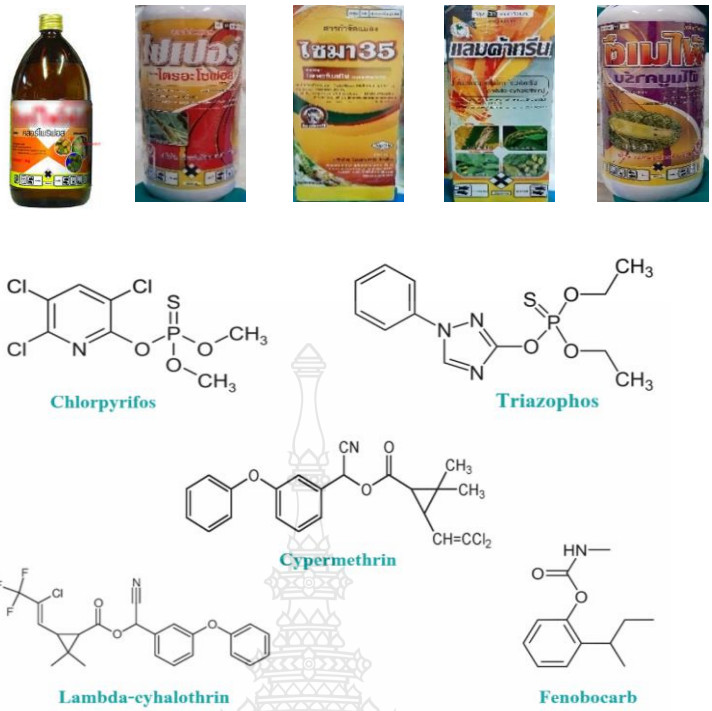
ในกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของกระบวนการที่ทำให้สารอินทรีย์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยสารอินทรีย์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้จะต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันที่สามารถให้อิเล็กตรอนกับระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์ได้ ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบจะทำหน้าที่เร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ชั้นการนำของสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสงที่เหมาะสม พบว่าเมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไปทางบวกมากก็จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดีและช่วยเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนเข้าขั้วไฟฟ้าส่งผลทำให้การกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจากผลของการศึกษาประสิทธิภาพค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันสำหรับใช้กำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm ในเวลา 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.20 ได้ศึกษาที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V, 1.5 V, 1.8 V, 2.1 V และ 2.4 V พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมากขึ้นจะเป็นการเร่งการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดได้ดีส่งผลทำให้ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิด h^+ เป็นจำนวนมากและทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อไปกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหารที่มากขึ้น แต่การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไปอาจไปทำปฏิกิริยาให้สารกึ่งตัวนำที่เกาะติดอยู่บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าหลุดออกมาได้ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าได้ ดังนั้นเพื่อรักษาคุณภาพของขั้วไฟฟ้าให้มีการใช้งานได้นานขึ้นจึงเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V กำจัดสีผสมอาหารได้ 16% ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.5 V กำจัดสีผสมอาหารได้ 63% ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.8 V กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ที่เวลา 10 นาที ค่าศักย์ไฟฟ้า 2.1 V และ 2.4 V กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ที่เวลา 6 นาที ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหารได้ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการถนอมอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2.1 V ในการใช้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดสารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์สำหรับเครื่องล้างผักและผลไม้ของระบบที่ 1



ภาพที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 1.6 ppm กับระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที ของการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง 1.2–2.4 V

4.3.1.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง

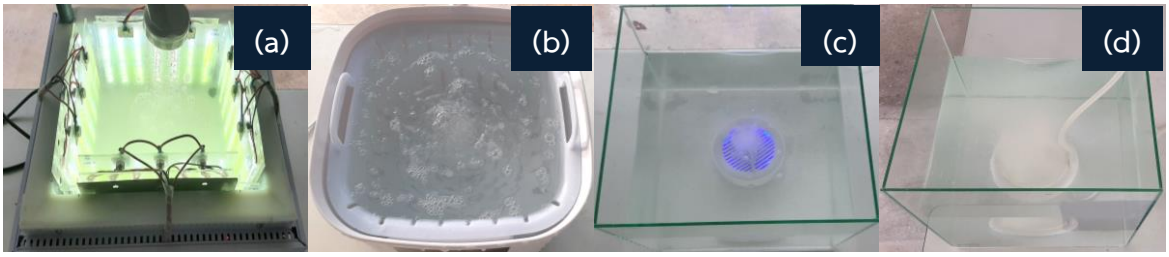
เมื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 1 แล้ว ได้ศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงในรูปแบบสารละลายในน้ำ โดยได้ศึกษากลุ่มยาฆ่าแมลงที่เกษตรกรใช้ตามท้องตลาดที่จัดอยู่ในกลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟต ไพรีทอยด์ และคาร์บาเมต จำนวน 5 ชนิด ดังนี้ Chlorpyrifos 30% W/V, Triazophos 40% W/V, Cypermethrin 35% W/V, Lamda-cyhalothrin 2.5% W/V และ Fenobucarb 50% W/V ดังแสดงในภาพที่ 4.21 โดยใช้ความเข้มข้น 3 ppm ใช้ระยะเวลาในการกำจัดยาฆ่าแมลงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ติดตามการกำจัดยาฆ่าแมลงด้วยค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/visible spectrophotometer และคำนวณร้อยละของการลดลง



ภาพที่ 4.21 แสดงภาพของผลิตภัณฑ์ยาฆ่าแมลง Chlorpyrifos (30% W/V), Triazophos (40% W/V), Cypermethrin (35% W/V), Lamda-cyhalothrin (2.5% W/V) และ Fenobucarb (50% W/V) และตัวอย่างสูตรโครงสร้างทั่วไปของยาฆ่าแมลง

ที่มา : https://www.intechopen.com/chapters/19602

โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงแต่ละชนิดของเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ได้จากการประยุกต์ขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ กับเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักด้วยระบบโอโซน 1, ระบบโอโซน 2, และผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักด้วยระบบน้ำอิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงในสารละลายของเครื่องล้างผักและผลไม้ที่ประยุกต์จากขั้วไฟฟ้า FTO/WO_3/$BiVO_4$ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด ดังนี้ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2 โดยใช้ความเข้มข้นของยาฆ่าแมลง 3 ppm ในปริมาตร 10 ลิตร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงแต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 การศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง Chlorpyrifos ความเข้มข้น 3 ppm พบว่าระบบ PEC สามารถกำจัดยาฆ่าแมลงได้ 85% ระบบ Ozone 1 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 49% ระบบ Electrolyte กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 39% และระบบ Ozone 2 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0%

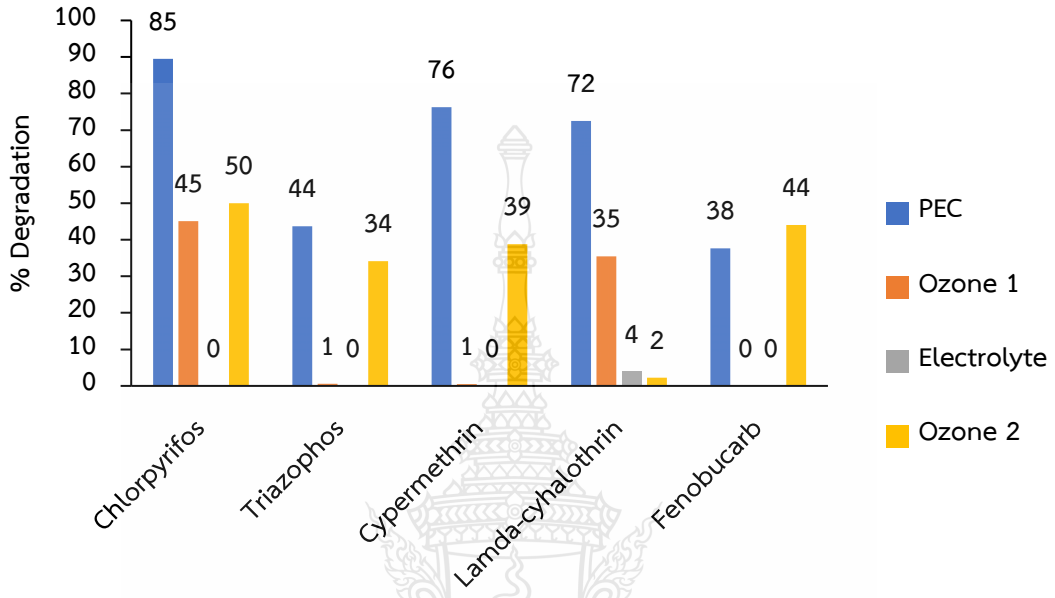
จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง Triazophos ความเข้มข้น 3 ppm พบว่าระบบ PEC กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 37% ระบบ Ozone 1 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 10% ระบบ Electrolyte กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0% และระบบ Ozone 2 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 33%

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง Cypermethrin ความเข้มข้น 3 ppm พบว่าระบบ PEC กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 54% ระบบ Ozone 1 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0% ระบบ Electrolyte กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0% และระบบ Ozone 2 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 34%

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง Lambda-cyhalothrin ความเข้มข้น 3 ppm พบว่าระบบ PEC กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 70% ระบบ Ozone 1 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 30% ระบบ Electrolyte กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 5% และระบบ Ozone 2 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0%

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลง Fenobucarb ความเข้มข้น 3 ppm พบว่าระบบ PEC กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 37% ระบบ Ozone 1 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0% ระบบ Electrolyte กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0% และระบบ Ozone 2 กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 34% ดังแสดงในภาพที่ 4.23 ซึ่งจากผลการทดลองดังที่กล่าวมานั้นพบว่าเครื่องล้างผักและผลไม้ของระบบ PEC มีประสิทธิภาพในการกำจัดยาฆ่าแมลงทั้ง 5 ชนิดที่สูงมากกว่าเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด โดยสามารถยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ PEC ที่เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งสารดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่

แรงมากกว่าโอโซนและน้ำอิเล็กโทรไลต์ รวมถึงสารประกอบแอคทีฟคลอรีนจากการเกิดปฏิกิริยาในระบบ PEC ทำให้ส่งเสริมประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงได้เป็นอย่างดี ดังนั้นระบบ PEC จึงเกิดการออกซิไดซ์ยาฆ่าแมลงได้มากที่สุด

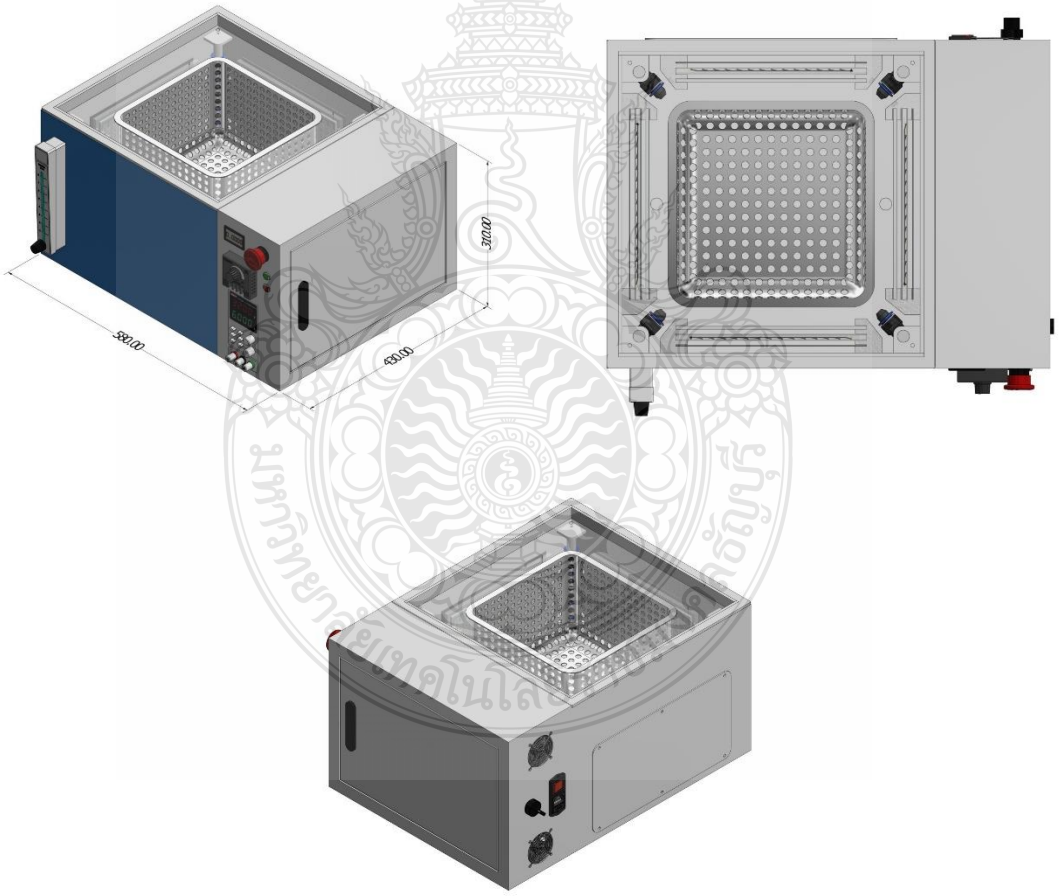


ภาพที่ 4.23 แสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบการกำจัดยาฆ่าแมลง Chlorpyrifos, Triazophos, Cypermethrin, Lambda-cyhalothrin, และFenobucarb

แต่อย่างไรก็ตามผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดยาฆ่าแมลงของเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักระบบที่ 1 พบว่ายังมีข้อจำกัดในด้านการใช้งานคือระบบไหลเวียนของสารละลายที่เป็นแบบฝักบัวทำให้มีสารละลายกระเด็นไปถูกจุดเชื่อมต่อของสายไฟและขั้วไฟฟ้าจนเกิดเป็นสนิมขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลงและรูปลักษณ์ยังมีความเกะกะของสายไฟ ดังนั้นจึงได้ออกแบบเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักระบบที่ 2 ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาและกลบข้อด้อยด้านต่างๆ และเพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงใช้งานง่าย สะดวก กะทัดรัด เหมาะสำหรับนำไปใช้ในครัวเรือน

4.3.2 เซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักระบบที่ 2

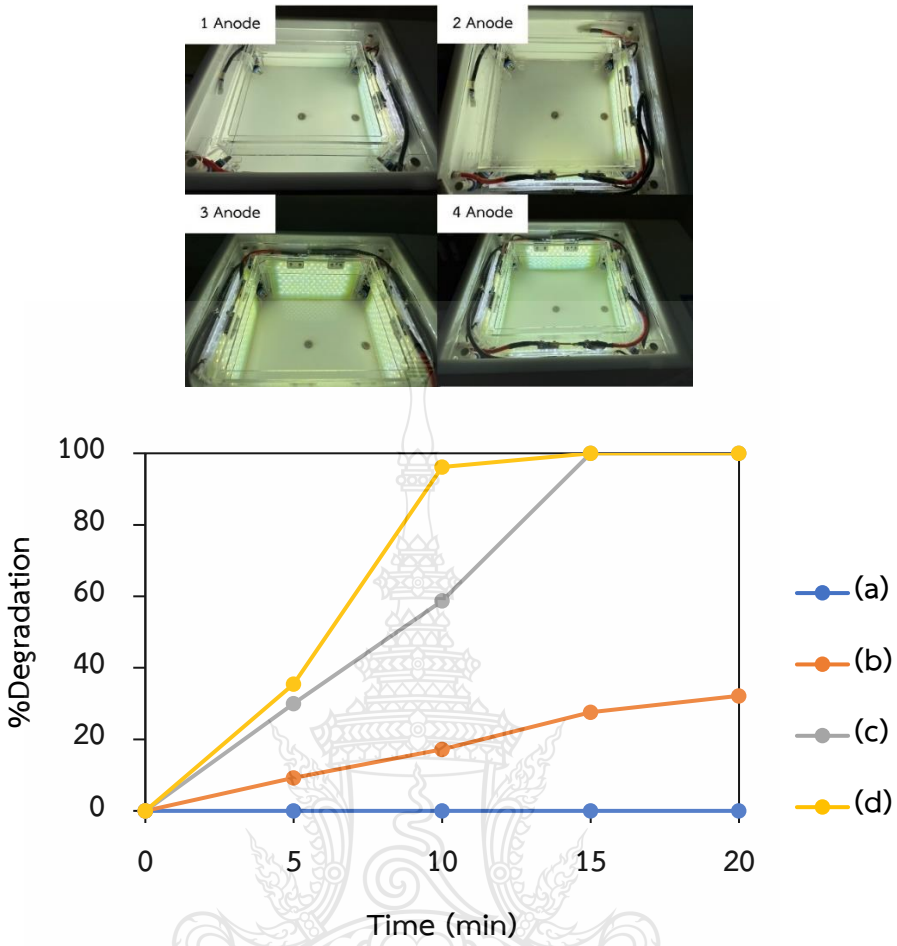
เป็นเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารฆ่าแมลงเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ที่พัฒนาขึ้นจากระบบที่ 1 ซึ่งภายในระบบจะบรรจุสารละลายปริมาตร 15 ลิตร ที่จะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO_3/$BiVO_4$ ขนาด 15x25 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น, แผงหลอดไฟในการให้แสงและขั้วไฟฟ้าแคโทด Stainless steel ขนาด 15x25 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น มีระบบไหลเวียนน้ำแบบปั๊มน้ำที่พ่นจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนบริเวณตรงกลางและมีหัวฉีดน้ำด้านบนและด้านล่างบริเวณมุม 4 มุมของตัวเครื่อง เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลายทุกทิศทางที่ทำให้ทำความสะอาดผักและผลไม้ได้ดี นอกจากนี้ยังมีระบบวงจรไฟฟ้าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อศึกษาสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น แสงไฟ ค่าศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย เพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 4.24 ภาพแสดงเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ ระบบที่ 2

4.3.2.1 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวในการทำงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO_3/$BiVO_4$

จากการศึกษาพื้นที่ผิวในการทำงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด FTO/WO_3/$BiVO_4$ โดยได้ศึกษาปริมาตรของสารละลายต่อพื้นที่ผิวการทำงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งมีขนาดกว้างxยาวของขั้วไฟฟ้าแอโนดในบริเวณที่จุ่มอยู่ในสารละลายเท่ากับ 12x25 เซนติเมตร ในปริมาตรสารละลาย 15 ลิตร มีพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 0.02 cm^2/mL ภายในระบบใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 2.5% ซึ่งได้ศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าที่ 1, 2, 3 และ4 ขั้ว คิดเป็นพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับ 0.02, 0.04, 0.06, และ 0.08 cm^2/mL ตามลำดับ และวัดผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.25 จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าแอโนดจำนวน 1 ขั้ว มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 0.02 cm^2/mL กำจัดสีผสมอาหารได้ 0% ขั้วไฟฟ้าแอโนด 2 ขั้ว มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 0.04 cm^2/mL กำจัดสีผสมอาหารได้ 32% ขั้วไฟฟ้าแอโนด 3 ขั้ว มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 0.06 cm^2/mL กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% และขั้วไฟฟ้าแอโนด 4 ขั้ว มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 0.08 cm^2/mL กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหารเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากยิ่งมีปริมาณพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าในการทำงานมากยิ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากขึ้นและเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและแอคทีฟคลอรีนปริมาณมากเช่นเดียวกันส่งผลทำให้เกิดการกำจัดสีผสมอาหารได้ดี ดังนั้นจึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดจำนวน 4 ขั้ว ในการใช้เป็นเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป

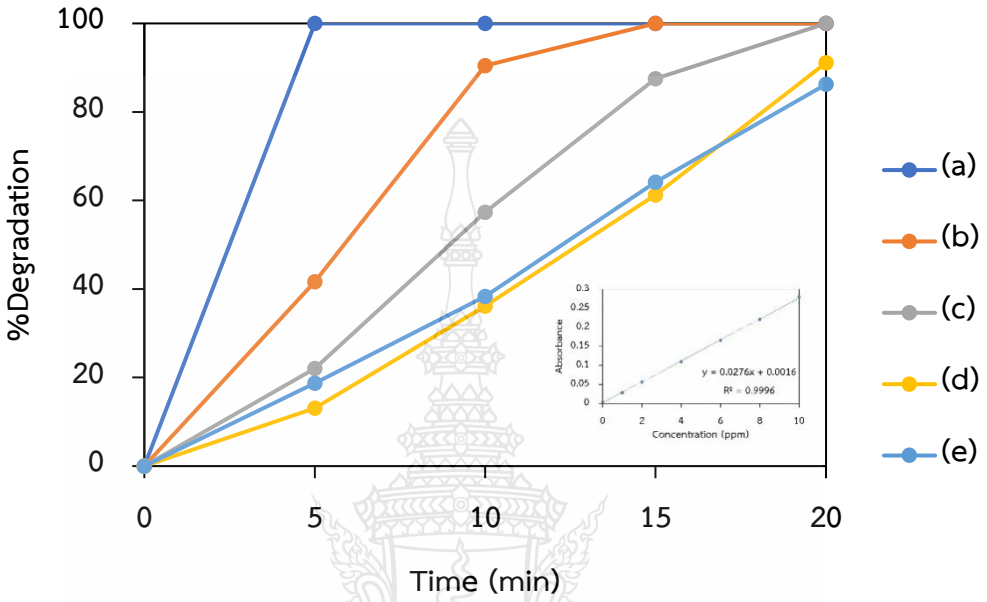


ภาพที่ 4.25 แสดงภาพการทดลองและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที (a)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 1 ขั้ว, (b)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 2 ขั้ว, (c)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 3 ขั้ว, และ(d)ขั้วไฟฟ้าแอโนด 4 ขั้ว

4.3.2.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์

จากผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์สีผสมอาหารของเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก เพื่อทราบความสามารถในการกำจัดสีผสมอาหารได้กี่กรัมต่อลิตร ซึ่งได้ศึกษาความเข้มข้นของสีผสมอาหารที่ 1 ppm, 3 ppm, 5 ppm, 7 ppm, และ 9 ppm ในปริมาตรน้ำ 15 L คำนวณเป็นความเข้มข้นของสีผสมอาหารหน่วยเป็นกรัมต่อลิตรได้ 0.015 g/L, 0.045 g/L, 0.075 g/L, 0.105 g/L และ 0.135 g/L ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าสีผสมอาหารที่ความเข้มข้น 1 ppm ถูกกำจัดได้ 100% ในระยะเวลา 5 นาที สีผสมอาหาร

ความเข้มข้น 3 ppm ถูกกำจัดได้ 100% ในระยะเวลา 15 นาที ความเข้มข้น 5 ppm ถูกกำจัดได้ 100% ในระยะเวลา 20 นาที ความเข้มข้น 7 ppm ถูกกำจัดได้ 91% ในระยะเวลา 20 นาที และความเข้มข้น 9 ppm ถูกกำจัดได้ 86% ในระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.26

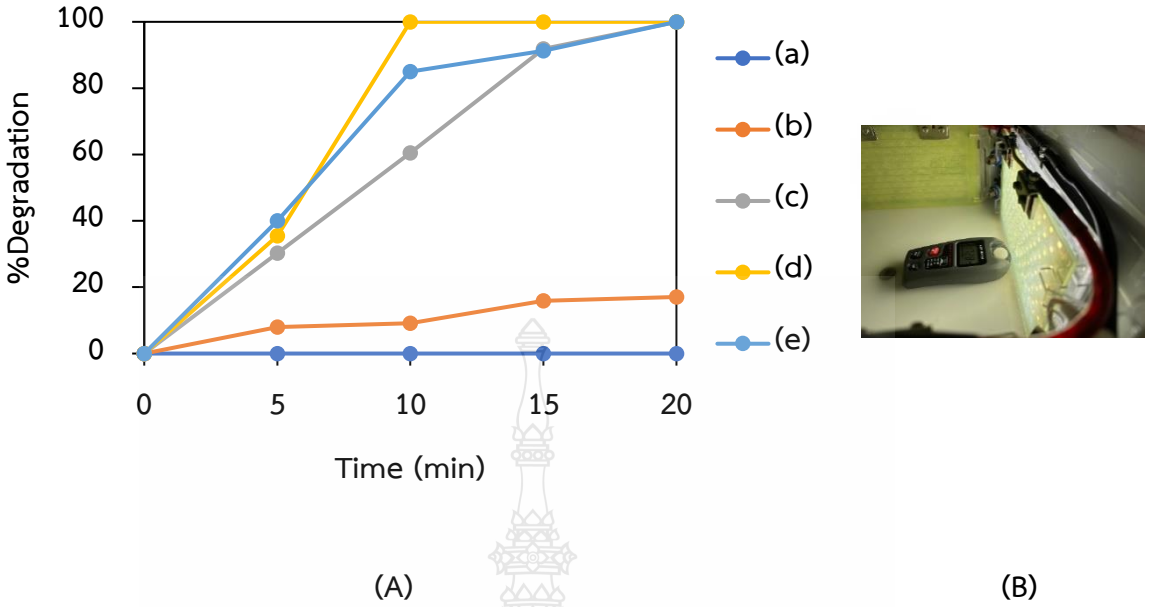


ภาพที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที (a) ความเข้มข้น 1 ppm, (b)ความเข้มข้น 3 ppm, (c)ความเข้มข้น 5 ppm, (d)ความเข้มข้น 7 ppm, และ(e)ความเข้มข้น 9 ppm

ซึ่งระบบสามารถกำจัดสีผสมอาหารได้อย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นต่ำ แต่เมื่อความเข้มข้นของสีผสมอาหารเพิ่มสูงมากขึ้นส่งผลทำให้การกำจัดต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นข้อจำกัดของเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการศึกษาความสามารถในการกำจัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์สีผสมอาหาร มีความสามารถสูงสุดในการกำจัดอยู่ที่ความเข้มข้น 5 ppm หรือ 0.075 g/L ภายในระยะเวลา 20 นาที แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ต้องเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดที่มากขึ้น

4.3.2.3 ผลการศึกษาปริมาณแสงที่เหมาะสม

ผลจากการศึกษาปริมาณแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหาร เนื่องจากแสงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ช่วยไปกระตุ้นสารกึ่งตัวนำที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก ซึ่งในการทดลองได้วัดค่าปริมาณแสงด้วยเครื่อง LUX meter ที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โดยได้ทำทดลองปริมาณแสงที่ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% ผ่านการปรับค่าด้วย Dreamer ติดตามผลการทดลองด้วยประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.27 จากการทดลองพบว่าปริมาณแสง 0% วัดค่าความเข้มแสงได้ 0 Lux กำจัดสีผสมอาหารได้ 0% ปริมาณแสง 25% วัดค่าความเข้มแสงได้ 1,735 Lux กำจัดสีผสมอาหารได้ 17% ปริมาณแสง 50% วัดค่าความเข้มแสงได้ 4,650 Lux กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ในเวลา 20 นาที ปริมาณแสง 75% วัดค่าความเข้มแสงได้ 7,700 Lux กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ในเวลา 10 นาที และปริมาณแสง 100% วัดค่าความเข้มแสงได้ 12,010 Lux กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ในเวลา 20 นาที จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคามเข้มแสงขึ้นจะช่วยในการเร่งการแยกของอิเล็กตรอนไปที่ชั้นการนำและเกิดโฮลที่ชั้นวาเลนซ์ ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้ำในสารละลายให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลมากและเกิดการกำจัดสีผสมอาหารได้ดี แต่อย่างไรก็ตามที่ค่าความเข้มแสง 75% (7,700 Lux) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหารได้ดีที่สุด เนื่องจากการให้แสงไฟที่ 100% อาจมีความเข้มแสงที่ปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดความร้อนส่งผลต่อการทำงานให้ขั้วไฟฟ้าไม่เสถียร ดังนั้นในการทดลองที่ใช้ปริมาณแสง 75% มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสีผสมอาหารโดยมีความเข้มแสง 7,700 Lux เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ต่อไป

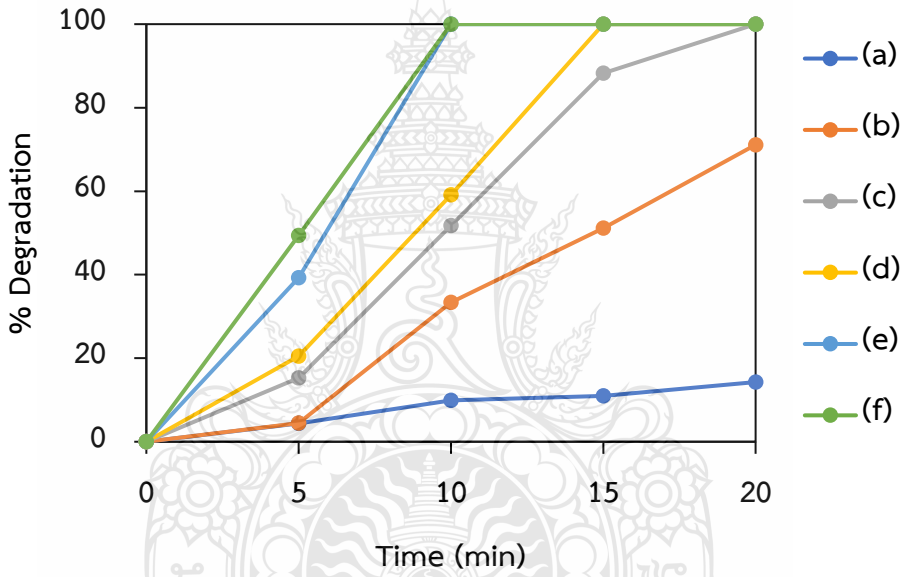


ภาพที่ 4.27 (A)เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่ค่าความเข้มของแสงที่แตกต่างกันคือ (a)ปริมาณ 0%, (b)ปริมาณ 25%, (c)ปริมาณ 50%, (d)ปริมาณ 75%, และ(e) ปริมาณ 100% (B)ภาพการจัดอุปกรณ์สำหรับศึกษาความเข้มของแสงจากต้นกำเนิดแสงในระบบ PEC

4.3.2.4 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์

จากการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำหน้าที่สมดุลประจุภายในระบบ โดยได้ศึกษาที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.5% NaCl, 1.0% NaCl, 1.5% NaCl, 2.0% NaCl, 2.5% NaCl, และ3.0% NaCl ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.28 พบว่าที่ความเข้มข้น 0.5% NaCl กำจัดสีผสมอาหารได้ 14% ความเข้มข้น 1.0% NaCl กำจัดสีผสมอาหารได้ 71% ความเข้มข้น 1.5% NaCl กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ในระยะเวลา 20 นาที ความเข้มข้น 2.0% NaCl กำจัดสีได้ 100% ในระยะเวลา 15 นาที และความเข้มข้น 2.5% NaCl และ 3.0% NaCl กำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ในระยะเวลา 10 นาที เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหารพบว่าความเข้มข้น 2.5% NaCl และ3.0% NaCl มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ได้ดีที่สุด เนื่องจากยิ่งมีความเข้มข้นที่สูงของสารอิเล็กโทรไลต์ยิ่งทำให้การ

ส่งผ่านอิเล็กตรอนในระบบเกิดได้ดี และสังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ต่ำลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากทฤษฎีเมื่อความเข้มข้นลดลงการแตกตัวของไอออนก็จะลดลงส่งผลทำให้การนำไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ถึงแม้ว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นสูงๆจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี แต่ก็ยังมีข้อเสียคือความเค็มของโซเดียมคลอไรด์ส่งผลต่อรสชาติของผักและผลไม้ และยังส่งผลต่อระบบวงจรไฟฟ้าหรือวัสดุของตัวเครื่องอาจทำให้เกิดสนิมขึ้นได้ ดังนั้นในการทดลองนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่ 2.5% NaCl ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดเทียบเท่ากับความเข้มข้นของ 3% NaCl และมีความเค็มที่ลดลงมาในการศึกษาประสิทธิภาพของสภาวะอื่นๆ ต่อไป



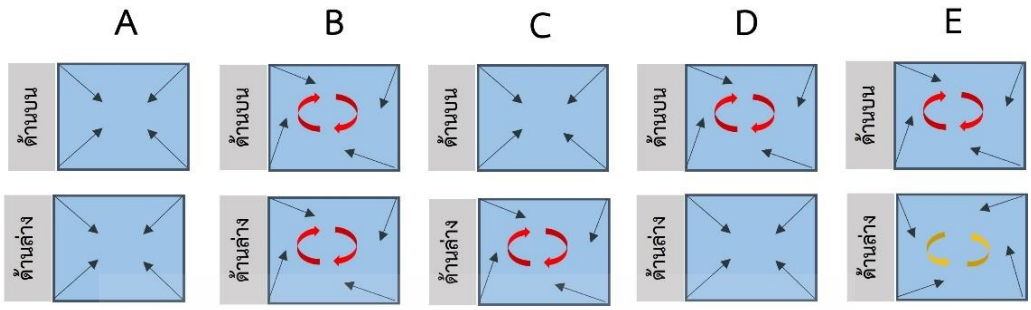
ภาพที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ที่แตกต่างกันคือ (a)0.5% NaCl, (b)1.0% NaCl, (c)1.5% NaCl, (d)2.0% NaCl, (e)2.5% NaCl, และ (f)3.0% NaCl

4.3.2.5 ผลการศึกษาผลของทิศทางการไหลเวียนของสารละลายในระบบ

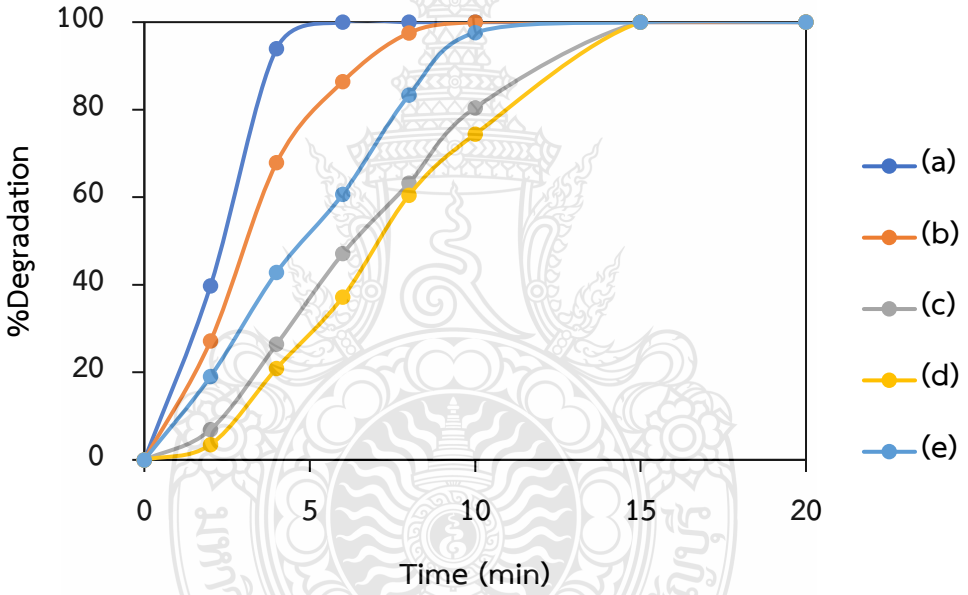
การศึกษาทิศทางการไหลของสารละลายในระบบซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารลายเพื่อให้อนุมูลไฮดรอกซิลและแอคทีฟคลอรีนมีการกระจายตัวออกจากหน้าขั้วไฟฟ้า เพื่อไปกำจัดสารอินทรีย์สารฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนทิศทางของหัวฉีดทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งวางอยู่ในตำแหน่งมุม 4 มุม มุมละ 2 ตัว ด้านบนและด้านล่าง ได้ศึกษาทิศทางการไหลทั้งหมด 5 แบบ ได้แก่

- แบบ A หัวฉีดทั้งหมด 8 ตัว ทั้งด้านบนและด้านล่างฉีดเข้าหาบริเวรตรงกลาง
- แบบ B หัวฉีดทั้งหมด 8 ตัว ทั้งด้านบนและด้นล่างฉีดหันไปทางเดียวกัน
- แบบ C หัวฉีด 4 ตัวด้านบนฉีดเข้าหาตรงกลาง หัวฉีด 4 ตัวด้านล่าง หันไปทางเดียวกัน
- แบบ D หัวฉีด 4 ตัวด้านบนหันไปทางเดียวกัน หัวฉีด 4 ตัวด้านล่าง ฉีดเข้าหาตรงกลาง
- แบบ E หัวฉีด 4 ตัวด้านบนและด้านล่างหันทิศทางตรงกันข้าม

ดังแสดงในภาพที่ 4.29 จากผลการศึกษาทิศทางการไหลของสารละลาย โดยกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.30 พบว่าทิศทางการไหลแบบ A มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color มากที่สุด เนื่องจากทิศทางการไหลของสารละลายจากหัวฉีดทั้ง 8 ตัว มีทิศทางที่ฉีดเข้าหาบริเวณตรงกลางทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการวนของสารละลายทั่วทั้งระบบและทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเคลื่อนที่จากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไปกำจัดสีผสมอาหารได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึงทั้งระบบ ส่วนทิศทางการไหลแบบหัวฉีดไปทิศทางเดียวกันทำให้เกิดเป็นกระแสน้ำวนขึ้นอาจทำให้เกิดจุดที่ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลและแอคทีฟคลอรีนเคลื่อนที่ไปกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ได้ช้าลง และอาจทำให้เกิดบริเวณ Dead zone ดังนั้นจากการศึกษานี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ทิศทางการไหลแบบ A ในการศึกษาสภาวะอื่นต่อไป



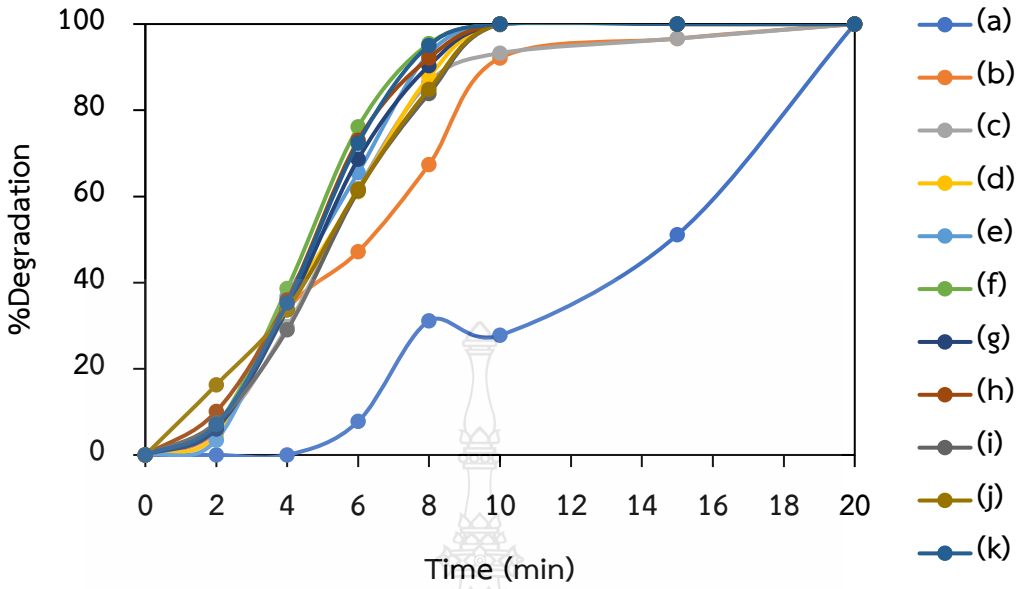
ภาพที่ 4.29 แสดงรูปแบบทิศทางการไหลของสารละลายในระบบเครื่องล้างผักและผลไม้ (a)แบบ A, (b)แบบ B, (c)แบบ C, (d)แบบ D, และ(e)แบบ E



ภาพที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่ความแตกต่างกันของระบบการทำให้เกิดน้ำไหลวน คือ (a)แบบ A, (b)แบบ B, (c)แบบ C, (d)แบบ D, และ (e)แบบ E

4.3.2.6 ผลการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายในระบบ

จากผลของการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายภายในระบบ เพื่อศึกษาความแรงของการดันน้ำผ่านผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไปยังสารละลายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ดังนี้ (a) ปิดระบบการไหลทั้งหมด Control, (b) ปิดหัวฉีดเหลือเฉพาะหัวฉีดตรงกลาง 0 L/min, (c)เปิดหัวฉีดทั้ง 4 มุมและตรงกลาง 1 L/min, (d)2 L/min, (e)3 L/min, (f)4 L/min, (g)5 L/min, (h)6 L/min, (i)7 L/min, (j)8 L/min, และ(k)9 L/min ติดตามผลด้วยการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.31 พบว่าเมื่อปิดอัตราการไหลของระบบทั้งหมดทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีผสมอาหารนั้นกำจัดได้ช้าที่สุด เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลมีอายุที่สั้นมากเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็วและจะมีการแพร่ออกมาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเท่านั้น ในส่วนของสารละลายที่อยู่ไกลออกไปจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นจะไม่ถูกกำจัดหรือถูกกำจัดได้ได้ช้าเพราะต้องอาศัยหลักการการแพร่ของความต่างกันของความเข้มข้น สำหรับแอคทีฟคลอรีนที่มีอายุอยู่ในสารละลายได้นานกว่าอนุมูลไฮดรอกซิล แต่หากไม่มีการช่วยให้เกิดการกระจายจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์บริเวณที่อยู่ห่างจากขั้วไฟฟ้าเช่นกัน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่มีการกำจัดได้ช้าหรืออาจจะต้องใช้เวลานานขึ้นในการกำจัดทั้งหมด และเมื่อเปิดอัตราการไหลของระบบพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลายช่วยอนุมูลไฮดรอกซิลและแอคทีฟคลอรีนเคลื่อนที่จากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไปกำจัดสีผสมอาหารได้ทั้งระบบและสารละลายไหลหมุนเวียนเข้ามาบริเวณหน้าขั้วไฟฟ้าจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดที่ดี จากผลการทดลองอัตราการไหลที่ดีที่สุดคือ 4 L/min สามารถกำจัดสีผสมอาหารได้ 100% ในระยะเวลา 10 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ในขณะเดียวกันที่อัตราการไหลดังกล่าวยังมีความเหมาะสมเนื่องจากมีความแรงของตัวฉีดที่พอดีไม่ทำให้สารละลายในระบบกระเด็นมาถูกตัวเครื่องและตัวโลหะจับขั้วไฟฟ้าแอโนดจึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายจากการเกิดสนิม ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการไหลนี้ที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการศึกษาสภาวะอื่นต่อไป



ภาพที่ 4.31 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่สภาวะอัตราการไหลที่แตกต่างกันคือ (a)control, (b)0 L/min, (c)1 L/min, (d)2 L/min, (e)3 L/min, (f)4 L/min, (g)5 L/min, (h)6 L/min (i)7 L/min, (j)8 L/min, และ(k)9 L/min

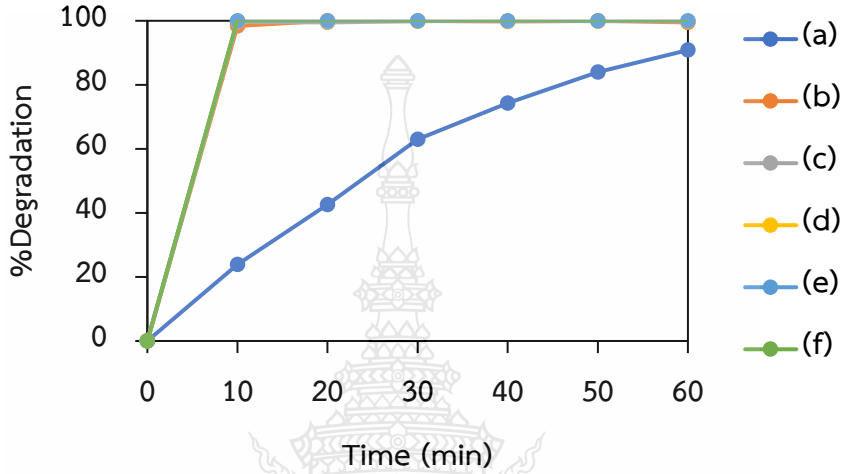
ตารางที่ 4.3 ค่าการกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ของ(a)control, (b)0 L/min, (c)1 L/min, (d)2 L/min, (e)3 L/min, (f)4 L/min, (g)5 L/min, (h)6 L/min (i)7 L/min, (j)8 L/min, และ(k)9 L/min

Time (min)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	6	4	3	7	6	10	8	16	7
4	0	34	30	34	37	39	34	36	29	34	35
6	8	47	62	61	66	76	69	73	61	62	72
8	31	67	87	88	93	95	90	92	84	85	95
10	28	92	93	100	100	100	100	100	100	100	100
15	51	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

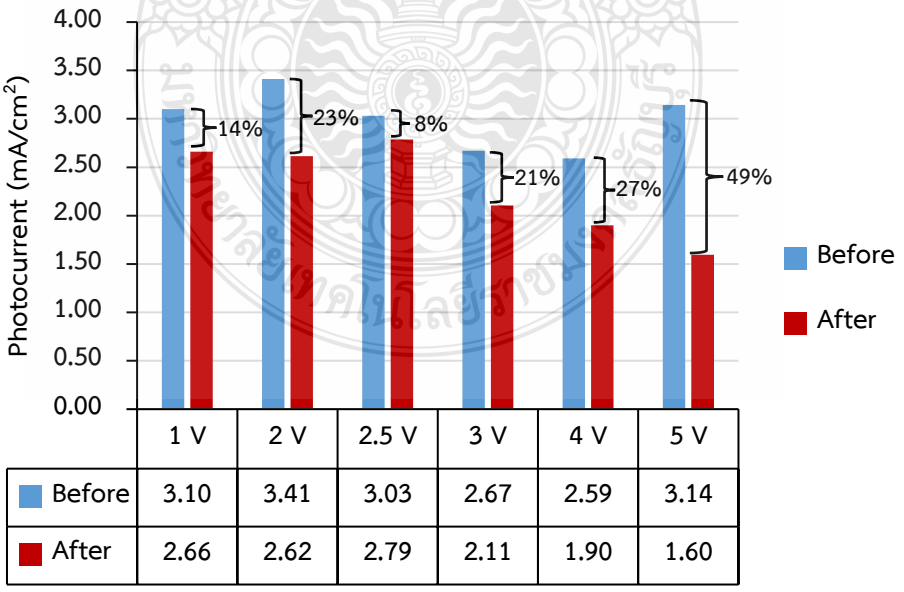
4.3.2.7 ผลการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและความเสถียรของขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและความเสถียรของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้ามีความสำคัญในการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนที่ชั้นการนำจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด เพื่อให้อิเล็กตรอนมีการไหลได้อย่างเหมาะสม ซึ่งช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการแยกอิเล็กตรอนกับโฮล ให้ออกจากกันได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นโฮลจะมีความเป็นบวกที่สูงมากและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลและแอคทีฟคลอรีนได้ปริมาณมากๆ เมื่อเกิดไฮดรอกซิลและแอคทีฟคลอรีนเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง จะส่งผลทำให้เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ของกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าจะใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะช่วยทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีขึ้นก็ตาม แต่ถ้าใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากๆ จนเกินไปอาจทำให้สารกึ่งตัวนำที่เคลือบอยู่บนผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดนั้นหลุดออกมาได้ เนื่องจากเกิดการออกซิไดซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าออกมา ดังนั้นจึงต้องศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อขั้วไฟฟ้าแอโนด จากการศึกษานี้แบ่งการศึกษาผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1 V, 2 V, 2.5 V, 3 V, 4 V, และ5 V โดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ แก่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งได้ติดตามผลจากค่าการกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 30 ppm เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของแต่ละค่าศักย์ไฟฟ้าพร้อมกับติดตามผลจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในสารละลายน้ำด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Amperometry) เป็นเวลา 90 วินาที โดยสลับสภาวะที่ให้แสงและไม่ให้แสงทุกๆ 10 วินาที จนครบตามเวลาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ทั้งก่อนการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าและหลังจากให้ศักย์ไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบความเสถียรของขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งในการวิเคราะห์ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) คือขั้วไฟฟ้า FTO/Bi_2WO_6-WO_3 ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) คือ Ag/AgCl และใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) คือ Pt จากผลการทดลองของการกำจัดสีผสมอาหารพบว่าเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำมีการกำจัดสีผสมอาหารได้น้อย เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลทำให้เกิดการกำจัดสีผสมอาหารเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.32 จากนั้นได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในสารละลายน้ำ จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้า 1 V พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจากเดิม 14% ที่ศักย์ไฟฟ้า 2 V มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจากเดิม 23% ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 2.5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจากเดิม 8% ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 3 V มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจากเดิม 21% ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 4 V มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจากเดิม 27% และที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลง 49% ดังแสดงในภาพที่ 4.33 ถึงแม้ว่าการให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงๆ จะมีประสิทธิภาพในการเกิดออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่สูงตามไปด้วยก็ตาม แต่เมื่อ

ให้ศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ความเสถียรหรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นลดลงไปด้วยในการใช้ขั้วไฟฟ้าซ้ำ ดังนั้นเราจึงต้องคำนึงทั้งประสิทธิภาพในการทำงานของขั้วไฟฟ้าร่วมกับการถนอมอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า จึงเลือกใช้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 2.5 V แก่ระบบเครื่องล้างผักและผลไม้สำหรับกำจัดยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์



ภาพที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ในระยะเวลา 20 นาที ที่สภาวะค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังนี้ (a)1 V, (b)2 V, (c)2.5 V, (d)3 V, (e)4 V, และ(f)5 V



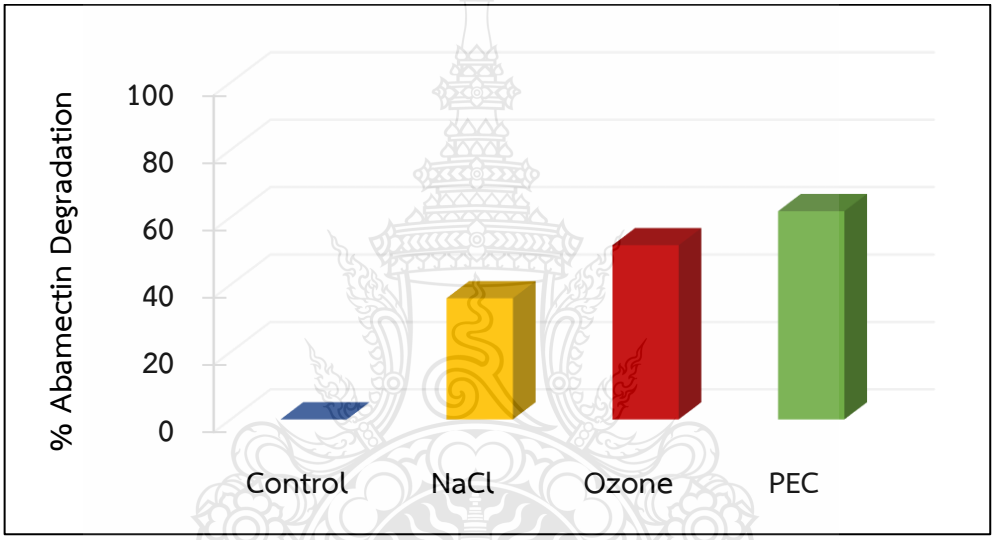
	1 V	2 V	2.5 V	3 V	4 V	5 V
Before	3.10	3.41	3.03	2.67	2.59	3.14
After	2.66	2.62	2.79	2.11	1.90	1.60

ภาพที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์ค่าความเสถียรของขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการกำจัดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

4.3.2.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงในผักของเครื่องล้างผักเซลล์ต้นแบบกับเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด

จากการศึกษาเพื่อพัฒนาเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ ยาฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกเครื่องล้างผักที่ใช้ระบบโอโซน (Ozone) มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินในตัวอย่างผักที่ขายตามท้องตลาด โดยมีตัวอย่างผักที่นำมาทดสอบคือ ถั่วฝักยาว ที่เก็บหลังจากพ่นยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินทิ้งไว้ 1 วัน ใช้ตัวอย่างถั่วฝักยาวในแต่ละการทดลองปริมาณ 500 กรัม นำมาทดลองเปรียบเทียบโดยมีการทดลอง ดังนี้ control, การแช่ด้วย NaCl, การล้างด้วยเครื่องล้างผักโดยใช้โอโซน และเครื่องล้างผักด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (PEC) ใช้เวลาในการกำจัดยาฆ่าแมลงเป็นเวลา 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.34 จากนั้นนำตัวอย่างถั่วฝักยาวใส่ในถุงเก็บตัวอย่างแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ตลอดการวิเคราะห์ ซึ่งในการิเคราะห์ได้ส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยวิธี In-house method TE-CH-309 based on QuEChERS Method EN 15662:2018 ที่ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างถั่วฝักยาวที่ไม่ผ่านการล้างมีปริมาณของยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินเท่ากับ 0.89 mg/kg ถั่วฝักยาวที่ผ่านการแช่น้ำเกลือมีปริมาณยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินเท่ากับ 0.57 mg/kg ถั่วฝักยาวที่ผ่านการล้างด้วยเครื่องล้างผักระบบโอโซนมีปริมาณยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินเหลือเท่ากับ 0.43 mg/kg และถั่งฝักยาวที่ล้างด้วยเครื่องล้างผักกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกมีปริมาณยาฆ่าแมลงเหลือเท่ากับ 0.34 mg/kg โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลงได้เป็น Control กำจัดยาฆ่าแมลงได้ 0% การแช่น้ำเกลือสามารถกำจัดยาฆ่าแมลงได้ 36% การล้างด้วยเครื่องล้างผักโอโซนสามารถกำจัดยาฆ่าแมลงได้ 52% เครื่องล้างผักด้วยกรระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสามารถกำจัดยาฆ่าแมลงได้ 62% จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินในถั่วฝักยาวพบว่าการล้างผักด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดยาฆ่าแมลง ดังแสดงในภาพที่ 4.35

ภาพที่ 4.34 แสดงภาพการทดลองของการล้างผักถั่วฝักยาว (a) control, (b)การแช่ด้วย NaCl, (c)การล้างด้วยเครื่องล้างผักโอโซน (Ozone) และ(d)เครื่องล้างผักด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (PEC)



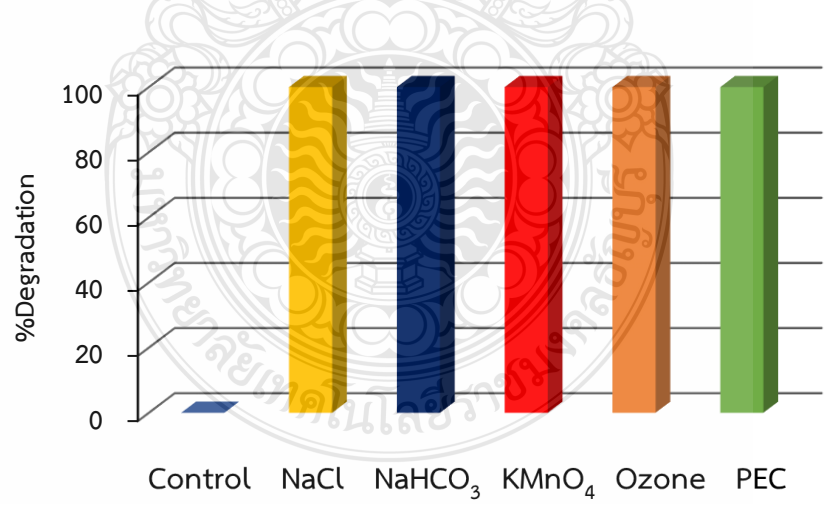
ภาพที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลงอะบาเมกตินในถั่วฝักยาวที่เวลา 20 นาทีเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ คือ NaCl, Ozone, และระบบ PEC

4.3.2.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของเครื่องล้างผักและผลไม้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองคือ (1) การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ Total coliform คือเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ อาจมีทั้งที่ก่อโรคและไม่ก่อโรคต่อร่างกายมนุษย์ และ(2) การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* เป็นเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม coliform รูปแท่งแบบแกรมลบ ที่สามารถเจริญได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน (facultative anaerobic) ซึ่งมักพบในลำไส้ส่วนล่างของสิ่งมีชีวิตเลือดอุ่น เชื้อ *E. coli* ส่วนใหญ่ไม่เป็นอันตราย แต่ซีโรไทป์บางชนิด (EPEC, ETEC และอื่นๆ) อาจทำให้อาหารเป็นพิษร้ายแรงใน

โฮสต์ ทำให้เกิดอาการท้องเสียบ่อย ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลวหรือเป็นน้ำ ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองที่กล่าวไปนั้นเหมาะสำหรับการนำมาศึกษาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก และผู้วิจัยได้เลือกตัวอย่างของผลไม้ที่มาศึกษาคือแอปเปิ้ลในการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในตัวอย่างจริง โดยได้ทดลองเปรียบเทียบการกำจัดกับวิธีการล้างผักและผลไม้ที่มักนิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ 1.การล้างด้วยน้ำเปล่า(Control), 2.การแช่น้ำเกลือ(NaCl), 3.การแช่ผงฟู($NaHCO_3$), 4.การแช่ด้วยด่างทับทิม($KMnO_4$), 5.การล้างด้วยระบบโอโซน(Ozone), และ6.การใช้ระบบ PEC จากผลของการศึกษาการกำจัดเชื้อ Total coliform ในตัวอย่างแอปเปิ้ล ได้ทดลองใช้แอปเปิ้ลน้ำหนัก 10 กรัม แช่ในน้ำประปาที่ได้จากก๊อกน้ำทั่วไปเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างแอปเปิ้ลไปกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างแอปเปิ้ลไปวิเคราะห์เพื่อหาเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.36

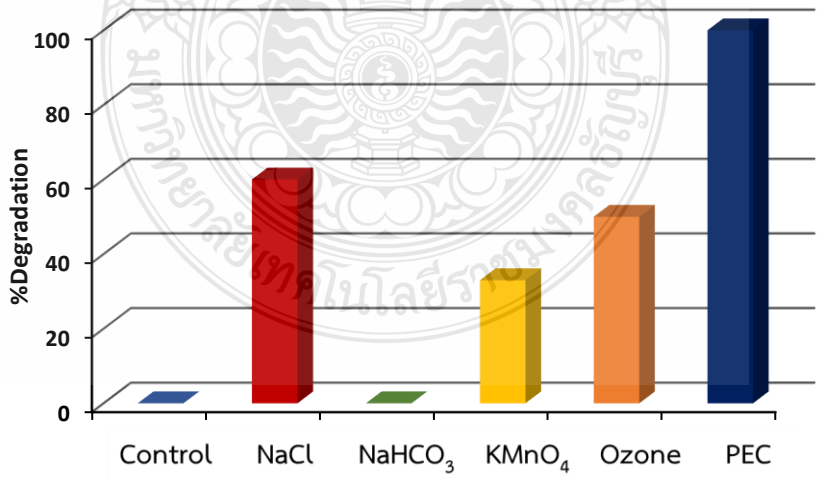
ภาพที่ 4.36 แสดงภาพการทดลองการกำจัดเชื้อจุลลินทรีย์ *E. coli*



ภาพที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ Total coliform ด้วยการล้างด้วยน้ำเปล่า(Control), การแช่น้ำเกลือ(NaCl), การแช่ผงฟู($NaHCO_3$), การแช่ด้วยด่างทับทิม($KMnO_4$), การล้างด้วยระบบโอโซน(Ozone), และการใช้ระบบ PEC ในระยะเวลา 10 นาที

จากผลการทดลองพบว่าแอปเปิ้ลที่ผ่านการล้างน้ำเปล่ามีเชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตขึ้นเพียงตัวอย่างเดียว และแอปเปิ้ลที่ผ่านการล้างด้วยวิธีต่างๆ สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ 100% ภายในระยะเวลา 10 นาที เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ Total coliform เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่มีปริมาณน้อยมากเพราะในน้ำประปามีการบำบัดด้วยคลอรีนจึงเป็นสาเหตุทำให้กระบวนการล้างด้วยวิธีต่างๆ สามารถกำจัดเชื้อชนิดนี้ได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 4.37

จากนั้นได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli* ในตัวอย่างแอปเปิ้ล ซึ่งได้ทดลองใช้แอปเปิ้ลน้ำหนัก 10 กรัม แช่ในเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli* ความเข้มข้น $10^{\wedge 3}$ CFU เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างแอปเปิ้ลไปกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้ 1.การล้างด้วยน้ำเปล่า(Control), 2.การแช่น้ำเกลือ(NaCl), 3.การแช่ผงฟู($NaHCO_3$), 4.การแช่ด้วยด่างทับทิม($KMnO_4$), 5.การล้างด้วยระบบโอโซน(Ozone), และ6.การใช้ระบบ PEC จากนั้นเก็บตัวอย่างแอปเปิ้ลที่ผ่านการล้างเป็นเวลา 10 นาที เพื่อไปวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4.38 จากผลการทดลองพบว่าวิธีการกำจัดเชื้อ *E.coli* ด้วยวิธีการแช่น้ำเปล่ากำจัดได้เชื้อได้ 0%, การแช่ด้วย NaCl สามารถกำจัดได้ 60%, การแช่ด้วย $NaHCO_3$ สามารถกำจัดเชื้อได้ 0%, การแช่ด้วย $KMnO_4$ สามารถกำจัดเชื้อได้ 33%, การล้างด้วยระบบโอโซนสามาถกำจัดเชื้อได้ 50% และการล้างด้วยระบบ PEC สามารถกำจัดเชื้อได้ 100% ในระยะเวลา 10 นาที จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถยืนยันและแสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ดีของเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ดี



ภาพที่ 4.38 เปอร์เซ็นต์การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli* ด้วยการล้างด้วยน้ำเปล่า(Control), การแช่น้ำเกลือ(NaCl), การแช่ผงฟู($NaHCO_3$), การแช่ด้วยด่างทับทิม($KMnO_4$), การล้างด้วยระบบโอโซน(Ozone), และการใช้ระบบ PEC ในระยะเวลา 10 นาที

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ ยาฆ่าแมลง และเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก โดยศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการตรึงแบบไซคลิกโวลแทมเมตรีเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการเตรียมขั้วไฟฟ้า WO_3/$BiVO_4$ ลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ ได้ศึกษาคุณลักษณะต่างๆ และกลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นกับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกดังมีรายละเอียดสรุปได้ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง เป็นการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ Bi_2WO_6-WO_3 เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคือควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง 0.8 V ควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 80 °C ตลอดระยะเวลาการตรึง อัตราการสแกน 25 mV/s จำนวนการตรึง 30 รอบ และอุณหภูมิในการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยพิจารณาจากค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำภายใต้สภาวะการเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น พบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้คืออัตราการสแกน 25 mV/s มีการสะสมและจัดเรียงตัวของอนุภาคฟิล์มที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสูงที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานและลักษณะสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมาก นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันโครงสร้างผลึก Bi_2WO_6-WO_3 สารผสมที่ส่งเสริมให้เกิดการส่งผ่านประจุและเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในสารละลายน้ำได้ดี จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิดันในสารละลายน้ำกับขั้วไฟฟ้า WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติ พบว่าขั้วไฟฟ้า WO_3/$BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้มากกว่าขั้วไฟฟ้า Bi_2WO_6-WO_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ส่งผลทำให้มีค่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากและมีประสิทธิภาพในการ

เกิดปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ที่ดี ดังนั้นในส่วนแรกของงานวิจัยนี้จึงได้เลือกขั้วไฟฟ้า $WO_3/BiVO_4$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบอัตโนมัติเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์โฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป

ส่วนที่สอง เป็นการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำกับเซลล์ต้นแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ โดยได้ออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยมีรูปแบบเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีขั้วไฟฟ้าแอโนด $FTO/WO_3/BiVO_4$ ขนาด 25x15 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น ประกบด้วยหลอดไฟในการให้แสงด้านหลังขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด Stainless steel ขนาด 25x15 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น วางตำแหน่งบริเวณหลังหลอดไฟ ใช้ระบบไหลเวียนสารละลายด้วยปั๊มน้ำที่มีทิศทางฉีดน้ำ 4 มุมด้านข้างทั้งหมด 8 ตัวทำงานร่วมกับปั๊มน้ำบริเวณตรงกลางที่พ่นน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเพื่อให้เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของผักผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 4 L/min ปริมาตรของสารละลาย 15 ลิตร ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ 2.5% NaCl เร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า 2 V ซึ่งมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่ดี สามารถกำจัดสารอินทรีย์สีผสมอาหาร Orange red color ความเข้มข้น 3 ppm ได้ 100% ในระยะเวล 10 นาที ภายใต้กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่เร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น และสามารถกำจัดยาฆ่าแมลง Abamectin บนถั่วฝักยาวได้ 62% ในระยะเวลา 20 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักและผลไม้ที่ขายตามท้องตลอดพบว่าเครื่องล้างผักด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดยาฆ่าแมลง นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ Total coliform ได้ 100% ในระยะเวลา 10 นาที และสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* ได้ 100% ในระยะเวลา 10 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมากกว่าการใช้น้ำเปล่าหรือการใช้สารออกซิไดซ์ที่เป็นวิธีดั้งเดิมรวมถึงการใช้เครื่องล้างผักระบบโอโซนที่เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เป็นการยืนยันได้ว่าเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นเครื่องล้างผักผลไม้ระดับครัวเรือนเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในอนาคตต่อไป ซึ่งจะสามารถช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนหรือผู้บริโภคให้รับประทานผักผลไม้ที่สะอาดปลอดภัยจากสารปนเปื้อนที่อันตรายได้เป็นอย่างดี

บรรณานุกรม

[1] *Oriental Journal of Chemistry,* vol. 35, no. Special Issue 1, 2019, doi: 10.13005/ojc/350101.

[2] " Metal Deposition: Plasma-Based Processes," in *Encyclopedia of Plasma Technology*, 2016, pp. 722-740.

[3] A. Mishra, N. Bhatt, and A. K. Bajpai, "Nanostructured superhydrophobic coatings for solar panel applications," in *Nanomaterials-Based Coatings*, 2019, pp. 397-424.

[4] T. Rout, S. Bera, G. Udayabhanu, and R. Narayan, "Methodologies of Application of Sol-Gel Based Solution onto Substrate: A Review," *Journal of Coating Science and Technology,* vol. 3, no. 1, pp. 9-22, 2016, doi: 10.6000/2369-3355.2016.03.01.2.

[5] M. K. Paidi *et al.*, "Mitigation of organophosphorus insecticides from environment: Residual detoxification by bioweapon catalytic scavengers," *Environmental Research,* vol. 200, p. 111368, 2021/09/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111368.

[6] Q. Zhang, Z. Lu, C.-H. Chang, C. Yu, X. Wang, and C. Lu, "Dietary risk of neonicotinoid insecticides through fruit and vegetable consumption in school-age children," *Environment International,* vol. 126, pp. 672-681, 2019/05/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.051.

[7] S. Y. Foong *et al.*, "A recent global review of hazardous chlorpyrifos pesticide in fruit and vegetables: Prevalence, remediation and actions needed," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 400, p. 123006, 2020/12/05/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123006.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[8] M. Jankowska, B. Łozowicka, and P. Kaczyńnski, "Comprehensive toxicological study over 160 processing factors of pesticides in selected fruit and vegetables after water, mechanical and thermal processing treatments and their application to human health risk assessment," *Science of The Total Environment,* vol. 652, pp. 1156-1167, 2019/02/20/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.324.

[9] R. Žabar, T. Komel, J. Fabjan, M. B. Kralj, and P. Trebše, "Photocatalytic degradation with immobilised TiO_2 of three selected neonicotinoid insecticides: Imidacloprid, thiamethoxam and clothianidin," *Chemosphere,* vol. 89, no. 3, pp. 293-301, 2012/09/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.039.

[10] X. Wang, R. Ji, and R. Chen, "Research on thiamethoxam detection and ultraviolet degradation modeling based on fluorescence analysis," *Optik,* vol. 176, pp. 476-481, 2019/01/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.07.100.

[11] Z. Lu, J. Gan, X. Cui, L. Delgado-Moreno, and K. Lin, "Understanding the bioavailability of pyrethroids in the aquatic environment using chemical approaches," *Environment International,* vol. 129, pp. 194-207, 2019/08/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.035.

[12] T. Gong *et al.*, "An engineered Pseudomonas putida can simultaneously degrade organophosphates, pyrethroids and carbamates," *Science of The Total Environment,* vol. 628-629, pp. 1258-1265, 2018/07/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.143.

[13] W. Tang *et al.*, "Pyrethroid pesticide residues in the global environment: An overview," *Chemosphere,* vol. 191, pp. 990-1007, 2018/01/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.115.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[14] M. A. Radwan, M. M. Abu-Elamayem, M. H. Shiboob, and A. Abdel-Aal, "Residual behaviour of profenofos on some field-grown vegetables and its removal using various washing solutions and household processing," *Food and Chemical Toxicology,* vol. 43, no. 4, pp. 553-557, 2005/04/01/ 2005, doi: https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.12.009.

[15] S. Ruengprapavut, T. Sophonnithiprasert, and N. Pongpoungphet, "The effectiveness of chemical solutions on the removal of carbaryl residues from cucumber and chili presoaked in carbaryl using the HPLC technique," *Food Chemistry,* vol. 309, p. 125659, 2020/03/30/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125659.

[16] Y. Liu *et al.*, "Effects of electrolyzed water treatment on pesticide removal and texture quality in fresh-cut cabbage, broccoli, and color pepper," *Food Chemistry,* vol. 353, p. 129408, 2021/08/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129408.

[17] M. C. Vagi and A. S. Petsas, "Recent advances on the removal of priority organochlorine and organophosphorus biorecalcitrant pesticides defined by Directive 2013/39/EU from environmental matrices by using advanced oxidation processes: An overview (2007–2018)," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* vol. 8, no. 1, p. 102940, 2020/02/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102940.

[18] R. Pandiselvam *et al.*, "Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods–a review," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 97, pp. 38-54, 2020/03/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.017.

[19] M. Balawejder, P. Antos, and S. Sadło, "Potential of ozone utilization for reduction of pesticide residue in food of plant origin. A review," (in eng), *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny,* vol. 64, no. 1, pp. 13-8, 2013.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[20] N. A. Mir, A. Khan, M. Muneer, and S. Vijayalakhsmi, "Photocatalytic degradation of a widely used insecticide Thiamethoxam in aqueous suspension of TiO_2: Adsorption, kinetics, product analysis and toxicity assessment," *Science of The Total Environment,* vol. 458-460, pp. 388-398, 2013/08/01/ 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.041.

[21] N. M. El-Shafai, M. E. El-Khouly, M. El-Kemary, M. S. Ramadan, A. S. Derbalah, and M. S. Masoud, "Fabrication and characterization of graphene oxide–titanium dioxide nanocomposite for degradation of some toxic insecticides," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* vol. 69, pp. 315-323, 2019/01/25/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.09.045.

[22] R. Khaghani, B. Kakavandi, K. Ghadirinejad, E. Dehghani Fard, and A. Asadi, "Preparation, characterization and catalytic potential of γ-Fe_2O_3@AC mesoporous heterojunction for activation of peroxymonosulfate into degradation of cyfluthrin insecticide," *Microporous and Mesoporous Materials,* vol. 284, pp. 111-121, 2019/08/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.04.013.

[23] Z. Liu *et al.*, "Preparation and preferential photocatalytic degradation of acephate by using the composite photocatalyst Sr/TiO_2-PCFM," *Chemical Engineering Journal,* vol. 374, pp. 852-862, 2019/10/15/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.06.013.

[24] P. N. Reddi, B. Surendra, P. Thanusha, and M. Vangalapati, "Optimisation for Photocatalytic Degradation of Malathion by Box–Behnken Design," *Materials Today: Proceedings,* vol. 5, no. 9, Part 3, pp. 18221-18229, 2018/01/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.158.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[25] G. Roselló-Márquez, R. M. Fernández-Domene, R. Sánchez-Tovar, S. García-Carrión, B. Lucas-Granados, and J. García-Antón, "Photoelectrocatalyzed degradation of a pesticides mixture solution (chlorfenvinphos and bromacil) by WO_3 nanosheets," *Science of The Total Environment,* vol. 674, pp. 88-95, 2019/07/15/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.150.

[26] N. Philippidis, S. Sotiropoulos, A. Efstathiou, and I. Poulios, "Photoelectrocatalytic degradation of the insecticide imidacloprid using TiO_2/Ti electrodes," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry,* vol. 204, no. 2, pp. 129-136, 2009/05/20/ 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2009.03.007.

[27] B. Ayoubi-Feiz, M. H. Mashhadizadeh, and M. Sheydaei, "Preparation of reusable nano N-TiO_2/graphene/titanium grid sheet for electrosorption-assisted visible light photoelectrocatalytic degradation of a pesticide: Effect of parameters and neural network modeling," *Journal of Electroanalytical Chemistry,* vol. 823, pp. 713-722, 2018/08/15/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.07.020.

[28] S. Palmas, L. Mais, M. Mascia, and A. Vacca, "Trend in using TiO_2 nanotubes as photoelectrodes in PEC processes for wastewater treatment," *Current Opinion in Electrochemistry,* vol. 28, p. 100699, 2021/08/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100699.

[29] İ. Ç. Davaslıoğlu *et al.*, "WO_3 decorated TiO_2 nanotube array electrode: Preparation, characterization and superior photoelectrochemical performance for rhodamine B dye degradation," *Journal of Molecular Structure,* vol. 1241, p. 130673, 2021/10/05/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130673.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[30] A. Nagar and S. Basu, "Ternary g-C_3N_4/Ag/$BiVO_4$ nanocomposite: Fabrication and implementation to remove organic pollutants," *Environmental Technology & Innovation,* vol. 23, p. 101646, 2021/08/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101646.

[31] Y.-C. Lu, C.-C. Chen, and C.-S. Lu, "Photocatalytic degradation of bis(2-chloroethoxy)methane by a visible light-driven $BiVO_4$ photocatalyst," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,* vol. 45, no. 3, pp. 1015-1024, 2014/05/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.08.005.

[32] A. Dehdar, G. Asgari, M. Leili, T. Madrakian, and A. Seid-mohammadi, "Step-scheme $BiVO_4$/WO_3 heterojunction photocatalyst under visible LED light irradiation removing 4-chlorophenol in aqueous solutions," *Journal of Environmental Management,* vol. 297, p. 113338, 2021/11/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113338.

[33] M. G. Peleyeju and E. L. Viljoen, "WO_3-based catalysts for photocatalytic and photoelectrocatalytic removal of organic pollutants from water – A review," *Journal of Water Process Engineering,* vol. 40, p. 101930, 2021/04/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101930.

[34] T. Chankhanittha, V. Somaudon, T. Photiwat, K. Hemavibool, and S. Nanan, "Preparation, characterization, and photocatalytic study of solvothermally grown CTAB-capped Bi2WO6 photocatalyst toward photodegradation of Rhodamine B dye," *Optical Materials,* vol. 117, p. 111183, 2021/07/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111183.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[35] Y. He *et al.*, "Photocatalytic degradation of tetracycline by metal-organic frameworks modified with Bi_2WO_6 nanosheet under direct sunlight," *Chemosphere,* vol. 284, p. 131386, 2021/12/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131386.

[36] A. Kumar *et al.*, "Facile hetero-assembly of superparamagnetic Fe_3O_4/$BiVO_4$ stacked on biochar for solar photo-degradation of methyl paraben and pesticide removal from soil," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry,* vol. 337, pp. 118-131, 2017/03/15/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.01.010.

[37] X. Huang, J. Song, L. Wang, X. Gu, Y. Zhao, and Y. Qiang, "Photoelectrochemical properties of ZnO/$BiVO_4$ nanorod arrays prepared through a facile spin-coating deposition route," *Materials Science in Semiconductor Processing,* vol. 97, pp. 106-111, 2019/07/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.03.019.

[38] C. Doroody *et al.*, "A comparative study of CdS thin films grown on ultra-thin glass substrates by RF magnetron sputtering and chemical bath deposition," *Materials Science in Semiconductor Processing,* vol. 133, p. 105935, 2021/10/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105935.

[39] S. Limwichean, P. Eiamchai, C. Ponchio, N. Kasayapanand, and M. Horprathum, "Comparative investigations of DCMS/HiPIMS reactively sputtered WO_3 thin films for photo-electrochemical efficiency enhancements," *Vacuum,* vol. 185, p. 109978, 2021/03/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109978.

[40] Y. Yang and Y. F. Cheng, "Visible light illuminated high-performance WO_3-TiO_2-$BiVO_4$ nanocomposite photoanodes capable of energy self-storage for photo-induced cathodic protection," *Corrosion Science,* vol. 164, p. 108333, 2020/03/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108333.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[41] L. Xia, J. Bai, J. Li, Q. Zeng, X. Li, and B. Zhou, "A highly efficient $BiVO_4/WO_3/W$ heterojunction photoanode for visible-light responsive dual photoelectrode photocatalytic fuel cell," *Applied Catalysis B: Environmental,* vol. 183, pp. 224-230, 2016/04/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.10.050.

[42] C. X. Li, B. Q. Qiu, W. L. Wang, J. L. Zhuang, and J. Tang, "Electrochemical deposition of organic semiconductor thin film and screening by scanning electrochemical microscopy," *Thin Solid Films,* vol. 698, p. 137855, 2020/03/31/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137855.

[43] 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,* vol. 859, p. 157818, 2021/04/05/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157818.

[44] N. Kangkun and C. Ponchio, "Photoelectrodeposition of $BiVO_4$ layer on FTO/WO_3 photoanodes for highly efficient photoelectrocatalytic chemical oxygen demand sensor applications," *Applied Surface Science,* vol. 526, p. 146686, 2020/10/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146686.

[45] N. Kiama and C. Ponchio, "Photoelectrocatalytic performance improvement of $BiVO_4$ 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.

[46] P. Thongthep, S. Moonmangmee, and C. Ponchio, "Solar/photoelectrocatalytic cell development for H_2 production and simultaneous organic dye degradation," *Materials Science in Semiconductor Processing,* vol. 124, p. 105597, 2021/03/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105597.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[47] N. Kangkun, N. Kiama, N. Saito, and C. Ponchio, "Optical properties and photoelectrocatalytic activities improvement of WO_3 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.

[48] 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.

[49] B. O. Orimolade and O. A. Arotiba, "Bismuth vanadate in photoelectrocatalytic water treatment systems for the degradation of organics: A review on recent trends," *Journal of Electroanalytical Chemistry,* vol. 878, p. 114724, 2020/12/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114724.

[50] P. Muhammed Shafi and A. Chandra Bose, "Impact of crystalline defects and size on X-ray line broadening: A phenomenological approach for tetragonal SnO_2 nanocrystals," *AIP Advances,* vol. 5, no. 5, 2015, doi: 10.1063/1.4921452.

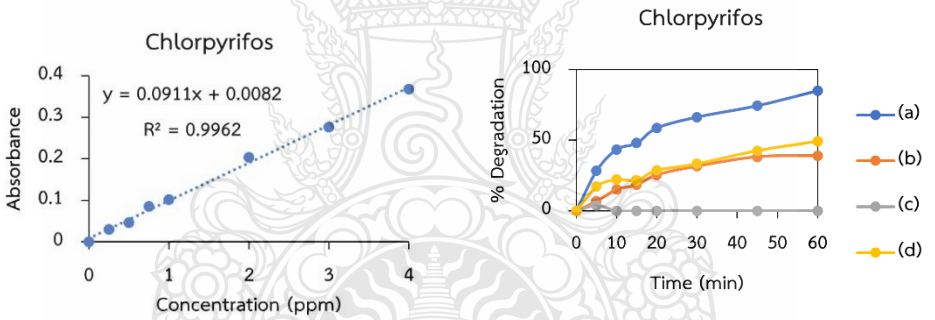
[51] R. Hatel and M. Baitoul, "Nanostructured Tungsten Trioxide (WO_3): synthesis, structural and morphological investigations," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1292, no. 1: IOP Publishing, p. 012014.

[52] M. de Jesus Silva Chaves *et al.*, "Environmental remediation properties of Bi_2WO_6 hierarchical nanostructure: A joint experimental and theoretical investigation," *Journal of Solid State Chemistry,* vol. 274, pp. 270-279, 2019, doi: 10.1016/j.jssc.2019.03.031.

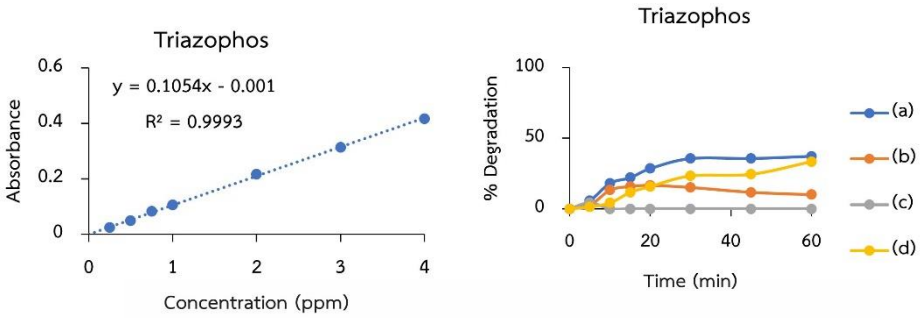
ภาคผนวก ก
ผลการศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงเพิ่มเติม

ผลการศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงเพิ่มเติม

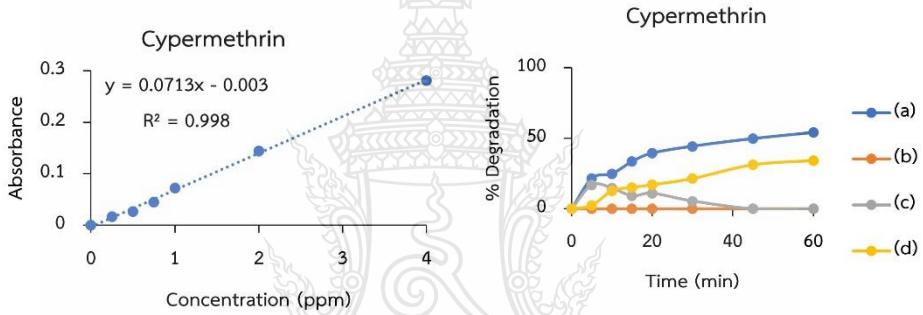
ผลการศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงในรูปแบบสารละลายในน้ำจำนวน 5 ชนิด ดังนี้ Chlorpyrifos 30% W/V, Triazophos 40% W/V, Cypermethrin 35% W/V, Lamda-cyhalothrin 2.5% W/V และ Fenobucarb 50% W/V ใช้ความเข้มข้น 3 ppm ใช้ระยะเวลาในการกำจัดยาฆ่าแมลงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ติดตามการกำจัดยาฆ่าแมลงด้วยค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/visible spectrophotometer และคำนวณร้อยละของการลดลง โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดยาฆ่าแมลงแต่ละชนิดของเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกกับเครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักด้วยระบบ Ozone 1, ระบบ Ozone 2 และผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักด้วย Electrolyte จากการศึกษาการกำจัดยาฆ่าแมลงในสารละลายเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เครื่องล้างผักที่ขายตามท้องตลาด ดังนี้ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte และ(d) Ozone 2



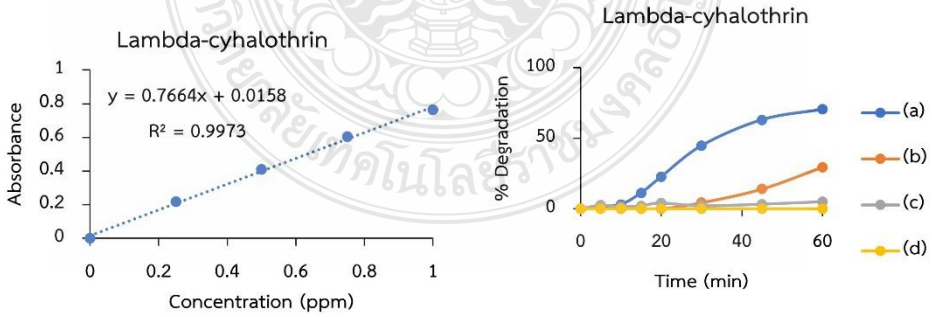
ภาพที่ 4.39 กราฟมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลง Chlorpyrifos ความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2



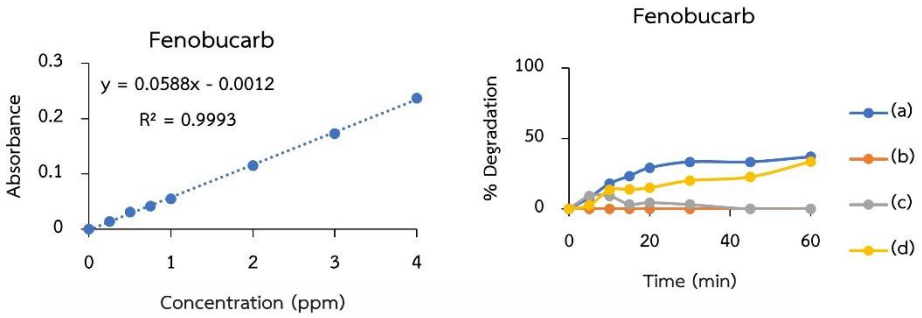
ภาพที่ 4.40 กราฟมารตฐานและเปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลง Triazophos ความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2



ภาพที่ 4.41 กราฟมารตฐานและเปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลง Cypermethrin ความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2



ภาพที่ 4.42 กราฟมารตฐานและเปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลง Lambda-cyhalothrin ความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2



ภาพที่ 4.43 กราฟมารตฐานและเปอร์เซ็นต์การกำจัดยาฆ่าแมลง Fenobucarb ความเข้มข้น 3 ppm ในสารลายปริมาตร 10 ลิตร ด้วยระบบที่แตกต่างกัน คือ (a) PEC, (b) Ozone 1, (c) Electrolyte, และ(d) Ozone 2

ภาคผนวก ข

ผลงานเผยแพร่ทางวิชาการ

ได้เข้าร่วมการประกวดสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม (4th RMUT Innovation Awards 2022) ในการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 12 และการประชุมวิชาการระดับนานาชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 11 ระหว่างวันที่ 18-20 พฤษภาคม 2565 ณ โรงแรมรอยัล คลิฟ แกรนด์ โฮเต็ล จังหวัดชลบุรี ได้รับรางวัลระดับดีประเภทนวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์ ในงาน 4th RMUT Innovation Awards 2022 ในหัวข้อเรื่อง Innovative fruit and vegetable washing machine with photoelectrocatalytic cell

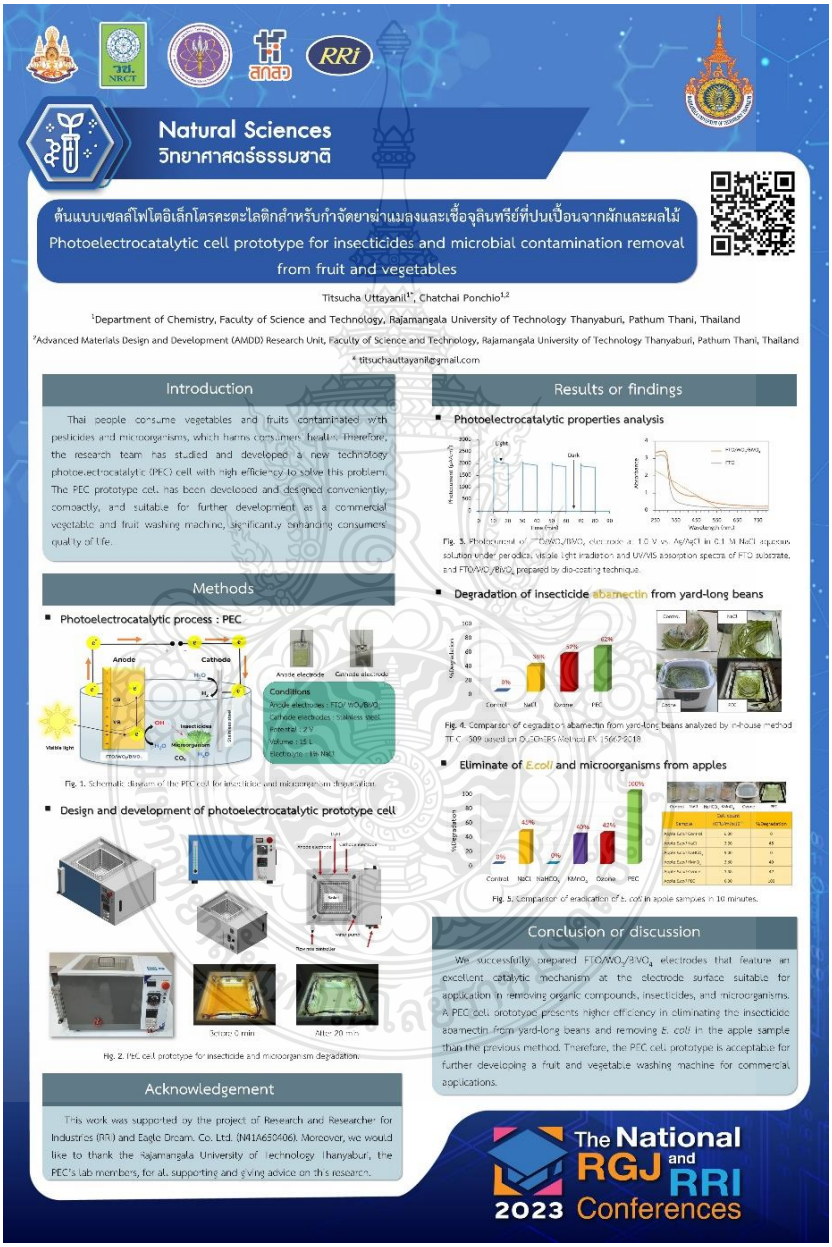
ได้เข้าร่วมประกวดผลงานนวัตกรรมสายอุดมศึกษา ประจำปี 2565 ระหว่างวันที่ 2–5 สิงหาคม 2565 ภายในงาน “มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2565 (Thailand Research Expo 2022)” ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ ได้รับรางวัลนวัตกรรมสายอุดมศึกษาประเภทเหรียญเงิน หัวข้อเรื่อง Innovative fruit and vegetable washing machine with photoelectrocatalytic cell

ในระหว่างการศึกษาได้เป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยนที่ห้องปฏิบัติการ Iwate University Pulsed Power Plasma Laboratory ที่ Iwate University ประเทศญี่ปุ่น เป็นเวลา 2 เดือนระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม 2566 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2566 โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคือ Assoc. Prof. Dr. Takahashi Katsuyuki ซึ่งมีความเชี่ยวชาญทางด้านเทคโนโลยีพลาสมาในด้านการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำเสียทางการเกษตรมลพิษในแม่น้ำที่เกิดจากวัสดุที่ถูกทิ้งรวมถึงการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์อีกด้วย สามารถส่งเสริมและพัฒนาร่วมกับงานวิจัยของเราในการกำจัดสารอินทรีย์ยาฆ่าแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ได้ ประโยชน์ที่ได้รับจากการไปแลกเปลี่ยนในครั้งนี้คือ ได้เรียนรู้เทคโนโลยีใหม่เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับงานวิจัยและยังได้ฝึกทักษะเครื่องมือชั้นสูง รวมถึงการสนทนาภาษาอังกฤษและแลกเปลี่ยนเรียนรู้วัฒนธรรมของประเทศญี่ปุ่น

岩手大学
IWATE UNIVERSITY

และได้เข้าร่วมงานประชุมเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบ Oral presentation ชื่อเรื่อง Photoelectrocatalytic cell prototype for insecticides and microbial contamination removal from fruit and vegetables ในงาน The 7th International Symposium on Plasma & Fine Bubbles to Agriculture and Aquaculture (7 th ISPFB 2023), embedded the international symposium of the East Asia Fisheries Technologists Association (EAFTA) and the Food Society of Modern International Lifestyle Education (FSMILE)

เข้าร่วมงานการนำเสนอความก้าวหน้าของทุนวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ประจำปี 2556 ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ ในวันที่ 9-10 สิงหาคม 2566 ในรูปแบบ Poster presentation



ผลงานวิจัยเผยแพร่เรื่อง WO_3/Bi_2WO_6 photoanode enhancement for photoelectrocatalytic water oxidation; scan rate effect optimization in the cyclic voltammetry deposition method

ได้ส่งตีพิมพ์ผลงานวิจัยใน J Appl Res Sci Tech.

Received: August 27, 2023 | Revised: October 3, 2023 | Accepted: October 4, 2023

JOURNAL OF APPLIED RESEARCH ON SCIENCE AND TECHNOLOGY
JARST
INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
ISSN ONLINE: 2773-9473
rmutt-journal

WO_3/Bi_2WO_6 photoanode enhancement for photoelectrocatalytic water oxidation; scan rate effect optimization in the cyclic voltammetry deposition method

Titsucha Uttayanil[1], Chatchai Ponchio[*1, 2]

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

[2]Advanced 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 approach is a very efficient technology for eliminating microorganisms and organic contaminants. The development of photoanode is widely recognized as a crucial approach to enhancing the efficiency of photoelectrocatalytic cells. The key goal of this methodology is to enhance the efficacy of photoelectrocatalytic oxidation by optimizing composited photoanode fabrication. This research development focuses mainly on fabricating composite WO_3/Bi_2WO_6 semiconductor thin films with high water oxidation efficiency and favorable photoelectrocatalytic *E.coli* degradation applications. Cyclic voltammetry was utilized to create WO_3/Bi_2WO_6 thin coatings on conducting glass while optimizing the photoelectrocatalytic activity via the scan rate parameter. The characteristics of the developed electrode, including charge transfer resistance, optical properties, morphology, crystal structure, chemical composition, and oxidation numbers, were investigated to improve photoelectrocatalytic activity. It was observed that the scanning rate significantly influenced the characteristics of the WO_3/Bi_2WO_6 electrode and the photoelectrocatalytic activity on water oxidation. It was discovered that the WO_3/Bi_2WO_6 electrode prepared with a scan rate of 25 mV/s exhibited the greatest photoelectrocatalytic water oxidation as well as distinguishing characteristics from other conditions. The decision to utilize decreased scanning rates has been determined to optimize the reaction kinetics and improve the film-forming properties of WO_3/Bi_2WO_6. Significantly, the developed electrode can also be used to eliminate 87.5% of *E.coli* in 15 minutes via a photoelectrocatalytic catalytic mechanism. The photoanode composed of WO_3/Bi_2WO_6 has promising capabilities in removing microorganisms and organic pollutants, making it a viable candidate for future advancements in wastewater management applications.

Keywords: Photoelectrocatalytic, Cyclic voltammetry techniques, WO_3/Bi_2WO_6, *E.coli* degradation

INTRODUCTION

The issue of microbial contamination and toxic organic compounds is an additional aspect that impacts the quality of life and the broader ecosystem. Therefore, it is essential to create or offer efficient strategies to handle these issues [1]. One of the most effective advanced oxidation technologies usually developed for removing such pollutants is photoelectrocatalytic (PEC) technology [2-6]. The strategy or guiding principle for the development of such techniques is the selection of suitable semiconductors and the creation of a substrate-based semiconductor film fabrication process. WO_3 and Bi_2WO_6 are two attractive semiconductors extensively used as photoanodes for organic elimination [7-10]. Because of its adequate energy value, it can absorb visible light and has a high positive valence potential appropriate for oxidation processes in aqueous solutions [11]. Preparing the semiconductor film on the substrate is regarded as a significant factor influencing the performance and durability of PEC cells in practical applications. The sol-gel method is a relatively simple and cost-effective technology for making WO_3 and Bi_2WO_6 films since it allows for perfect control over film thickness and composition and can be easily scaled up for large-scale production [12, 13]. However, to achieve the desired crystalline structure, the sol-gel approach may require high-temperature annealing, and film quality might be affected by processing conditions. The hydrothermal approach enables the formation of WO_3 and Bi_2WO_6 films at lower temperatures, increasing crystallinity and photocatalytic activity [8, 14]. However, a longer processing time and careful control of reaction parameters may be required to produce the necessary film qualities. Electrodeposition is a viable option for preparing WO_3 and Bi_2WO_6 films because it is a basic, cost-effective

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand

DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

technique that does not require expensive equipment or high temperatures. This investigation aims to develop an electrochemical technique for preparing composite WO_3 and Bi_2WO_6 films on conducting glass substrates using cyclic voltammetry (CV) [15, 16]. Cyclic voltammetry is a versatile and powerful technology for fabricating and characterizing semiconductor films, providing precise control, important insights, and scalability for a wide range of optoelectronics, photoelectrochemistry, and beyond applications. We developed the CV method for WO_3 and Bi_2WO_6 film formation by deciding the optimal PEC water oxidation properties, including precursor concentration, applied potential range, and scanning rate. We discovered that the scanning rate considerably impacted the WO_3/Bi_2WO_6 electrode characteristics and the PEC properties for water oxidation. Importantly, our system can also eliminate *E. coli* and is suitable for further development in treating effluent contaminated with microorganisms and toxic organic compounds.

MATERIALS AND METHODS

Chemical and materials

Throughout the experiment, deionized water was utilized to produce all solutions and compounds of the analytical grade. Diethylenetriamine pentaacetic acid; DTPA (Sigma Aldrich), Ammonium hydroxide; NH_4OH (J.T.Baker), Bismuth(III)oxide; Bi_2O_3 (Sigma Aldrich), Ammonium metatungstate hydrate; $(NH_4)_6H_2W_{12}O_40\text{-}H_2O$ (Sigma Aldrich), Nitric acid; HNO_3 (Univar), Hydrogen peroxide; H_2O_2 (Chem-supply), Ethanol; C_2H_5OH (Rcl Labscan), Sodium chorine; NaCl (Kemaus), Methylene Blue; $C_{16}H_{18}ClN_3S$ (KEMAUS) Sodium hydroxide; NaOH (Univar) were used as chemical precursor materials.

WO_3/Bi_2WO_6 precursor solution preparation

To prepare the WO_3/Bi_2WO_6 precursor solution, 0.83 g of diethylenetriamine pentaacetic acid (DTPA) was dissolved in 2.5 ml of 30% ammonia solution (NH_4OH), and 50 ml of distilled water was then added. The solution was stirred regularly at 80 °C with a mixture of 0.4 g of bismuth(III)oxide (Bi_2O_3) and 0.15 g of ammonium metatungstate hydrate ($(NH_4)_6H_2W_{12}O_{40}.H_2O$). Hydrogen peroxide (77 µl) and nitric acid (1,190 µl) were added to the solution while it was stirred at 80 °C for 15 minutes.

Preparation of WO_3/Bi_2WO_6 electrode

The fluorine-doped tin oxide (FTO) electrode substrate was cleansed using sonication for 10 minutes with detergent, 3 M sodium hydroxide (NaOH), ethanol, and distilled water, respectively. The cleaned FTO was dried and connected with copper wire to serve as a working electrode for the subsequent WO_3/Bi_2WO_6 electrode preparation. Figure 1 displays a three-electrode system configuration for fabricating WO_3/Bi_2WO_6 films using cyclic voltammetry. We use an FTO working electrode and an Ag/AgCl reference electrode to apply a potential ranging from -0.6 V to 0.8 V. For monitoring the current of the CV electrodeposition procedure, and Pt was utilized as a counter electrode. This study emphasized the effect of scan rate in the range of 10-125 mV/s for 30 cycles while keeping the solution temperature at 80 °C. The developed WO_3/Bi_2WO_6 electrode was then sintered for 1 hour at 450 °C. Copper wire was utilized to connect the prepared electrode and epoxy glue was employed to control the working area of the photoanode. The water oxidation photocurrent was used to determine the optimum conditions and performance of the WO_3/Bi_2WO_6 photoanode.

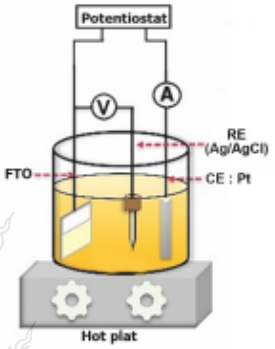


Figure 1 experimental set up for WO_3/Bi_2WO_6 photoanode fabrication using an CV electrodeposition technique.

Characterization and photoelectrocatalytic activity study

The PEC activity for water oxidation was determined using a voltammetry analyzer (Princeton Applied Research, Inc., VersaSTAT 3) in a 0.5 M NaCl electrolyte solution at an applied potential of 1.0 V vs. Ag/AgCl under visible light illumination. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) frequencies ranging from 100 kHz to 0.1 Hz were used to investigate the charge transfer resistance and capacitance at the interfacial electrode/electrolyte. The UV/Vis spectrophotometer (Shimadzu, UV-1601) was used to study the thin WO_3/Bi_2WO_6 film's optical characteristics. Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL, JSM 6510) was employed to observe the morphology of the surfaces of thin films. X-ray Diffraction Analysis (XRD, Rigaku, RINT 200TH) was used to investigate the crystal structure. The Energy Dispersive X-ray System (EDX, OXFORD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS, JEOL, JPS-9010TR) were utilized to confirm the chemical composition and oxidation state of the element at the electrode surface. The effectiveness of PEC *E. coli*

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand
DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

degradation was investigated using a two-electrode system composed of a WO_3/Bi_2WO_6 photoanode and a stainless-steel cathode electrode.

RESULTS AND DISCUSSIONS

WO_3/Bi_2WO_6 photoanode characterization

Figure 2 illustrates the cyclic voltammogram produced by the reduction reaction of WO_3/Bi_2WO_6 adhesion at the FTO substrate during the scan of a negative potential between 0.8 and -0.6 V. The reduction peak current in figure 2 increases with slower scan rates from 125 to 25 mV/s at approximately -0.2 V potential. When the scan rate was decreased to 10 mv/s, the reduction potential position was altered to -0.3 V. The findings indicate that the response mechanism exhibits variations while adjusting for extremely low scan rates. While oxidation currents would be produced in the region of 0.1 to 0.6 V when the scan rate was positively controlled between -0.6 and 0.8 V, shifting as the scan rate slowed down. This phenomenon may arise due to the release of certain precursor or interfering molecules, resulting in increased purity of the electrodes. This is a beneficial aspect of the cyclic voltammetry film preparation procedure.

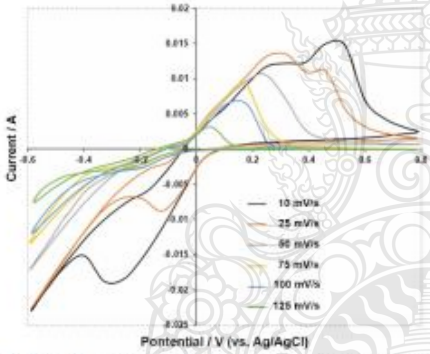


Figure 2 Effects of various scan rates on cyclic voltammograms during WO_3/Bi_2WO_6 deposition using the CV technique.

Figure 3 demonstrates the effect of the scan rate in the CV technique used to prepare WO_3/Bi_2WO_6 electrodes. We discovered that decreasing the scan rate from 125 to 25 mV/s increased the water oxidation photocurrent values of WO_3/Bi_2WO_6 photoanode. This finding elucidates that a decrease in scanning rate allows for increased migration time of the precursor in the solution towards the electrode surface, facilitating a more organized arrangement of the WO_3/Bi_2WO_6 film. Consequently, the resultant film exhibits enhanced efficiency. We discovered that the PEC WO_3/Bi_2WO_6 electrodes were the most effective for oxidizing water at a scan rate of 25 mV/s. When the scan rate was reduced to 10 mV/s, it was seen that the electrode efficiency decreased dramatically. This decrease can be attributed to the scanning rate being too slow, leading to incomplete adhesion of the semiconductor layer.

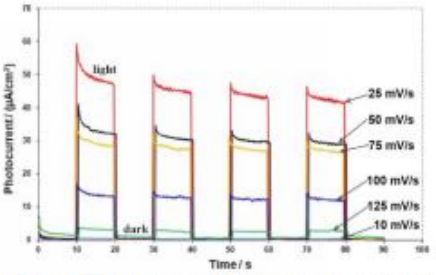


Figure 3 The photocurrent response from water oxidation of WO_3/Bi_2WO_6 photoanode prepared with different scan rates ranging from 10 to 125 mV/s.

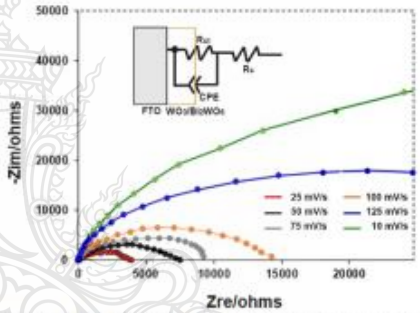


Figure 4 The Nyquist plot of WO_3/Bi_2WO_6 electrode for water oxidation under visible light.

Figure 4 displays the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) data employed to examine charge transfer resistance characteristics inside the interfacial region of the WO_3/Bi_2WO_6 photoanode. The Inset of figure 4 depicts a circuit consisting of charge transfer resistance (Rct), solution resistivity (Rs), and electrical capacitance (CPE) that most closely reflects the reaction at the electrode-solution interface. The Nyquist plot in the provided figure depicts the characteristics of the WO_3/Bi_2WO_6 electrodes produced using a scan rate of 25 mV/s. The semicircle with the shortest radius on the plot indicates the lowest charge transfer resistance, which correlates with the maximum photocurrent observed in the previous findings. This relationship suggests that the high PEC properties of electrodes under optimal conditions result from their low charge

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand

DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

transfer resistance, which is controlled by a slow scanning rate when forming the film semiconductor with the desired properties.

Figure 5 displays X-ray diffraction patterns that illustrate the crystalline structure of the chemical composition of the FTO substrate and WO_3/Bi_2WO_6 electrode prepared at varied scan rates.

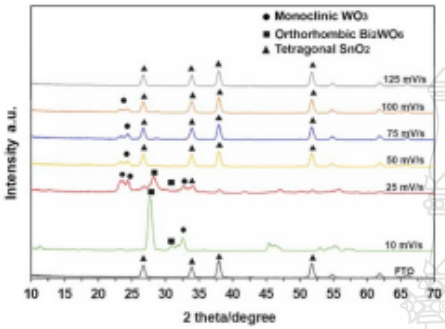


Figure 5 X-ray diffraction pattern of a bare FTO substrate compared to a WO_3/Bi_2WO_6 electrode produced with different scan rates conditions ranging from 10 to 125 mV/s.

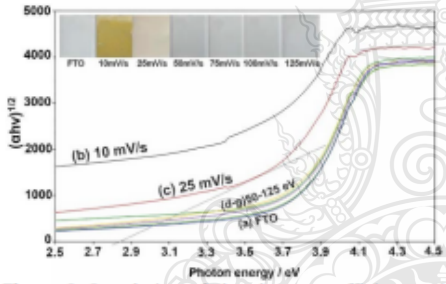


Figure 6 Correlation of absorbance coefficient and bandgap energy, inset of electrode photograph of (a) bare FTO substrate and FTO/WO_3/Bi_2WO_6 electrodes prepared with the different scan rates of (b) 10, (c) 25, (d) 50, (e) 75, (f) 100 and (g) 125 mV/s.

We discovered that the FTO substrate exhibited diffraction peaks at 26.7°, 34.1°, 38.02°, and 52.0°, which corresponded to tetragonal SnO_2 [17]. It was found that the prepared electrode at scan rates of 10 and 25 mV/s presented the main XRD peak at 2θ of 28.02°, 32.6°, which indicates the orthorhombic Bi_2WO_6 crystal structure on the FTO surface [18]. However, for the prepared electrode at a higher scan rate than 25 mV/s, a small amount of Bi_2WO_6 film is present.

It was observed that the produced electrode exhibits a small presence of Bi_2WO_6 semiconductor when applied to scan rates exceeding 25 mV/s. The X-ray diffraction (XRD) analysis reveals that the composite WO_3/Bi_2WO_6 exhibits optimal formation. At the optimal scan rate of 25 mV/s, it can produce both a monoclinic WO_3 structure at 2θ of 23.6° and 24.4° and 32.5° [15] an orthorhombic Bi_2WO_6 structure, which results in excellent PEC properties.

Figure 6 exhibits the optical properties of the WO_3/Bi_2WO_6 electrode, including band energy and a photograph, as a result of the scan rate preparation procedure compared to the FTO substrate.

The WO_3/Bi_2WO_6 thin film prepared at a scan rate of 10 mV/s has the greatest thickness, the highest absorption properties, and the darkest yellow color, whereas increasing the scanning rate results in electrodes with softer colors and thinner films. The preceding results demonstrate that a slow scanning rate increases the bonding period of the semiconductor film to the electrode surface, resulting in a thick film, and the thickness decreases as the scan rate increases. The Tauc equation, shown in Equation 1, helped us confirm that the band gap energy (Eg) was 2.85 eV at the best scan rate of 25 mV/s for the electrode preparation conditions.

$$(\alpha h\upsilon)^{1/2} = \beta(h\upsilon - E_g) \quad (1)$$

where β is a constant, α is the molar extinction coefficient, and Eg is the band gap energy. This Eg value was consistent with the optical absorption properties of the WO_3/Bi_2WO_6 semiconductor [19].

Figure 7 displays SEM images illustrating the morphology of composited WO_3/Bi_2WO_6 thin films on FTO substrates prepared at various scan rates with significantly different particle sizes and distributions. The particles of WO_3/Bi_2WO_6, which were prepared at a scan rate of 10 mV/s, exhibited a much larger particle size than those prepared under other conditions. This can be attributed to the extended accumulating period during the deposition process of the WO_3/Bi_2WO_6 thin films on the electrode substrate under the higher scan rate condition. The particles exhibited comparable size and dispersion. The samples prepared at a scan rate of 25 mV/s displayed increased porosity and greater surface roughness. The utilization of a scan rate of 25 mV/s in the preparation of the electrode has been found to significantly improve the morphologies of its surfaces. This improvement is characterized by an increased surface area and roughness, which enhances the effectiveness of solution contact and electron transport at the electrode surface. The obtained outcome provides robust evidence in favor of the PEC characteristics. Based on the investigation into the impact of scanning rate on the formation of WO_3/Bi_2WO_6 films using the CV technique, it can be inferred that a decreased scanning rate holds promise for augmenting the degree of precision in the deposition procedure. Consequently, this leads to the creation of films that demonstrate enhanced uniformity and

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand
DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

distinct characteristics. Conversely, an increased scanning rate may result in decreased control over the film's creation and a decline in quality. In summary, the scanning rate employed in cyclic voltammetry influences the kinetics of redox reactions, mass transport, film formation processes, and potential distribution within the electrochemical system. Slower scanning rates have been chosen to optimize reaction kinetics and increase the film-forming characteristics.

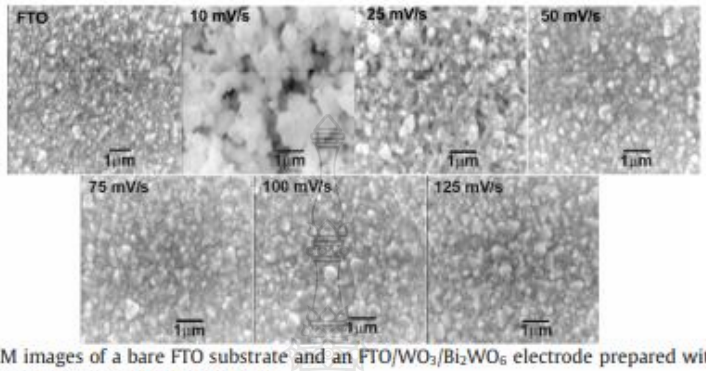


Figure 7 SEM images of a bare FTO substrate and an FTO/WO_3/Bi_2WO_6 electrode prepared with scan rates ranging between 10 and 125 mV/s.

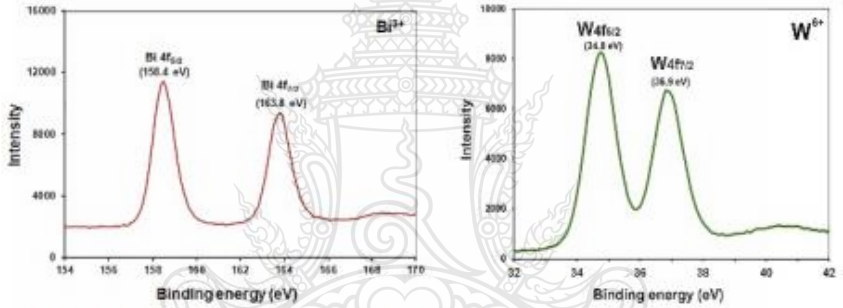


Figure 8 XPS spectra of Bi and W at FTO/WO_3/Bi_2WO_6 photoanode.

The composition of W, Bi, and O on the FTO/WO_3/Bi_2WO_6 electrodes was investigated by EDX analysis. Our findings unequivocally establish the presence of WO_3 and Bi_2WO_6 compounds on the FTO substrate. Furthermore, we investigate the chemical composition and oxidation state of all elements present in the composite WO_3/Bi_2WO_6 electrode utilizing the X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) technique. The XPS spectra of all elements present in the WO_3/Bi_2WO_6 film were obtained by calibrating the binding energy using C1s (284.6 eV) as a reference. The experimental results indicate that the O1s orbital exhibits a binding energy of 530.8 eV. The XPS spectra of $Bi4f_{5/2}$ and $Bi4f_{7/2}$ orbitals exhibit binding energies of 163.8 eV and 158.4 eV, respectively, as shown in Figure 8. The energy levels of $W4f_{5/2}$ and $W4f_{7/2}$ were measured to be 34.8 eV and 36.9 eV, respectively. The findings validate the oxidation states of Bi^{3+} and W^{6+} seen at the WO_3/Bi_2WO_6 composite electrode [20]. The XPS and EDX findings offer significant insights that may be utilized to validate the chemical composition and chemical state of WO_3/Bi_2WO_6 present on the FTO substrate. The present study employed the optimum WO_3/Bi_2WO_6 photoanode to investigate the effectiveness of *E. coli* degradation under visible light irradiation and a bias potential of 1.5 V. Consequently, the PEC cell that was presented showed the capability to degrade 87.50 % of *E. coli* over a duration of 15 minutes. This finding confirms that the WO_3/Bi_2WO_6 electrodes that were produced are really effective in facilitating PEC oxidation, thereby enabling the elimination of *E. coli* in aqueous solutions. Moreover, these electrodes hold promise for potential application in removing microorganisms from wastewater.

CONCLUSIONS

We have successfully prepared the WO_3/Bi_2WO_6 photoanode using the CV method and applied it to

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand

DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

the degradation of *E. coli* using the proposed PEC cell. The scan rate in the CV method substantially impacts the characteristics and PEC activity of the composite WO_3/Bi_2WO_6 thin film fabrication. The optimal scanning rate condition is crucial for enhancing light absorption, surface morphology, and electron transport between the electrode and the electrolyte during the fabrication of WO_3/Bi_2WO_6 thin film electrodes. The optimal WO_3/Bi_2WO_6 photoanode fabrication condition for the highest PEC water oxidation properties was a scanning rate of 25 mV/s. We can conclude that the cyclic voltammetry scanning rate impacts the kinetics of redox reactions, mass transport, film formation processes, and potential distribution within the electrochemical system. The decision to take advantage of slower scanning rates has been made to optimize the kinetics of the reaction and enhance the film-forming characteristics of WO_3/Bi_2WO_6. The WO_3/Bi_2WO_6 composite material exhibits a notable capability for effectively eliminating *E.coli* in the photoelectrochemical (PEC) process. This finding suggests that the material holds promise for potential applications in eliminating other microorganisms present in wastewater.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Research and Researchers for Industries (RRI) project, and Eagle Dream Company Limited (N41A650406).

REFERRENCES

1. Voumard M, Breider F, Von Gunten U. Effect of cetyltrimethylammonium chloride on various Escherichia coli strains and their inactivation kinetics by ozone and monochloramine. Water Res. 2022;216:118278.
2. 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 SnO_2-Sb 3D-loaded TiO_2 nanotube arrays. J Hazard Mater. 2020;398:122805.
3. Zheng Z, Lo IMC. Fabrication of MoS_2@BL-$BiVO_4$ photoanode with promoted charge separation for photoelectrochemical sewage treatment to simultaneously degrade PPCPs, disinfect *E. coli*, and produce H_2: Performance, mechanisms, and influence factors. Applied Catalysis B: Environmental. 2021;299:120636.
4. Srisawang N, Ngernchuklin P, Chaiyasat A, Chaiyasat P. Polymer microcapsules encapsulating photocatalyst nanoparticles for dye treatment in wastewater. J Appl Res Sci Tech. 2020;19(2):1-16.
5. 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.
6. Liu J, Ma N, Wu W, He Q. Recent progress on photocatalytic heterostructures with full solar spectral responses. Chem Eng J. 2020;393:124719.
7. Koutavarapu R, Babu B, Reddy CV, Reddy IN, Reddy KR, Rao MC, et al. ZnO nanosheets-decorated Bi_2WO_6 nanolayers as efficient photocatalysts for the removal of toxic environmental pollutants and photoelectrochemical solar water oxidation. J Environ Manage. 2020;265:110504.
8. Sadhasivam S, Anbarasan N, Gunasekaran A, Sadhasivam T, Jeganathan K, Oh TH. Highly efficient In_2S_3 nanosphere decorated WO_3/Bi_2WO_6 dual heterostructure nanoflake arrays for enhanced low bias watersplitting under visible light irradiation. Surfaces and Interfaces. 2023;39:102892.
9. Girish Kumar S, Koteswara Rao KSR. Tungsten-based nanomaterials (WO_3 & Bi_2WO_6): Modifications related to charge carrier transfer mechanisms and photocatalytic applications. Appl Surf Sci. 2015;355:939-58.
10. Supanantin F, Ponchio C. $WO_3/BiVO_4$ photoanode electrode improvement for photoelectrocatalytic dye degradation. J Appl Res Sci Tech. 2020;19(1):16-26.
11. Ponchio C, Supanantin F, Petsaen N, Poowancum A. Photoelectrocatalytic oxygen production from water splitting using WO_3 photoanode fabricated by dip coating technique. J Appl Res Sci Tech. 2019;18(1):52-9.
12. Zhang P, Teng X, Feng X, Ding S, Zhang G. Preparation of Bi_2WO_6 photocatalyst by high-energy ball milled Bi_2O_3-WO_3 mixture. Ceram Int. 2016;42(15):16749-57.
13. Juodkazytė J, Petrulevičienė M, Parvin M, Šebeka B, Savickaja I, Pakštas V, et al. Activity of sol-gel derived nanocrystalline WO_3 films in photoelectrochemical generation of reactive chlorine species. J Electroanal Chem. 2020;871:114277.
14. Su X, Liu C, Liu Y, Yang Y, Liu X, Chen S. Construction of $BiVO_4$ nanosheets@WO_3 arrays heterojunction photoanodes by versatile phase transformation strategy. T Nonferr Metal Soc. 2021;31(2):533-44.
15. Supanantin F, Ponchio C. Improvement ITO/WO_3 photo anode electrode fabrication using electrodeposition technique for highly efficient photoelectrocatalytic insecticide degradation. Mat Sci Semicon Proc. 2020;118:105212.
16. Orimolade BO, Idris AO, Feleni U, Mamba B. Peroxymonosulfate assisted photoelectrocatalytic

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand

DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

degradation of pharmaceuticals at a FTO-Bi_2WO_6 electrode: Mechanism and kinetics studies. Catal Commun. 2022;169:106481.

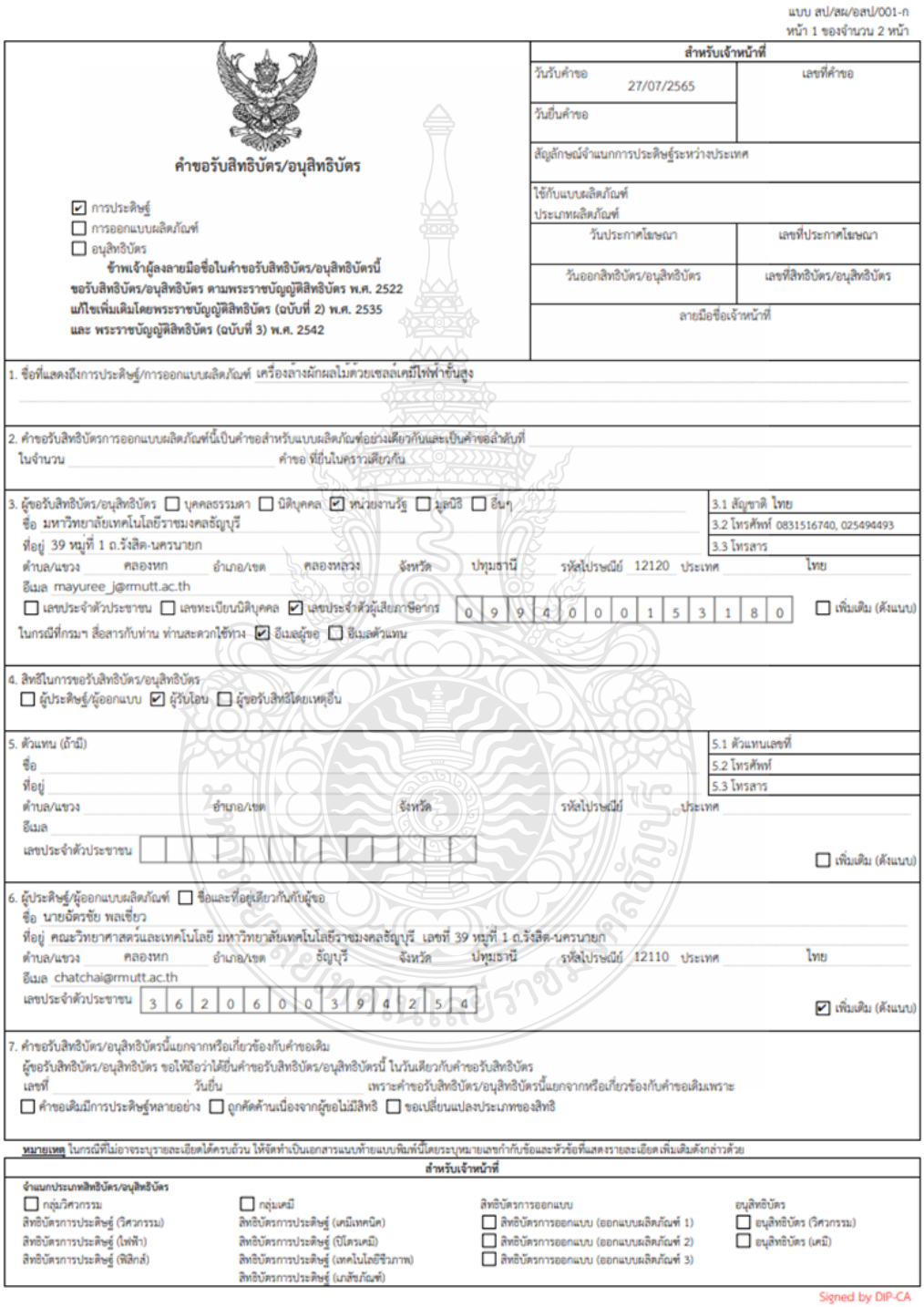
17. Suryakant, Kumar N, Tripathi H, Kumar S, Bhardwaj S. Sol-gel synthesis of Tin oxide nanoparticles and their characterizations. Materials Today:Proceedings. 2023.
18. Shkir M, AlAbdulaal TH, Ubaidullah M, Reddy Minnam Reddy V. Novel Bi_2WO_6/MWCNT nanohybrids synthesis for high-performance photocatalytic activity of ciprofloxacin degradation under simulated sunlight irradiation. Chemosphere. 2023;338:139432.
19. Zhu Z, Yan Y, Li J. One-step synthesis of flower-like WO_3/Bi_2WO_6 heterojunction with enhanced visible light photocatalytic activity. J Mater Sci. 2016;51(4):2112-20.
20. Peng Y, Chen Q, Wang D, Zhou H, Xu A. Synthesis of one-dimensional WO_3-Bi_2WO_6 heterojunctions with enhanced photocatalytic activity. Cryst Eng Comm. 2015;17(3):569-76.

©2023 Institute of Research and Development, RMUTT, Thailand

DOI: 10.60101/jarst.2023.253891

สิทธิบัตรการประดิษฐ์ : เลขที่คำขอ 2201004725

“เครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้าขั้นสูง” (27 กรกฎาคม 2565)



แบบ สป/สผ/อสป/001-ก
หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า

คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

☑ การประดิษฐ์
☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์
☐ อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่

วันรับคำขอ 27/07/2565	เลขที่คำขอ
วันยื่นคำขอ	
สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ เครื่องล้างผักผลไม้ด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้าขั้นสูง

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่
ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ บุคคลธรรมดา ☐ นิติบุคคล ☑ หน่วยงานรัฐ ☐ มูลนิธิ ☐ อื่นๆ
ชื่อ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ที่อยู่ 39 หมู่ที่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก
ตำบล/แขวง คลองหก อำเภอ/เขต คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12120 ประเทศ ไทย
อีเมล mayuree_j@rmutt.ac.th
☐ เลขประจำตัวประชาชน ☐ เลขทะเบียนนิติบุคคล ☑ เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0 9 9 4 0 0 0 1 5 3 1 8 0 ☐ เพิ่มเติม (ดังแนบ)
ในกรณีที่กรมฯ สื่อสารกับท่าน ท่านสะดวกใช้ทาง ☑ อีเมลผู้ขอ ☐ อีเมลตัวแทน

3.1 สัญชาติ ไทย
3.2 โทรศัพท์ 0831516740, 025494493
3.3 โทรสาร

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

5. ตัวแทน (ถ้ามี)
ชื่อ
ที่อยู่
ตำบล/แขวง อำเภอ/เขต จังหวัด รหัสไปรษณีย์ ประเทศ
อีเมล
เลขประจำตัวประชาชน ☐ เพิ่มเติม (ดังแนบ)

5.1 ตัวแทนเลขที่
5.2 โทรศัพท์
5.3 โทรสาร

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ☐ ชื่อและที่อยู่เดียวกันกับผู้ขอ
ชื่อ นายฉัตรชัย พลเชี่ยว
ที่อยู่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก
ตำบล/แขวง คลองหก อำเภอ/เขต ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110 ประเทศ ไทย
อีเมล chatchai@rmutt.ac.th
เลขประจำตัวประชาชน 3 6 2 0 6 0 0 3 9 4 2 5 4 ☑ เพิ่มเติม (ดังแนบ)

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม
ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร
เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ
☐ คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ☐ ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ☐ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่อาจระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

สำหรับเจ้าหน้าที่

จำแนกประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

☐ กลุ่มวิศวกรรม
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ไฟฟ้า)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ฟิสิกส์)

☐ กลุ่มเคมี
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมีเทคนิค)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ปิโตรเคมี)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เทคโนโลยีชีวภาพ)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เภสัชภัณฑ์)

สิทธิบัตรการออกแบบ
☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1)
☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2)
☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)

อนุสิทธิบัตร
☐ อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม)
☐ อนุสิทธิบัตร (เคมี)

Signed by DIP-CA

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวทิตสุชา อุทยานิล

วัน เดือน ปีเกิด 8 พฤษภาคม 2542

ที่อยู่ 21/1 หมู่ 11 ซอยคลองห้าตะวันตก45 ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี

มหาวิทยลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เบอร์โทรศัพท์ 0649315135

อีเมล์ titsuchauttayanil@gmail.com