

การพัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

DEVELOPMENT OF ELECTROCHEMICAL CELL PROTOTYPE
FOR MICROORGANISM DEGRADATION

แพรวนภา ต่อมคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

แพรวนภา ต่อมคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์
The Development of an Electrochemical Cell Prototype for
Microorganism Degradation
ชื่อ-นามสกุล นางสาวแพรวนภา ต่อมคำ
สาขาวิชา เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเชื้อว, D.Eng.
ปีการศึกษา 2564

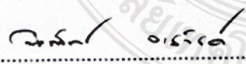
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ชุมพล บุซบก, Ph.D.)


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


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

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพัทธ์ จงสวัสดิ์, ปร.ด.)

วันที่ 11 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวแพรวนภา ต่อมคำ
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย พลเขียว, D.Eng.
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

นวัตกรรมป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อโรคเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับการพัฒนาเพื่อให้ประชาชนมีสุขภาพดีและห่างไกลจากโรคภัย งานวิจัยนี้เรามีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนานวัตกรรมเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในอุปกรณ์อาหารเพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อโรคจากการใช้งานอุปกรณ์ร่วมกันในที่สาธารณะ

ส่วนแรกของการวิจัยได้พัฒนาวิธีอย่างง่าย ในการเตรียมฟิล์มบางบิสมีทวานาเดต (BiVO_4) โดยใช้วิธีการเคลือบแบบจุ่มอัตโนมัติ โดยเน้นที่การเพิ่มสมบัติโฟโตอิเล็กโตร คตะไลติก (PEC) เพื่อให้สามารถทำซ้ำและขยายสเกลได้เป็นอย่างดี ความเข้มข้นของสารละลายสารตั้งต้น อัตราเร็วในการจุ่ม และอุณหภูมิในการเผาถูกศึกษาให้ได้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นไฟฟ้า BiVO_4 ที่มีสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคตะไลติกสูงสุดสำหรับการเกิดออกซิเดชันในสารละลายน้ำศึกษาคุณลักษณะของชั้นไฟฟ้า BiVO_4 ที่พัฒนาขึ้นสัมพันธ์กับการปรับปรุงคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคตะไลติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเราได้ศึกษาความสามารถในการทำซ้ำและความสามารถในการขยายขนาดของการเตรียมชั้นไฟฟ้า BiVO_4 นอกจากนี้ชั้นไฟฟ้า BiVO_4 ที่พัฒนาขึ้นยังถูกนำไปใช้กับการกำจัดสารอินทรีย์สี้อม และศึกษากลไกการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า เราพบว่า อัตราเร็วในการจุ่ม และอุณหภูมิการเผาของกระบวนการเตรียมชั้นไฟฟ้า BiVO_4 มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติโฟโต อิเล็กโตรคตะไลติก อุณหภูมิการเผาที่ $450\text{ }^\circ\text{C}$ ถูกเลือกเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมชั้นไฟฟ้า BiVO_4 ให้มีสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคตะไลติกสูงที่สุดสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำและมีคุณสมบัติของกระบวนการถ่ายเทประจุที่ดี วิธีการเคลือบจุ่มอัตโนมัติที่เสนอมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการเตรียม ฟิล์มบาง BiVO_4 ที่สามารถขยายขนาดและทำซ้ำได้ดีโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่น้อยกว่า 5% ชั้นไฟฟ้า BiVO_4 ที่พัฒนาขึ้นสามารถกำจัดสี้อมอินทรีย์เมทิลเรดได้มากกว่า 70% ภายในเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้กระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคตะไลติก จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเทคนิคที่เรียบง่ายและทำซ้ำได้ดีสำหรับการ

เตรียมฟิล์มบาง BiVO_4 ที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำด้วย
หลักการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

ส่วนที่สองคือการศึกษาและออกแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ขนาด
ความจุ 6,000 มิลลิลิตรด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าบิสมัทวานาเดตขนาดใหญ่ที่พัฒนาจากส่วนแรก
ที่สภาวะที่เหมาะสมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 % ตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2 โวลต์
ความเข้มแสงที่ 33.48 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัดเชื้ออีโคไล ที่ปนเปื้อนบนอุปกรณ์อาหาร
ได้หมดสมบูรณ์ในเวลา 10 นาที เซลล์เคมีไฟฟ้าต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการกำจัด
เชื้อจุลินทรีย์ดีกว่าการใช้รังสียูวีและการใช้สารละลายเกลือแกงอย่างชัดเจน จุดเด่นของของงานวิจัยนี้
คือได้เซลล์ต้นแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยหลักการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด
เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเหมาะที่จะพัฒนาต่อยอดเป็น
นวัตกรรมเครื่องล้างอุปกรณ์อาหารเพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อโรคในสถานที่ชุมชนได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วิธีการจุ่มเคลือบ ขั้วไฟฟ้าบิสมัทวานาเดต เซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก
การกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์



Thesis Title The Development of an Electrochemical Cell Prototype for Microorganism Degradation

Name-Surname Miss Praewnapa Tomkham

Program Applied Chemistry

Thesis Advisor Assoc. Prof. Chatchai Ponchio, D.Eng.

Academic Year 2021

ABSTRACT

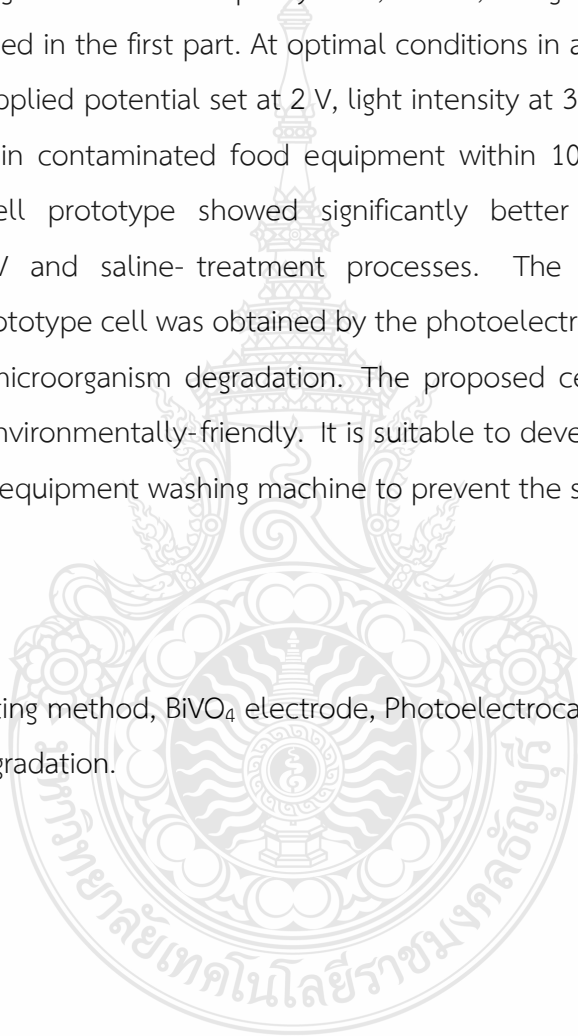
This research aimed to develop an innovation to prevent the spread of germs to keep people healthy and away from various diseases. In the study, we aimed to develop innovative electrochemical cells to eliminate microbial contaminants in food equipment and thereby to prevent people spreading germs by sharing food equipment in public places.

In the first phase, a simple method was developed for preparing bismuth vanadate (BiVO_4) thin film using an automatic dip-coating method, focusing on enhancing photoelectrocatalytic (PEC) property, ensuring high reproducibility, and efficiently scaling up properties. A precursor solution concentration, dipping speed, and calcination temperature were optimized to obtain the highest photoelectrocatalytic BiVO_4 electrodes for water oxidation. The characteristics of the developed BiVO_4 electrodes were studied related to the PEC activities improvement. Notably, the reproducibility and scale-up ability of BiVO_4 electrode preparation were tried out. In addition, the developed BiVO_4 electrode to organic dye degradation and the catalytic mechanism at the electrode surface was tested. It was found that both the dipping speed and calcination temperature of the fabricated BiVO_4 electrode process are significantly influenced by the PEC properties. A calcination temperature of 450 °C was selected with an optimum condition for BiVO_4 photoanode preparation for the highest PEC water oxidation and had good charge transfer process properties. The proposed automatic dip-coating method presents high efficiency for the large scale of BiVO_4 thin film fabrication, and it was highly

reproducible at a low relative standard deviation of less than 5%. The developed BiVO₄ electrode eliminated methyl red organic dyes by more than 70% within 1 hour under the PEC process. The development of a simple and highly reproducible technique for preparing BiVO₄ thin films was highly efficient in PEC water oxidation properties.

The second phase is a study and design of an electrochemical cell prototype for eliminating microorganisms with a capacity of 6,000 ml, using large bismuth vanadate electrodes developed in the first part. At optimal conditions in a 0.5 % NaCl electrolyte solution with the applied potential set at 2 V, light intensity at 33.48 W/cm² completely eliminated *E. coli* in contaminated food equipment within 10 mins. The developed electrochemical cell prototype showed significantly better microbial degradation efficiency than UV and saline- treatment processes. The results show that an electrochemical prototype cell was obtained by the photoelectrocatalytic principle with high efficiency in microorganism degradation. The proposed cell prototype is simple, convenient, and environmentally-friendly. It is suitable to develop a cell prototype as an innovative food equipment washing machine to prevent the spread of harmful germs in the community.

Keywords: Dip coating method, BiVO₄ electrode, Photoelectrocatalytic cell, Organic and microorganisms degradation.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจากรศ.ดร. ฉัตรชัย พลเชี่ยว ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ดร. ชุมพล บุชบก ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร. อมร ไชยสัตย์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ฉัตรชัย พลเชี่ยว ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหาค้นคว้าพัฒนาศักยภาพของผู้วิจัยในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการโฟโตอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือสถานที่ ช่วยเหลือให้คำปรึกษาการดำเนินงานวิจัย และวิทยานิพนธ์ และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดระยะเวลา 2 ปี ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุก ๆ ท่านที่เกี่ยวข้อง ที่ให้กำลังใจตลอดจนส่งเสริมการศึกษาด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกๆ ท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัย วิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำและปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

แพรวนภา ต่อมคำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(15)
สารบัญภาพ	(16)
บทที่ 1 บทนำ.....	24
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	24
1.2 วัตถุประสงค์.....	25
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	26
1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	26
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	29
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.1 เชื้ออีโคไล (<i>E. coli</i>).....	30
2.1.1 ลักษณะรูปร่างและสรีรวิทยา.....	30
2.1.2 อนุกรมวิธานของเชื้อ (Classification).....	31
2.1.3 คุณสมบัติของแอนติเจน.....	31
2.1.4 การทำให้เกิดโรคของเชื้อ <i>Escherichia coli</i>	31

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.1.5 การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์.....	32
2.2 เทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์.....	34
2.3 การพัฒนาชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ.....	35
2.3.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	35
2.3.2 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง.....	36
2.3.2.1 การตรึงแบบจุ่ม (Dip coating).....	36
2.3.2.2 การตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	37
2.3.2.3 การตรึงแบบสปัตเตอริง (Sputtering).....	37
2.3.2.4 การตรึงด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical deposition)	38
2.3.2.5 การตรึงด้วยไฟฟ้าแบบหมุน (Electrospinning deposition).....	38
2.3.2.6 การตรึงแบบ Sol-gel process.....	39
2.3.2.7 การตรึงแบบ Electric arc discharge process.....	39
2.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	40
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	42
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	42
3.1.1 สารเคมี	42
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	43
3.2 การทดลอง.....	45
3.2.1 การเตรียมชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ.....	45

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.1.1 การเตรียมสารละลายสารกึ่งตัวนำ	45
3.2.1.2 การตรึงสารกึ่งตัวนำ.....	46
3.2.1.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄	47
3.2.2 ศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic properties) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้.....	48
3.2.3 ศึกษากลไกการเร่งปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า.....	48
3.2.4 ศึกษาการกำจัดเชื้อ <i>E. coli</i>	49
3.2.5 ศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อ <i>E. coli</i>	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	52
4.1 การศึกษาชนิดของสารกึ่งตัวนำ.....	52
4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในสารละลายน้ำ.....	52
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	53
4.2 การศึกษาเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄	55
4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในสารละลายน้ำ.....	55
4.3 การศึกษาสถานะต่างๆในการตรึงขั้วไฟฟ้า BiVO ₄ ด้วยเทคนิค dip coating method [machine].....	56
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย BiVO ₄	56
4.3.1.1 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	56
4.3.1.2 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.2 ผลของจำนวนชั้นของ BiVO_4	58
4.3.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า.....	58
4.3.2.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	59
4.3.2.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง	59
4.3.3 ผลของระยะเวลาในการจุ่มสารละลาย.....	61
4.3.3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า.....	61
4.3.3.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	62
4.3.3.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	62
4.3.4 ผลของอัตราเร็วในการจุ่มลง.....	64
4.3.4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า.....	64
4.3.4.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	65
4.3.4.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง	66
4.3.5 ผลของอัตราเร็วในการตั้งขึ้น.....	67
4.3.5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า.....	67
4.3.5.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	67
4.3.5.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	68

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการเผา FTO/BiVO ₄	70
4.3.6.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า.....	70
4.3.6.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	70
4.3.6.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	71
4.3.6.4 ผลของค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	73
4.3.6.5 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างผลึก.....	74
4.3.6.6 ผลของอุณหภูมิการเผาชั้นไฟฟ้าต่อสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า.....	75
4.3.6.7 ผลการศึกษาค่าประจวบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄	76
4.3.7 ผลการเปรียบเทียบเทคนิคในการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄	77
4.3.7.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า.....	77
4.3.7.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ.....	77
4.3.7.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง.....	78
4.3.7.4 ผลของค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า.....	80
4.3.7.5 ผลของเทคนิคการตรึงชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำต่อสัณฐานวิทยา ของชั้นไฟฟ้า.....	81
4.3.7.6 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างผลึก.....	82
4.3.7.7 ผลการทำซ้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄	83
4.3.7.8 ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของชั้นไฟฟ้า.....	85

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4 ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับกำจัดสารอินทรีย์.....	86
4.4.1 ผลอนุภูมิภาคการเผาชีวไฟฟ้า.....	86
4.4.2 ผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น.....	87
4.4.3 ผลความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์.....	87
4.4.4 ผลของชนิดของชีวไฟฟ้าแคโทด.....	88
4.4.5 ผลการศึกษากลไกการกำจัดสารอินทรีย์.....	90
4.4.6 ผลการศึกษาการทำซ้ำของชีวไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์.....	91
4.4.7 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	91
4.4.8 ผลการศึกษาการใช้ชีวไฟฟ้าซ้ำในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	92
4.5 ผลการศึกษาการออกแบบและสถานะที่เหมาะสมของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้า สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ และเชื้อ <i>E.coli</i>	93
4.5.1 ผลการศึกษาจำนวนชีวไฟฟ้าแอนโนด.....	93
4.5.2 ผลการศึกษาการวางตำแหน่งของชีวไฟฟ้า.....	94
4.5.3 ผลการศึกษาชนิดการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบ.....	95
4.5.4 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการหมุนที่ให้แก่ระบบ.....	96
4.5.5 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้า.....	96
4.5.6 ผลของความเข้มแสง.....	97
4.5.7 ผลการศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบ.....	98
4.5.8 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> ของเซลล์ต้นแบบ.....	99

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5 ผลการศึกษาศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
บรรณานุกรม.....	104
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก.....	110
ภาคผนวก ข.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	123



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ศึกษาคุณลักษณะของชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้.....	48
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมได้ จากการเผาที่อุณหภูมิ 25 °C (RT), 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C.....	74
ตารางที่ 4.2 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄	76
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วย เทคนิค Dip Coating [Manual], Dip Coating [Machine], และ Spin coating.....	81
ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพชั้นไฟฟ้าแคโนดก่อน-หลังกำจัดสารอินทรีย์.....	89
ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซเดชันและรีดักชันที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า.....	101

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ (Microorganism) ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ภายใต้การเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของเชื้อ <i>E. coli</i>	30
รูปที่ 2.2 ปริมาณของแสงที่มีอยู่ในธรรมชาติในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ.....	35
รูปที่ 2.3 ค่า Band Gap Energy (E_g) ของสารกึ่งตัวนำ.....	36
รูปที่ 2.4 การตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating).....	36
รูปที่ 2.5 การตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	37
รูปที่ 2.6 การตรึงแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering).....	37
รูปที่ 2.7 การตรึงด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical deposition).....	38
รูปที่ 2.8 การตรึงด้วยไฟฟ้าแบบหมุน (Electrospinning deposition).....	38
รูปที่ 2.9 การตรึงแบบ Sol-gel process.....	39
รูปที่ 2.10 การตรึงแบบ Electric arc discharge process.....	40
รูปที่ 3.1 ศึกษากลไกการเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic ; EC).....	48
รูปที่ 3.2 ศึกษากลไกการเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยแสง (Photocatalytic ; PC).....	49
รูปที่ 3.3 ศึกษากลไกการเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalytic ; PEC).....	49
รูปที่ 3.4 การกำจัดเชื้อ <i>E. coli</i> ภายใต้กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก.....	50
รูปที่ 3.5 การจัดอุปกรณ์เซลล์ต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อ <i>E. coli</i> ภายใต้กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก.....	50

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำด้วยขั้วไฟฟ้า (A) FTO/BiVO ₄ , (B) FTO/WO ₃ และ (D) FTO/TiO ₂ ภายใต้การ เร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....	53
รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของ (A) FTO, (B) FTO/BiVO ₄ (C) FTO/TiO ₂ และ (D) FTO/WO ₃ โดยเตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบ (manual) ที่อุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้า 550 °C.....	54
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของ ขั้วไฟฟ้า (A) FTO, (B) FTO/BiVO ₄ (C) FTO/TiO ₂ และ (D) FTO/WO ₃ โดยเตรียมด้วย เทคนิคการจุ่มเคลือบแบบ (manual) ที่อุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้า 550 °C.....	54
รูปที่ 4.4 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำด้วยวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า (A) dip coating method [manual], (B) dip coating method [machine] (C) spin coating method and (D) electrochemical deposition ที่อุณหภูมิในการเผาขั้วไฟฟ้า 550 °C.....	55
รูปที่ 4.5 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ (A) 0.0250 M, (B) 0.0375 M, (C) 0.0500 M, (B) 0.0750 M, และ (E) 0.1000 M ของ สารละลาย BiVO ₄ ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....	56
รูปที่ 4.6 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นต่างๆ คือ (A) 0.0250 M, (B) 0.0375 M, (C) 0.0500 M, (B) 0.0750 M, และ (E) 0.1000 M	57
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของ ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นต่างๆ คือ (A) 0.0250 M, (B) 0.0375 M, (C) 0.0500 M, (B) 0.0750 M, และ (E) 0.1000 M.....	58
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่จำนวนชั้นในการตรึงที่ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น.....	58

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.9 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำ ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่จำนวนชั้นในการตรึงที่ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น ภายใต้การเร่งด้วยแสง ในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....59
- รูปที่ 4.10 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ตรึงด้วยจำนวนชั้นต่างๆ คือ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น.....60
- รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยจำนวนชั้นต่างๆ คือ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น.....61
- รูปที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มที่ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที.....61
- รูปที่ 4.13 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มที่ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....62
- รูปที่ 4.14 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มต่างๆ คือ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที.....63
- รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มต่างๆ คือ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที.....64
- รูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s.....64

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.17 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....	65
รูปที่ 4.18 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s.....	66
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s.....	66
รูปที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้น (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s.....	67
รูปที่ 4.21 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....	68
รูปที่ 4.22 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s.....	69
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s.....	69
รูปที่ 4.24 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C.....	70

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.25 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....	71
รูปที่ 4.26 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C.....	72
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบ ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C.....	72
รูปที่ 4.28 กราฟ Nyquist plots ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ; (a) ก่อนเผา และหลังเผาขั้วไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ และ(b) กราฟขยายอุณหภูมิในการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 300 - 600°C.....	73
รูปที่ 4.29 โครงสร้างผลึกของกระจกนำไฟฟ้า, ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ก่อนเผา และหลังเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ.....	75
รูปที่ 4.30 แสดงภาพ SEM ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C.....	76
รูปที่ 4.31 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine].....	77
รูปที่ 4.32 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำด้วยเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า (A) spin coating, (B) dip coating method [manual], และ (C) dip coating method [machine] ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์.....	78
รูปที่ 4.33 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) spin coating, (B) dip coating method [manual], และ (C) dip coating method [machine].....	79

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบ ของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมชั้นไฟฟ้าด้วยเทคนิค (A) spin coating, (B) dip coating method [manual], และ (C) dip coating method [machine].....	79
รูปที่ 4.35 กราฟ Nyquist plots ชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine].....	80
รูปที่ 4.36 แสดงภาพ SEM ของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine].....	82
รูปที่ 4.37 โครงสร้างผลึกของ (A) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) , ชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine], (D) Spin coating.....	83
รูปที่ 4.38 ผลการทำซ้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine].....	84
รูปที่ 4.39 ผลการทำซ้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ ที่ขนาด (A) 4 cm ² และ (B) 81 cm ² เตรียมเทคนิคด้วย Dip Coating [Machine].....	85
รูปที่ 4.40 ผลการเผาชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	86
รูปที่ 4.41 ผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	87
รูปที่ 4.42 ผลความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	88
รูปที่ 4.43 ผลของชนิดของชั้นไฟฟ้าแคโทดต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	89

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.44 กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาต่อการกำจัดสารอินทรีย์ ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	90
รูปที่ 4.45 ผลการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO ₄ สำหรับการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 20 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	91
รูปที่ 4.46 ผลการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> โดย (A) ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก และ (B) ไม่ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยใช้สารละลาย 0.5 % NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	92
รูปที่ 4.47 ผลของการทำซ้ำในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i> โดยใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยใช้สารละลาย 0.5 % NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	93
รูปที่ 4.48 ผลการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์	94
รูปที่ 4.49 แสดงลักษณะการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า (a) ขั้วไฟฟ้าแอโนดอยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าแคโทด และ (b) ขั้วไฟฟ้าแอโนดอยู่ห่างขั้วไฟฟ้าแคโทด.....	94
รูปที่ 4.50 ผลการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	95
รูปที่ 4.51 ผลการศึกษาชนิดการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	95
รูปที่ 4.52 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการหมุนที่ให้แก่ระบบต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	96
รูปที่ 4.53 ผลการศึกษาค่าศักย์ต่อการกำจัด MR โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	97
รูปที่ 4.54 ผลการศึกษาความเข้มแสงต่อการกำจัด MR โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	98

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.55 ผลการศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบต่อการกำจัด MR โดยใช้สารละลาย 5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	99
รูปที่ 4.56 เซลล์ต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	99
รูปที่ 4.57 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ในการกำจัดเชื้อ <i>E.coli</i>	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ที่มาของปัญหาเชิงอุตสาหกรรม

จากรายงานการเกี่ยวกับการฆ่าเชื้อบนอุปกรณ์อาหารเช่น ช้อน ส้อม จาน ชาม ด้วยการใช้ความร้อนจากหม้อต้มตามศูนย์อาหารต่าง ๆ พบว่ายังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการฆ่าเชื้อโรคได้อย่างแท้จริง ดังนั้นทางผู้ประกอบการที่ร่วมวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการกำจัดเชื้อโรคเพื่อทดแทนการใช้หม้อต้มดังกล่าว โดยที่ไม่ใช้สารเคมีอันตราย ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อโรคสูง กระบวนการรวดเร็ว ต้นทุนต่ำและประหยัดพลังงาน ซึ่งสถานประกอบการเล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าวว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้บริโภคในกลุ่มเสี่ยงคือที่ศูนย์อาหาร ทั้งห้างสรรพสินค้า ที่จอดรถโดยสารประจำทาง และที่สำคัญที่โรงพยาบาล เนื่องจากมีผู้คนจำนวนมากและหลากหลายซึ่งอาจมีคนที่เป็นพาหะนำเชื้อโรคมาใช้อุปกรณ์อาหารร่วมกันจะทำให้เกิดการแพร่เชื้อโรคได้ง่าย ซึ่งหากผู้ประกอบการสามารถผลิตอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะสามารถสร้างรายได้จากการจำหน่ายเครื่องมือนี้นี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งกลุ่มลูกค้าเป้าหมายหลักคือห้างสรรพสินค้า โรงพยาบาล รวมถึงร้านอาหารทั่วประเทศ นอกจากนี้เมื่อสินค้าประสบความสำเร็จในการจำหน่ายในประเทศแล้ว จะสามารถผลิตและจำหน่ายไปยังต่างประเทศซึ่งเป็นการสร้างรายได้ให้กับสถานประกอบการและประเทศต่อไป

1.1.2 ที่มาของปัญหาเชิงการศึกษาเชิงลึก

จากการศึกษาพบว่าทำให้ความร้อนจากหม้อหุงข้าว หรือ หม้อต้มที่เป็นระบบเปิด อุณหภูมิของน้ำในหม้อดังกล่าวจะอยู่ในช่วงแค่ 40-50 องศาเซลเซียส ซึ่งเชื้อโรคและเชื้อแบคทีเรียจะยังสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิดังกล่าว และพบว่านอกจากล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาปกติแล้ว ควรนำช้อนส้อมไปฆ่าเชื้อโรคในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยใช้เวลาลวกนาน 4 นาที ซึ่งจะต้องเป็นหม้อที่เป็นระบบปิดซึ่งจะไม่สะดวกกับการใช้งาน และต้องใช้ระยะเวลาในการรอรอ ที่สำคัญคือ วิธีการดังกล่าวจะยังสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้กับอาหารจะไม่นิยมใช้การฆ่าเชื้อแบบใช้สารเคมี เพราะอาจเกิดการตกค้างหรือปนเปื้อนซึ่งจะมีผลต่อผู้บริโภคโดยตรง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาวิธีการที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในเวลาอันรวดเร็ว ปลอดภัยและประหยัดพลังงานด้วย ซึ่งผู้วิจัยได้มีประสบการณ์และความชำนาญเกี่ยวกับเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ผสมผสานเอาเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าร่วมด้วยกับการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยแสงทำให้เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ได้มีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดสารอินทรีย์ ซึ่งเชื่อโรคถือว่าเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่ง โดยผู้วิจัยมีงานวิจัยการกำจัดเชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*, *E. coli*) ที่อยู่ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะเวลาอันสั้น โดยหลักการของวิธีนี้ คือการให้ศักย์ไฟฟ้าและแสงที่ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ แล้วทำให้เกิด ประจุบวกที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ซึ่งน้ำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical , $^{\circ}\text{OH}$) แล้วเกิดการแพร่ออก

จากขั้วไฟฟ้าไปออกซิไดซ์เชื้อโรค และการออกซิไดซ์เซลล์เชื้อโรคโดยตรง ทำให้เกิดการเสียสภาพและทำลายเชื้อโรคได้เป็นอย่างดีในสารละลายน้ำ โดยเทคนิคดังกล่าวนี้จะไม่ใช้สารเคมีอันตราย ไม่ใช้ความร้อน แต่จะให้แค่ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สูงมากรวมกับการให้แสง ซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานในระหว่างการใช้งานเมื่อเทียบกับการใช้ความร้อนจากหม้อต้ม คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาต้นแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ทำงานด้วยหลักการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมากับอุปกรณ์อาหารให้มีประสิทธิภาพสูง และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งให้กับผู้ประกอบการในการลงทุนเพื่อผลิตเครื่องจำหน่ายเพื่อสร้างรายได้ให้กับทางบริษัทและประเทศต่อไป

1.1.3 ผลเสียอันเกิดจากปัญหา และ มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น

มีรายงานเกี่ยวกับการทำความสะอาดข้อต่อในหม้อหุงข้าว หรือในหม้อต้มน้ำร้อนไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างแท้จริง และยังสามารถเพิ่มเชื้อโรคให้ข้อต่อแทนที่จะฆ่าเชื้ออย่างที่ตั้งใจและอาจทำให้ยิ่งเสี่ยงอันตรายมากขึ้นไปอีก จากผลการศึกษาจาก Ohio State University Center for Clinical and Translational Science เผยว่า ข้อต่อ และภาชนะบรรจุอาหารทั้งแบบสแตนเลส หรือพลาสติก มักจะเหลือคราบอาหารตกค้างอย่างพวกครีมหรือคราบจากนม โดย คราบตกค้างเหล่านี้จะเต็มไปด้วยเชื้อ Norovirus ซึ่งเป็นเชื้อไวรัสอันเป็นสาเหตุของโรคอุจจาระร่วงเฉียบพลัน นอกจากนี้ข้อต่อ ยังมีเชื้อแบคทีเรีย เช่น *E.coli* และ *Enterobacter spp.* ที่เป็นตัวต้นเหตุของอาการอักเสบของระบบทางเดินอาหารอีกด้วย เชื้อโรคและแบคทีเรียจากข้อต่อและส้อมจะก่อให้เกิดอาการท้องร่วงเฉียบพลัน และทำให้เกิดอาการท้องเสียอย่างรุนแรงได้ โดยอาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย หรือหากร่างกายอ่อนแอ และได้รับเชื้อโรคหลายชนิดพร้อมกัน ก็อาจทำให้เกิดอาการท้องร่วงได้โดยที่เดียว ซึ่งปัญหาสุขภาพดังกล่าวถือว่าเป็นปัญหาใหญ่ที่ควรตระหนักและไม่ควรมองข้ามเนื่องจากสถานที่สาธารณะที่มีการใช้อุปกรณ์อาหารต่างๆร่วมกันทั้ง ห้างสรรพสินค้า ร้านอาหาร โรงพยาบาลแล้วแต่มีผู้คนจำนวนมากไปใช้บริการร่วมกัน หากเกิดการแพร่เชื้อโรคแล้ว จะเกิดผลเสียต่อสุขภาพความเป็นอยู่ของผู้บริโภค นอกจากต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลแล้ว ยังต้องเสียเวลาซึ่งจะขาดรายได้ไปในแต่ละวัน และที่สำคัญคือเมื่ออาการรุนแรงมากๆ อาจถึงขนาดเสียชีวิตได้เลย ดังนั้นผลกระทบดังกล่าวถือว่ามากมายจนไม่สามารถประเมินมูลค่าเป็นตัวเงินได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวเพื่อหาวิธีป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อโรค

1.2.2 เพื่อพัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับฆ่าเชื้อบนอุปกรณ์อาหาร

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 พัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ และทดสอบคุณลักษณะต่างๆ รวมถึงประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์

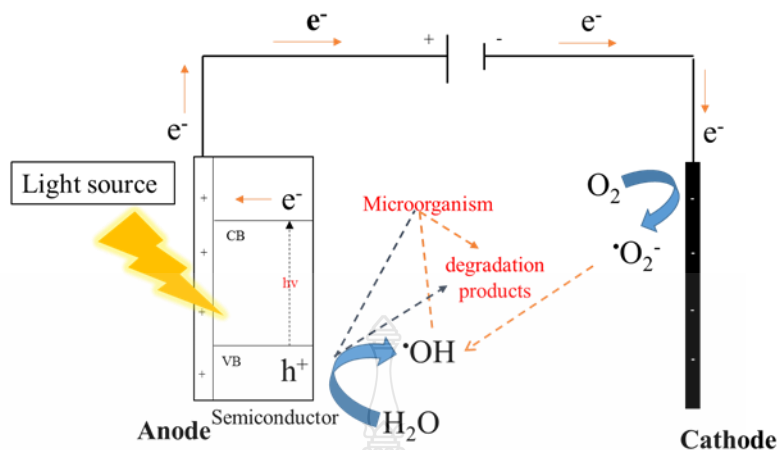
1.3.2 ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าและสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ และเชื้อจุลินทรีย์

1.3.3 ออกแบบชุดต้นแบบสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์รวมถึงการนำไปเผยแพร่และถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.4 กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาเทคนิคเพื่อการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งมีหลากหลายวิธี ทั้งที่เป็นการใช้สารเคมี เช่น การเติมคลอรีน การผ่านโอโซนเข้าไปในระบบ [1] ซึ่งเป็นวิธีการให้สารเคมีไปเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันผนังเซลล์ของเชื้อโรคทำให้เชื้อโรคเสียหายและเกิดการทำลายเชื้อโรคได้ แต่วิธีดังกล่าวยังมีจุดด้อยคือทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมี เช่น สารประกอบคลอรีน ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารที่มีอันตรายเมื่อติดไปกับภาชนะหรืออุปกรณ์อาหารหากกระบวนการล้างสารเคมีดังกล่าวไม่หมด นอกจากนี้ยังมีวิธีการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra violet; UV) เพื่อฆ่าเชื้อโรคซึ่งอาศัยคลื่นแสงที่มีความถี่และพลังงานสูงในย่านอัลตราไวโอเล็ตเพื่อทำลายเซลล์เนื้อเยื่อของเชื้อจุลินทรีย์หรือเชื้อโรคได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามในแสงธรรมชาติจะมีปริมาณแสง UV ในปริมาณที่ต่ำ จำเป็นต้องใช้เวลาในการฉายแสงธรรมชาตินานเกินไป หรือหากใช้หลอดกำเนิดแสง UV โดยตรงก็จะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและเป็นอันตรายกับผู้ไปด้วย [2-4] หากเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแสง UV ไม่ได้ติดตั้งหรือออกแบบให้ป้องกันการสัมผัสรังสี UV โดยตรง นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อโรค โดยตรงก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับ เช่นการใช้หม้อหุงข้าวโดยการเปิดฝาไว้ซึ่งเป็นระบบเปิดซึ่งความร้อนจากหม้อต้มดังกล่าวยังไม่มากพอที่จะทำให้เชื้อโรคตาย คือโดยปกติต้องใช้ความร้อนมากกว่า 80 องศาเซลเซียสถึงจะสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ แต่ยังมีเชื้อโรคบางชนิดที่มีความทนทานต่อความร้อนได้ทำให้วิธีการใช้หม้อต้มไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ และที่สำคัญวิธีการดังกล่าวยังต้องใช้พลังงานสำหรับการทำความร้อนสูงมาก ซึ่งเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคใหม่ที่มีความสามารถในการกำจัดหรือฆ่าเชื้อโรค ไม่มีสารพิษตกค้างในระบบ ที่สำคัญคือต้องเป็นเทคนิคที่ใช้เวลา และพลังงานน้อยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งจากรายงานการวิจัยพบว่า เทคนิคการเร่งสารกึ่งตัวนำด้วยแสง (Photocatalytic; PC) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชื้อจุลินทรีย์กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และไม่เกิดสารพิษตกค้างในระบบ โดยใช้แค่พลังงานจากแสงเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา [5-7] ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นิยมศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูงในการออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ ราคาถูก ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตาม TiO_2 ยังเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงาน (Band gap energy, E_g) กว้าง ซึ่งจะตอบสนองเฉพาะแสง UV ที่มีปริมาณน้อยในแสงธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่พัฒนาสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ที่มีปริมาณมากในแสงธรรมชาติ เช่น บิสมัทวานาเดต (BiVO_4) เป็นสาร

กึ่งตัวนำที่ได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงาน (Band gap energy, E_g) แคบ จึงทำให้สามารถดูดกลืนในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ดี [8, 9] ในงานวิจัยแรกๆ พบว่าอัตราการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ยังไม่ดีมากนัก จึงต้องมีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพให้สูงมากขึ้นเพื่อให้กำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างที่ต้องการ โดยการพัฒนาให้มีลักษณะของโครงสร้างผลึก พื้นที่ผิว ความพรุนของอนุภาคสารกึ่งตัวนำให้ดีขึ้น [10] แต่อย่างไรก็ดีการใช้อนุภาคของสารกึ่งตัวนำโดยตรงใส่ลงไปในระบบ จะมีข้อด้อยในขั้นตอนการนำสารกึ่งตัวนำกลับออกจากระบบหลังผ่านกระบวนการแล้ว ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งานจริง ทางเลือกหนึ่งที่นิยมศึกษาวิจัยกันคือการนำสารกึ่งตัวนำมาตรึงลงบนขั้วไฟฟ้าแล้วทำงานภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าและเร่งด้วยแสง หรือเรียกว่า เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำเอาจุดเด่นของเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrocatalytic; EC) [11] และ เทคนิคโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic; PC) ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดและมีความสะดวกในการใช้งานจริง โดยมีหลักการทำงานเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ (Microorganism) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 คือ เมื่อกระตุ้นสารกึ่งตัวนำที่ผิวด้านขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าค่า E_g ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction band; CB) ทำให้เกิดช่องว่าง (hole; h^+) ซึ่งมีประจุเป็นบวก ที่ VB เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่เป็นบวกเข้าไปจะเป็นการเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนที่ชั้น CB ไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าจากขั้วแอโนดและเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งจะไปรีดิวซ์ออกซิเจน (O_2) ที่ผิวด้านขั้วไฟฟ้าแคโทดให้กลายเป็น อนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ ($^{\circ}O_2^-$) ซึ่งจะเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงมากในน้ำทำให้น้ำกลายเป็นอนุมูลอิสระเช่นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $^{\circ}OH$) ซึ่งจะเป็นสารที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบได้เป็นอย่างดี และส่วนที่สำคัญที่สุดคือด้านขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ได้มีการให้ศักย์ไฟฟ้านำด้านบวกเพื่อแยกอิเล็กตรอนออกจากชั้นการนำจะทำให้เกิดช่องว่าง (h^+) จำนวนมากที่ผิวด้านขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะมีความสามารถสูงในการออกซิไดซ์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวด้านขั้วไฟฟ้าโดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระเช่นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $^{\circ}OH$) ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่แรงมากสามารถแพร่ออกจากผิวด้านขั้วไฟฟ้าไปออกซิไดซ์จุลินทรีย์ที่อยู่ในสารละลายและที่ติดบนอุปกรณ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดกระบวนการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในเวลาเดียวกันได้หลากหลายกระบวนการ



รูปที่ 1.1 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ (Microorganism) ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก ภายใต้การเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า

นอกจากนี้สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างในการควบคุมคุณภาพและประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำคือกระบวนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าดังกล่าว ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายวิธี ทั้งการใช้เทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) [12] เทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [13] การตรึงทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical deposition) [14] แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าว ก็ยังมีข้อจำกัดหลายข้อ ทั้งความสามารถในการออกแบบในระบบสเกลขนาดใหญ่ การควบคุมความหนาของฟิล์มสารกึ่งตัวนำให้มีความเฉพาะเจาะจง ของเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงและไฮโดรเทอร์มอล ขั้นตอนกระบวนการค่อนข้างยุ่งยากของเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลและการตรึงทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งยังเป็นปัญหาสำคัญของเทคนิคดังกล่าว ดังนั้นเทคนิคการตรึงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้าแบบที่ง่ายและสะดวกกับการขยายขนาดสเกลจึงได้รับการพิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางแบบจุ่มเคลือบ (dip coating) [15] ถือเป็นเทคนิคที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการดังกล่าวได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวหากทำการจุ่มด้วยคน จะยังมีข้อจำกัดเรื่องการควบคุมความหนาให้มีความเฉพาะเจาะจง ที่สำคัญคือยังมีข้อจำกัดในการเตรียมฟิล์มสารกึ่งตัวนำซ้ำแต่ละครั้งได้ไม่เท่ากันนัก สาเหตุหลักมาจากขีดจำกัดของคน ในการควบคุมมุม ความเร็ว ให้เท่ากันได้ทุกครั้ง ทำให้เกิดปัญหาการเตรียมฟิล์มบางซ้ำหลายครั้งแต่ได้ผลไม่เท่ากัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาเทคนิคการตรึงสารกึ่งตัวนำแบบจุ่มเคลือบให้มีความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มได้เฉพาะเจาะจง และสามารถเตรียมซ้ำในแต่ละครั้งได้เป็นอย่างดี (Reproducible) โดยสนใจประยุกต์ใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถตั้งโปรแกรมการทำงานเพื่อให้สามารถควบคุมอัตราเร็วในการจุ่มวัสดุรองรับลงในสารละลาย ควบคุมระยะเวลา และมุมสัมผัสที่แน่นอนในการแช่วัสดุรองรับในสารละลาย และที่สำคัญคือ การใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติสามารถขยายขนาดสเกลของวัสดุรองรับได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถลดข้อจำกัดต่างๆของการจุ่มเคลือบ และเสริมจุดเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอื่น ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการ

กำจัดเชื้อจุลินทรีย์สูงสุดและมีสม่ำเสมอในการผลิตข้าวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำในการพัฒนาต่อยอดการผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาชุดต้นแบบสำหรับฆ่าเชื้อโรคบนอุปกรณ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้ต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้องค์ความรู้ใหม่ในการเตรียมข้าวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อโรคบนอุปกรณ์อาหาร ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก
- ได้องค์ความรู้ใหม่ในการสร้างชุดเซลล์เคมีไฟฟ้าต้นแบบในการฆ่าเชื้อโรคบนอุปกรณ์อาหาร และสามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อการศึกษาต่อยอดขยายสเกล และใช้งานเชิงพาณิชย์ต่อไป
- ได้สิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรจากชุดต้นแบบการการฆ่าเชื้อโรคบนอุปกรณ์อาหาร
- ได้ชุดต้นแบบอุปกรณ์ฆ่าเชื้อโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก
- ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติในฐานะข้อมูลที่เป็นที่ยอมรับระดับสากล



บทที่ 2

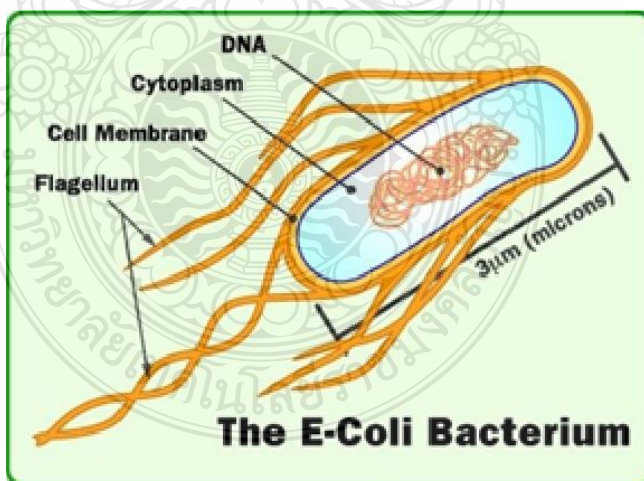
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เชื้ออีโคไล (*E. coli*)

Escherichia coli หรือ *E. coli* เป็นเชื้อแบคทีเรียประจำถิ่น (Normal flora) ที่พบได้ในลำไส้ของคนและสัตว์เลือดอุ่น โดยปกติจะไม่ทำอันตรายหรือก่อโรคร้ายแรง เมื่ออยู่ในลำไส้จะช่วยย่อยอาหารที่เรารับประทานเข้าไป แต่หากเชื้อ *E. coli* ลุกล้ำ เข้าสู่ระบบต่างๆ ของร่างกายก็จะทำให้เกิดโรคติดเชื้อรุนแรง เช่น โรคติดเชื้อระบบทางเดินปัสสาวะ โรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ และการติดเชื้อในกระแสเลือด เป็นต้น และมีเชื้อ *E. coli* บางสายพันธุ์ที่ทำให้เกิดโรคอุจจาระร่วงได้ โดยการปนเปื้อนของเชื้อในอาหารหรือน้ำดื่ม ทั้งนี้เชื้อ *E. coli* ที่สามารถก่อโรคอุจจาระร่วง (Diarrheagenic *E. coli*) จะมีกลไกการก่อโรคและสามารถ สร้างสารพิษได้แตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์เช่น เชื้อ Enterotoxigenic *E. coli* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สร้างสารพิษ enterotoxin ทำให้เกิดอาการท้องร่วงแบบเฉียบพลัน ถ่ายเหลวเป็นน้ำหรือเชื้อ Enterohaemorrhagic *E. coli* ที่สร้างสารพิษ Shiga ทำให้เกิดอาการท้องร่วงอย่างรุนแรง ถ่ายเป็นมูกเลือด ก่อให้เกิดกลุ่มอาการเม็ดเลือดแดงแตกและไตวายเฉียบพลัน

2.1.1 ลักษณะรูปร่างและสรีรวิทยา

E. coli เป็นแบคทีเรียแกรมลบรูปแท่ง (rod shape) มีขนาดตั้งแต่ 1.1-1.5 x 2.0-6.0 ไมโครเมตร สายพันธุ์ ส่วนใหญ่ เคลื่อนที่ได้ (motile) โดยอาศัย flagella ที่มีอยู่รอบตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของเชื้อ *E. coli* [16]

เชื้อ *E. coli* ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming) สามารถเจริญได้ ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน (aerobe) และสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (facultative anaerobe) ปกติสามารถเจริญบนอาหารธรรมดาที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ช่วงอุณหภูมิ 7 - 46 องศาเซลเซียส pH ของอาหารตั้งแต่ 4.4 - 10 มี capsule

บางๆ หุ้มอยู่รอบตัวทำให้เชื้อทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีเช่น มีชีวิตอยู่ ตามเสื้อผ้าแห้งและในฝุ่น ละอองได้หลายวัน อยู่ในน้ำได้นานหลายสัปดาห์ แต่ถูกทำลายเมื่อต้มที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

2.1.2 อนุกรมวิธานของเชื้อ (Classification)

Escherichia coli (*E. coli*) เป็นสกุลที่ตั้งชื่อตามผู้เชี่ยวชาญทางโรคเด็กชาวเยอรมันคือ Theodor Escherichia จัดอยู่ใน Family Enterobacteriaceae, Tribe Escherichia, Genus Escherichia, Species coli เชื้อในสกุลนี้มีหลาย serotype และหลาย biotype ดังนั้นในการจำแนกจึง ต้องอาศัยลักษณะตาม คุณสมบัติของแอนติเจน

2.1.3 คุณสมบัติของแอนติเจน

แอนติเจนของ *E. coli* มีอยู่หลากหลายชนิด คือ

- Somatic antigen (O-antigen) เป็นสารประกอบ lipopolysaccharide พบอยู่ใน ชั้นของผนังเซลล์ มีคุณสมบัติทนความร้อนถึง 121 °C ทนกรดอ่อนและแอลกอฮอล์ ปัจจุบันมีอยู่ ประมาณ 171 ชนิด

- Capsule antigen (K-antigen) เป็นสารประกอบ polysaccharide มักพบห่อหุ้ม เซลล์ เช่น capsule, envelope หรือ fimbriae ที่หุ้มตัวแบคทีเรียและคลุม O-antigen ทำให้ เชื้อไม่สามารถเกาะ กลุ่มกันในแอนติซีรัม O ยกเว้นเสียแต่ ทำลาย K-antigen เสียก่อนโดยการต้มที่ 100 °C นาน 2.5 ชั่วโมง หรือที่ 121 °C นาน 2 ชั่วโมง ปัจจุบันพบอยู่ ประมาณ 100 ชนิด

- Flagella antigen (H-antigen) เป็นส่วนของ flagella ประกอบด้วย protein ที่ เรียกว่า flagellin ถูกทำลายที่อุณหภูมิ 100 °C สายพันธุ์ ที่ไม่เคลื่อนไหวจะไม่ พบ H-antigen ปัจจุบัน พบแล้ว 56 ชนิด

Antigen O, K และ H มีคุณสมบัติทางกายภาพและภูมิคุ้มกันวิทยาที่แตกต่างกัน ดังนั้นใน การจำแนก และการแยก serotype ของเชื้อก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอนติเจนเหล่านี้เช่น *E. coli* O157:H7, O6:K15:H16, O142:H6, O29:H7/30/32, O119:H5/H6 และ O128:H7/12/21 เป็นต้น

2.1.4 การทำให้เกิดโรคของเชื้อ *Escherichia coli*

ปริมาณของเชื้อ EPEC (*Enteropathogenic E. coli*) ที่ทำให้เกิดโรคท้องเสียในคนอยู่ ช่วง 10^7 - 10^8 เซลล์ต่อกรัมของอาหาร กลุ่มที่เป็นสายพันธุ์ที่ทำให้เกิดโรคบิดโดยไม่สร้างสารพิษอยู่ช่วง 10^6 ถึง 10^7 มีระยะฟักตัวประมาณ 6-36 ชั่วโมง เชื้อ *E. coli* ที่ทำให้เกิดโรคในคนและสัตว์อาจทำให้เกิดโรคดังนี้

2.1.4.1 ท้องร่วง (Gastroenteritis)

- *Enterotoxigenic E. coli* (ETEC) สร้างเอนเทอโรทอกซิน 2 ชนิด คือ ทอกซินชนิดไม่ทนความร้อน (heat-labile enterotoxin, LT) และ ทอกซินชนิดทนความร้อน

(heat-stable enterotoxin, STa และ STb) พบความสำคัญครั้งแรกว่าเป็นสาเหตุของโรคท้องร่วงของลูกสุกร การศึกษา ETEC ในลูกสุกรทำให้ทราบกลไกการเกิดโรคว่ามีพลาสมิดสังเคราะห์เอนเทอโรทอกซิน 2 ชนิด ปัจจุบัน ETEC ทำให้เกิดโรคท้องเสียรุนแรงในเด็กทารก และท้องร่วงอ่อนๆ ในคนทั่วไป เมื่อกินน้ำและอาหารที่มีเชื้อปนอยู่ต้องมีเชื้อ 10^8 จึงเกิดโรคได้

- *Enteropathogenic E. coli* (EPEC) เป็นกลุ่มที่สำคัญเนื่องจากเป็นสาเหตุโรคท้องร่วงรุนแรงในเด็กทารก จนถึง 2 ขวบ ในประเทศกำลังพัฒนา ไม่เกิดโรคในผู้ใหญ่ ไม่สร้างทอกซิน มีพลาสมิดสร้างสารเพื่อการจับแน่นกับเซลล์ของลำไส้เล็ก

- *Enteroinvasive E. coli* (EIEC) ลักษณะทางชีวเคมี พันธุกรรม และการเกิดโรคคล้ายกับเชื้อ *Shigella* ไม่ย่อยน้ำตาลแลคโตส สร้าง Shiga-like toxin-I (SLT-I) และ Shiga-like toxin-II (SLT-II) ทำให้เกิดโรคท้องร่วงคล้ายโรคบิด ปวดท้อง มีหนอง และเลือดออกในอุจจาระ เกิดได้กับคนทุกวัย

- *Enterohemorrhagic E. coli* (EHEC) พบครั้งแรกที่สหรัฐอเมริกา เป็น *E. coli* O157 สายพันธุ์ที่พบมากคือ *E. coli* O157:H7 ทำให้เกิดท้องร่วงอาการตกเลือดที่ลำไส้ (Hemorrhagic colitis) ท้องเสีย และปวดท้องรุนแรง พบได้ในคนทุกวัย และโรค hemolytic uremic syndrome (HUS) ซึ่งพบได้ในคนทุกวัยแต่พบมากในเด็กและทารก สาเหตุไตวายในเด็ก ถ่ายอุจจาระเป็นเลือด อาเจียน ชีตขาวเนื่องมาจากทอกซิน เรียกว่า เวโรไซโททอกซิน (Verocytotoxin) หรือ เวโรทอกซิน (Verotoxin) จึงอาจเรียกเชื้อนี้ว่า เวโรไซโททอกซิเจนิค *E. coli* (*Verocytotoxigenic E. coli* หรือ VTEC) ทอกซินนี้มีสมบัติทางแอนติเจนคล้ายกับ เชื้อ *Shigella* จึงเรียกทอกซินนี้ว่า Shiga-like toxin (SLT) การระบาดเกิดจากการรับประทานอาหารปนเปื้อนเชื้อที่ได้รับความร้อนไม่เพียงพอ เช่น แฮมเบอร์เกอร์ เนื้อบดดิบ นมดิบรวมทั้งน้ำดื่มน้ำใช้

2.1.4.2 ทางเดินปัสสาวะอักเสบเนื่องจาก *E. coli*

กลุ่มที่ก่อให้เกิดโรค ได้แก่ ซีโรไทป์ 1, 2, 4, 6, 7, 9, 15, 16, 18 และ 75 สร้าง ฮีโมไลซินเกาะติดเยื่อผิวทางเดินปัสสาวะ ผู้หญิงมีโอกาสเป็นมากกว่าผู้ชาย ทำให้เกิดโรคกระเพาะปัสสาวะอักเสบ ภาวะไตและกรวยไตอักเสบ

2.1.5 การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์หมายความรวมถึงเชื้อแบคทีเรียและเชื้อไวรัสเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดโรคแก่มนุษย์ สัตว์ ตลอดจนพืชพรรณธัญญาหารต่างๆ แบคทีเรียอาจปนเปื้อนในอาหารและน้ำ แบคทีเรียเหล่านี้อาจทำให้ผู้บริโภคเกิดอาการผิดปกติทางร่างกาย หรือเสียชีวิตดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาวิธีการที่กำจัดเชื้อแบคทีเรียเหล่านั้น เพื่อไม่ให้ เกิดการสูญเสียดังกล่าว วิธีการควบคุมหมายถึงการฆ่า(Killing) การยับยั้ง(Inhibition) และการกำจัด (Removal) นั่นเอง เพื่อให้ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งมีหลายวิธีดังนี้

2.1.5.1 การควบคุมทางกายภาพ

- การใช้ความร้อน

1) ความร้อนสูง

- การต้ม ในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
- การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) (ใช้อุณหภูมิ 62.8 °C เป็นเวลา 30 นาที หรือ 71.6 °C เป็นเวลา 15 วินาที)
- Tyndallization ใช้อุณหภูมิ 80-100 °C เป็นเวลา 30 นาที รวม 3 ครั้ง แต่ละ ครั้งห่างกัน 24 ชั่วโมง
- การใช้ไอน้ำภายใต้ความดัน โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าหม้อนึ่งความดัน (Autoclave)

2) ความร้อนต่ำ

วิธีนี้สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้เพียงร้อยละ 50-80 ดังนั้นในการทำให้ ปราศจากเชื้อ จึงไม่นิยมใช้กัน แต่จะใช้มากในการถนอมอาหารถ้านำแบคทีเรียที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อไปบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ -35 °C อย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์ จึงจะทำลายแบคทีเรียได้

- การใช้คลื่นเสียง

คลื่นเสียงสามารถใช้ในการควบคุมจุลินทรีย์ได้ ซึ่งประสิทธิภาพของคลื่นเสียงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น การที่คลื่นเสียงทำลายจุลินทรีย์ได้เกิดจากเสียงทำให้เกิดช่องว่างของของเหลวภายในเซลล์ ช่องว่างจะขยายขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนภายในช่องว่างมีความดันมาก ทำให้เซลล์ฉีกขาด

- การใช้รังสี

รังสี ที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีพลังงานสูง และมีอำนาจการทะลุทะลวงสูง จึงทำลายจุลินทรีย์ได้ดี รังสีที่ใช้ควบคุมจุลินทรีย์มี 2 ชนิด คือ

- 1) Ionizing radiation ใช้ฆ่าเชื้อโรคในวัตถุที่ไม่ทนความร้อน
- 2) รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นรังสีที่ใช้ในการควบคุมจุลินทรีย์กันมาก โดยมีผล ต่อโครงสร้างของเซลล์ เช่น DNA RNA โปรตีนและสารอินทรีย์อื่นๆ

- การใช้สารเคมี

สารเคมีที่สามารถนำมาใช้เป็นน้ำยาฆ่าเชื้อได้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อได้อย่างรวดเร็วแม้ในความเข้มข้นต่ำๆ กลไกการทำลายเชื้อไวรัส คือ ละลายไขมันใน Envelope หรือทำให้โปรตีนและกรดนิวคลีอิกของเชื้อไวรัสเสียสภาพไป สารเคมีที่นิยมใช้กันแพร่หลายมีดังนี้

1) Sodium hypochlorite เป็นสารประกอบของคลอรีน ใช้เป็น Disinfectant เช็ดโต๊ะทำงาน ในห้องปฏิบัติการ ฆ่าเชื้อที่แปดเปื้อนภาชนะ และเครื่องใช้ต่างๆ แต่มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะ

2) Chlorine มักใช้ในการทำลายเชื้อในน้ำประปา สระว่ายน้ำฤทธิ์ของคลอรีนจะลดลงหากน้ำมีสภาพเป็นด่างหรือมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนมากเกินไป

3) Iodine ออกฤทธิ์ทำลายเชื้อได้ดี ไวรัส Influenza ถูกฆ่าเชื้อด้วยความเข้มข้นเพียง 70 ppm แต่ความเข้มข้นของไอโอดีนจะอ่อนลงถ้ามีต่างหรือสารอินทรีย์ปนอยู่มากข้อเสียของไอโอดีน คือ ระคายเคืองเนื้อเยื่อที่ใช้กันอยู่ในรูปของ Tincture iodine 2% แต่ถ้าอยู่ในรูปของ Povidone - iodine (Betadine) จะระคายเคืองน้อยลง แต่การออกฤทธิ์สู้ Tincture iodine ไม่ได้

4) Formaldehyde หรือ Formalin 37% ทำลายเชื้อได้ดี แต่ทั้งสารละลายและไอมีพิษ ต่อเนื้อเยื่อมาก ใช้เป็น disinfectant ได้ผลดี

5) Glutaraldehyde ในรูปของ 2% ผสมกับ Bicarbonate buffer (Cidex) จะมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อไวรัสได้หมดใน 10 นาที ข้อดี คือ สามารถแช่เครื่องมือที่เป็นยางได้โดยไม่ทำให้ยางเสียสภาพ ซึมเข้าไปในผิวของเครื่องมือได้ดีและล้างออกง่าย

6) Ethyl alcohol เป็นน้ำยาฆ่าเชื้อที่นิยมใช้กันมากชนิดหนึ่งสามารถตกตะกอนได้ ซึ่งตะกอนโปรตีนนี้จะป้องกันไม่ให้เชื้อถูกทำลาย การเติม Sodium hydroxide สามารถยับยั้งการจับตัวของตะกอนโปรตีน ทำให้ฤทธิ์การฆ่าเชื้อดีขึ้น

7) Hydrogen peroxide มีฤทธิ์ในการทำลายเชื้อไม่ดีมากนักมักนำมาใช้ล้างแผล เพราะเมื่อถูกกับเอนไซม์ Catalase ในเนื้อเยื่อก็จะสลายตัวเกิดก๊าซออกซิเจนเป็นฟองฟู ผลักเอาเศษสิ่งสกปรกให้หลุดออกจากแผล

2.2 เทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

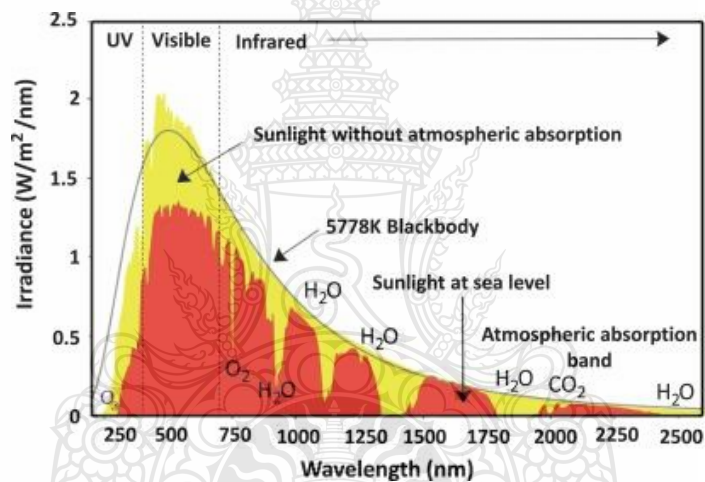
เทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกเป็นเทคนิคที่เมื่อกระตุ้นสารกึ่งตัวนำที่ผิวขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าค่า แล็บช่องว่างพลังงาน (Band gap energy, E_g) ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ซึ่งสารกึ่งตัวนำมีหลากหลายชนิด เช่น TiO_2 [17], ZnO [18], $BiVO_4$ [19] และ WO_3 [20] จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction band; CB) ก็จะทำให้เกิดช่องว่าง (hole; h^+) ซึ่งมีประจุเป็นบวก เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่เป็นบวกเข้าไปจะเป็นการเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนที่ชั้นการนำไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าจากขั้วแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งจะไปรีดิวซ์ ออกซิเจน (O_2) ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแคโทดให้กลายเป็น อนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ ($^{\circ}O_2^-$) ซึ่งจะปฏิกิริยาที่แรงมากในน้ำทำให้น้ำกลายเป็นอนุมูลอิสระเช่นอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $^{\circ}OH$) ซึ่งจะปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบได้เป็นอย่างดี และส่วนที่สำคัญที่สุดคือด้านขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ได้มีการให้ศักย์ไฟฟ้าด้านบวกเพื่อแยกอิเล็กตรอนออกจากชั้นการนำจะทำให้เกิดช่องว่าง (h^+) จำนวนมากที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะมีความสามารถสูงในการออกซิไดซ์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าโดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็นอนุมูลอิสระ เช่นอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $^{\circ}OH$) ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่แรงมากสามารถแพร่ออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไปออกซิไดซ์จุลินทรีย์ที่อยู่ในสารละลายและที่ติดบนอุปกรณ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดกระบวนการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในเวลาเดียวกันได้หลากหลายกระบวนการ

2.3 การพัฒนาชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ

การพัฒนาชีวไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเคตะโลก มีอยู่หลากหลายวิธีดังนี้

2.3.1 การพัฒนาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากการศึกษาแหล่งแสงที่มีอยู่ในธรรมชาติในรูปที่ 2.2 จะพบว่าแสงที่มีปริมาณมากในธรรมชาตินั้นคือแสงที่ตามองเห็นหรือ Visible light ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในธรรมชาติมีมาก สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการตรึงลงบนผิวชีวไฟฟ้าควรจะต้องมีสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น(Visible light) เช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า Band gap energy (E_g) กับความยาวคลื่น (Wavelength, λ) ในช่วงที่ตามองเห็น ตามการคำนวณค่า E_g ในสมการที่ 2.1 พบว่าสารกึ่งตัวนำควรมีค่า $E_g < 3.1\text{eV}$



รูปที่ 2.2 ปริมาณของแสงที่มีอยู่ในธรรมชาติในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ [21]

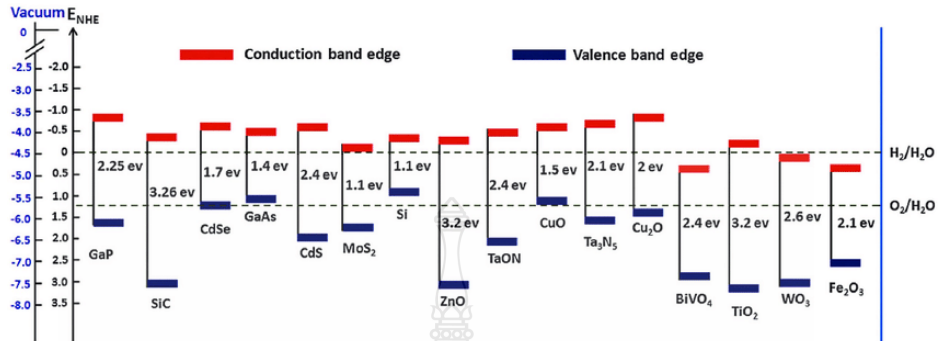
$$E_g (\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda} \dots\dots\dots 2.1$$

โดยที่ E_g คือ Band Gap Energy

λ คือ Wavelength (nm)

จากการศึกษาสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการตรึงบนผิวหน้าชีวไฟฟ้านั้น พบว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีสมบัติที่แตกต่างกันไป แต่จากการพิจารณาค่า E_g จากรูปที่ 2.3 พบว่าทั้งสแตนออกไซด์ (WO_3) และบิสมีทวานาเดต (BiVO_4) เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในการตรึงบนผิวชีวไฟฟ้า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีค่า Band Gap Energy ที่ค่อนข้างแคบ ซึ่งจะตอบสนองหรือเกิดการ ทำงานได้ดีในช่วงแสงที่ตามองเห็น(Visible light) และจากการศึกษาพบว่าสารกึ่งตัวนำทั้ง

สองชนิดมีค่าศักย์ไฟฟ้าช่วงแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) มีค่าค่อนข้างไปในทางบวกซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี



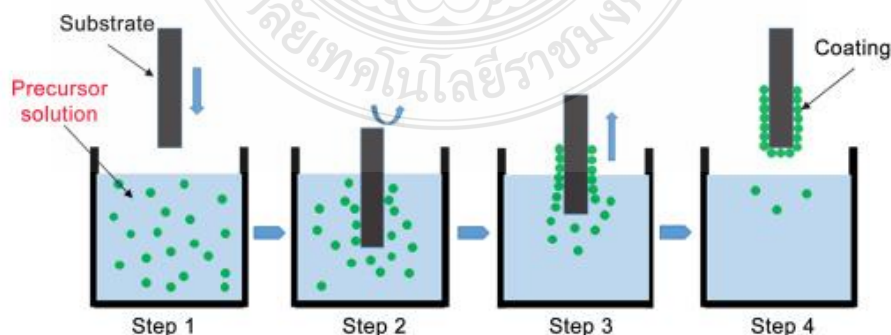
รูปที่ 2.3 ค่า Band Gap Energy (E_g) ของสารกึ่งตัวนำ [22]

2.3.2 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง คือ ชั้นของอะตอม หรือ กลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ บนวัสดุรองรับ (Substrate) ซึ่งถูกควบคุมโดยกระบวนการสังเคราะห์เรียกว่า การตรึง (Deposition) โดยสารกึ่งตัวนำสามารถนำมาทำให้เป็นฟิล์มบางเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางก็มีด้วยกันหลากหลายวิธีดังนี้

2.3.2.1 การตรึงแบบจุ่ม (Dip coating)

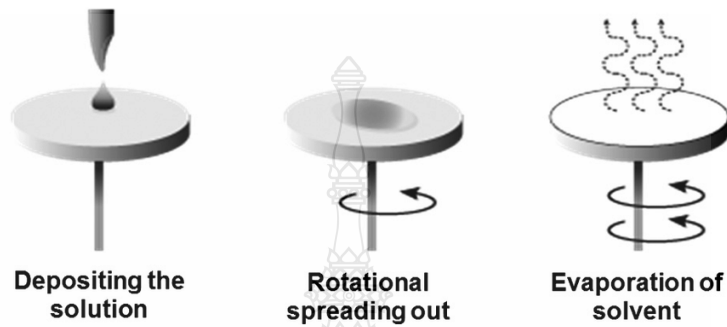
เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยการนำตัวรองรับ (Substrate) จุ่มลงในสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้น (Precursor) ทำให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคเกาะบริเวณพื้นผิวของตัวรองรับที่ต้องการ เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดนาโนชั้น จากนั้นตัวรองรับที่ผ่านการจุ่มเคลือบแล้วจะถูกนำมาระเหยเอาตัวทำละลายออกเพื่อให้ฟิล์มสามารถยึดติดบนผิวของตัวรองรับได้ดี ดังแสดงขั้นตอนการตรึงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การตรึงแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating) [23]

2.3.2.2 การตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

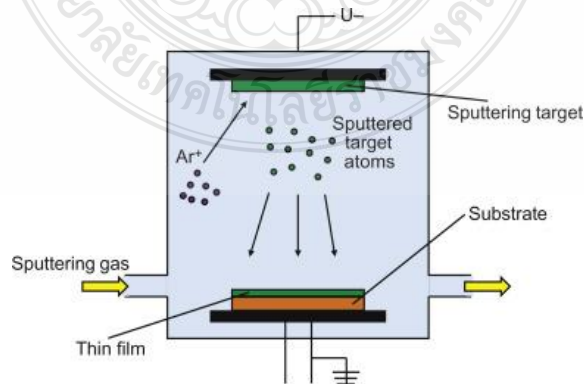
เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการหมุนตัวรองรับ โดยด้านบนตัวรองรับนั้นจะหยดสารละลายที่ต้องการตรึงไว้ จากนั้นทำการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว ทำให้สารละลายบางส่วนจะเกาะติดอยู่บริเวณพื้นผิวของตัวรองรับ และบางส่วนจะกระจายออกไปตามแรงหมุนที่ให้แก่ระบบ จากนั้นนำตัวรองรับมาทำการระเหยเพื่อเอาตัวทำละลายออก ดังแสดงขั้นตอนการตรึงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การตรึงแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) [24]

2.3.2.3 การตรึงแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

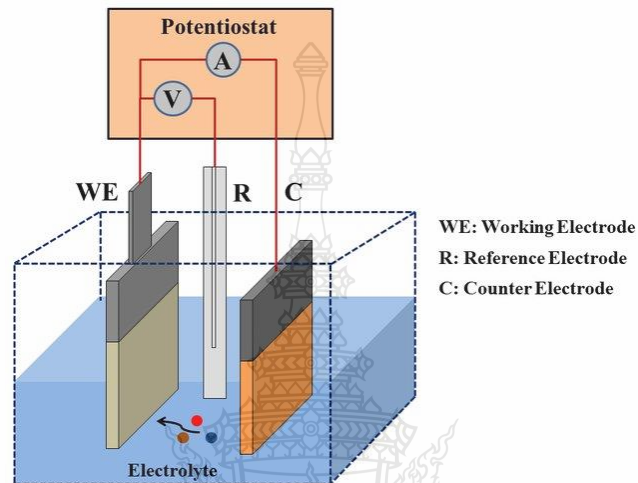
การสปัตเตอร์ริง คือ กระบวนการทางฟิสิกส์อย่างหนึ่ง ที่เกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของวัสดุใด ๆ ถูกชนหรือกระทบด้วยอนุภาคพลังงานสูงจนอนุภาคของวัสดุที่อยู่ผิวหน้าเกิดการหลุดออกมา กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นจากการถ่ายทอดโมเมนตัม (Momentum) ของอนุภาคพลังงานสูงที่วิ่งเข้าชนกับอนุภาคของวัสดุที่ถูกชน เมื่อผิวของวัสดุถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงาน อะตอมที่ผิวของวัสดุจะถูกกระเจิงออกมาเนื่องจากการชนระหว่างอะตอมที่ผิววัสดุและอนุภาคพลังงาน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สปัตเตอร์ริงกลับ (Back-sputtering) หรือสปัตเตอร์ริงเชิงเดียว (Simple sputtering) โดยอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของวัสดุนี้ จะไปก่อตัวที่พื้นผิวตัวรองรับเกิดเป็นฟิล์มบางขึ้นมา ดังแสดงการตรึงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การตรึงแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering) [25]

2.3.2.4 การตรึงด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical deposition)

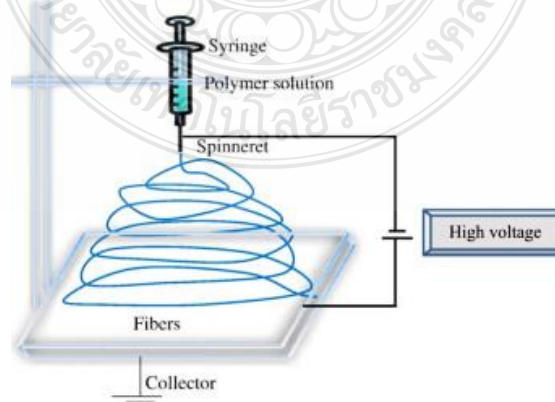
เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยการทำให้สารไปพอกอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า ทำให้ไอออนของสารที่อยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดย ไอออนของสารจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบของอิเล็กโทรดและเปลี่ยนสภาพเป็นสารที่เป็นของแข็งพอกอยู่ที่ผิวหน้าขั้ว ดังแสดงขั้นตอนการตรึงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การตรึงด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical deposition) [26]

2.3.2.5 การตรึงด้วยไฟฟ้าแบบหมุน (Electrospinning deposition)

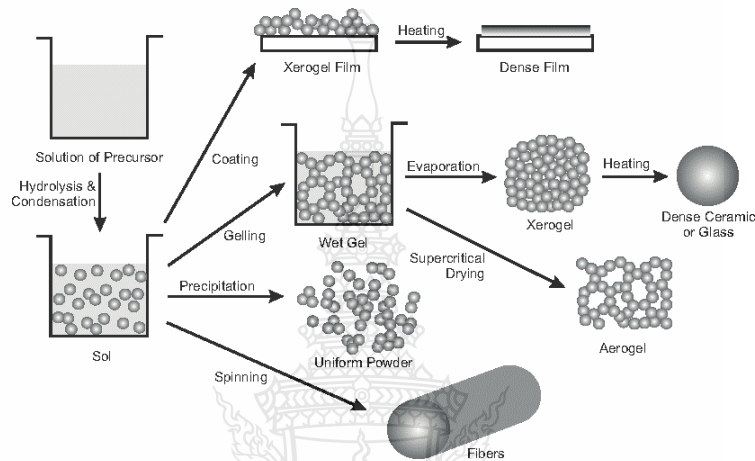
เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้ากับสารละลายและตัวรองรับ โดยมีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบเพื่อเพิ่มความหนืดแก่สารละลาย สารละลายที่ได้รับศักย์ไฟฟ้าจะถูกฉีดออกไป ทำให้เกิดเป็นเส้นที่มีขนาดเล็กซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะหรือวัสดุที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ ดังแสดงการตรึงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การตรึงด้วยไฟฟ้าแบบหมุน (Electrospinning deposition) [27]

2.3.2.6 การตรึงแบบ Sol-gel process

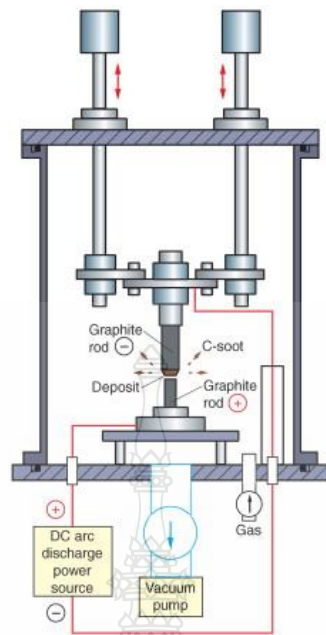
เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการนำสารละลายมาทำปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “Sol” ให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน และเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบเรียกว่า “Gel” จากนั้นนำสารที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วงไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) ดังแสดงขั้นตอนการตรึงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การตรึงแบบ Sol-gel process [28]

2.3.2.7 การตรึงแบบ Electric arc discharge process

เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เข้าไปเพื่อให้อนุภาคเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นอนุภาคที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่ที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด วิธีนี้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนผสมอยู่ ดังแสดงขั้นตอนการตรึงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การตรึงแบบ Electric arc discharge process [29]

2.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอน

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงจะทำให้เกิดการแยกแหว่งอิเล็กตรอน e^- ไปยังชั้นแถบการนำ (Conduction band; CB) กับเกิดช่องว่าง h^+ ที่แถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) ซึ่งหากไม่มีการถ่ายโอนประจุจะทำให้อิเล็กตรอน e^- ไหลมารวมกับ h^+ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า Recombination ดังนั้นเพื่อลดหรือแก้ไขปัญหาดังกล่าว และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้โดยพัฒนาสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีได้หลากหลายวิธี อาทิเช่น การเติมโลหะ [30] เช่น Pt, Fe และ Au เป็นต้น โดยให้ตำแหน่งแถบการนำ (Conduction band; CB) อยู่สูงกว่าแถบการนำ (Conduction band; CB) ของสารกึ่งตัวนำ เพื่อช่วยในส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น และการใช้สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิด ซึ่งสามารถจัดรูปแบบของกลไกได้หลากหลายเช่น p - n junctions [31], n - n junctions [32] และ Z-Scheme junctions [33] หรือ Surface Plasmon เป็นต้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิคการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขับเคลื่อนด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพสูง โดยสิ่งสำคัญในการพัฒนาเทคนิคนี้คือการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม ซึ่งได้มีการศึกษาสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่รู้จักกันดีและเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพในการแยกน้ำและกำจัดจุลินทรีย์สูงรวมทั้งมีเสถียรภาพทางเคมีสูง แต่จะตอบสนองต่อแสงในช่วงที่ Ultraviolet (UV) อย่างเดียว ซึ่งแสง UV มีปริมาณน้อยในแสงธรรมชาติ เนื่องจาก TiO_2 มีช่วง Band gap energy

ที่กว้าง [34] ดังนั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดควรพัฒนาให้สารกึ่งตัวนำดูดกลืนในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ซึ่งมีปริมาณที่มากในแสงธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีสารกึ่งตัวนำที่เราสนใจ คือ ทังสเตนออกไซด์(WO_3) และ บิสมัทวานาเดต ($BiVO_4$) จากการศึกษาสารกึ่งตัวนำทั้งสองตัวพบว่ามีช่วง Band gap energy ที่สามารถดูดกลืนในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) ซึ่งแสงในช่วงนี้จะมีอยู่ในธรรมชาติและหลุดไฟฟ้าทั่วไป นอกจากนี้แล้วสารกึ่งตัวนำดังกล่าวยังมี แถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) ที่มีศักย์ไฟฟ้าด้านลบมาก ทำให้มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดี [35] เทคนิคในการพัฒนาขั้วไฟฟ้าโดยการตรึงสารกึ่งตัวนำลงบนผิวของขั้วไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ ด้วยกัน คือ การตรึงขั้วไฟฟ้าทางกายภาพและการตรึงขั้วไฟฟ้าทางเคมี ซึ่งจากการศึกษาเราได้สนใจที่จะศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิคการตรึงขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการหมุนเคลือบ (Spin coating) การตรึงทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition) โดยเฉพาะเทคนิคการจุ่มเคลือบ (Dip-coat technique) โดยหลักการของเทคนิคนี้จะเป็นการนำขั้วไฟฟ้าไปจุ่มในสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารละลาย ซึ่งจุดเด่นของเทคนิคนี้คือเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการตรึงขั้วไฟฟ้า ราคาถูก และสามารถขยายสเกลได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดสนใจพัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยใช้สารกึ่งตัวนำ WO_3 , $BiVO_4$ และเปรียบเทียบกับ TiO_2 เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อในอุปกรณ์อาหาร โดยได้เปรียบเทียบทั้งชนิดสารกึ่งตัวนำและเทคนิคการจุ่มเคลือบสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีคุณสมบัติ โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสูงที่สุด และเหมาะที่จะพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์ต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอุปกรณ์อาหารต่อไป



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
1. บิสมัทไนเตรทเพนทาไฮเดรต (Bismuth nitrate pentahydrate; $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	Analytical reagent	Univar
2. กรดอะซิติก (acetic acid; CH_3COOH)	Analytical reagent	RCI Labscan
3. เอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	Analytical reagent	RCI Labscan
4. แอมโมเนีย (Ammonia; NH_3)	Analytical reagent	Panreac, Germany
5. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)	Analytical reagent	Univar
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)	Analytical reagent	Univar
7. วานาเดียมออกไซด์อะซิetylacetonate (Vanadium oxide acetylacetonate; $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_5\text{V}$)	Analytical reagent	Merck
8. อะซิetylaceton (Acetylaceton; $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$)	Analytical reagent Loba	Chemie

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
9. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl)	Analytical reagent	Univar
10. โซเดียมทังสเตท (Sodium tungstate; Na ₂ WO ₄)	Analytical reagent	EMSURE
11. ไทเทเนียมเตรตะโอโซเปอร์ออกไซด์ (Titanium tetraisopropoxide; C ₁₂ H ₂₈ O ₄ Ti)	Analytical reagent	EMSURE
12. เมทิลเรด (Methyl Red; C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂)	Analytical reagent	Panreac

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
1. กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped tin oxide; FTO)	-	Sigma-Aldrich
2. สายไฟลวดทองแดง (Copper wire)	-	-
3. อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy resin)	DURO 20	Pettex
4. ตู้อบ (Oven)	UN 55	Memmert
5. เตาเผา (Furnace)	-	Wisd, China
6. ตู้ดูดควัน (Hood)	-	VATIGUL

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
7. เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)	MSH-20A	Wisd
8. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner)	WUC-A02H	Wisd
9. เครื่องวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า (Multi meter)	PM3	Sanwa
10. เครื่องวัดยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)	UV-1601	SHIMADZU
11. เครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (Potentiostat)	VersaSTAT 3	Ametek
12. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)	Ag/AgCl	-
13. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode)	Pt	-
14. หลอดไฟ LED (LED lamp)	-	Panasonic
15. เครื่องวัดค่า pH (pH meter)	FG2-I	Mettler Toledo
16. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	JSM 6510	JEOL
17. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis)	RINT 200HT	Rigaku

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
18. เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray System)	-	OXFORD
20. เครื่องวิเคราะห์ ORP (Oxidation reduction potential, ORP)	ORP60	APERA

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยทำการศึกษาชนิดของสารกึ่งตัวนำ TiO_2 , WO_3 และ $BiVO_4$ ด้วยเทคนิค Dip Coating เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เชื้อจุลินทรีย์สูงสุด มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

3.2.1.1 การเตรียมสารละลายสารกึ่งตัวนำ

- การเตรียมสารละลาย $BiVO_4$

เตรียมสารละลาย $BiVO_4$ จาก 0.075 M $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ 0.9095 g ใน Acetic acid 25 ml ละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน และ 0.075 M $C_{10}H_{14}O_5V$ 0.4971 g ในสารละลาย Acetyl acetone 25 ml ละลายจนสีของสารละลายเกิดสีเขียว นำสารละลายทั้งสองผสมกัน จากนั้นนำไป Sonicate เป็นเวลา 30 นาที ก็ได้สารละลาย 0.0375 M $BiVO_4$

- การเตรียมสารละลาย WO_3

เตรียมสารละลาย 0.1 M WO_3 จาก Tungstic acid (H_2WO_4) 1.2492 g ละลายใน 30% Ammonia (NH_4OH) ปริมาตร 50 ml จากนั้นนำสารละลายไป Reflux โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (โดยจะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิและปริมาตรให้คงที่อยู่เสมอ ควบคุมปริมาตรโดยการเติม 30% Ammonia (NH_4OH) และจะต้องได้สารละลายใสไม่มีสี)

- การเตรียมสารละลาย TiO_2

เตรียมสารละลาย TiO_2 จากการผสม Ethanol 35 ml กับ Titanium traisopraoxide 1 ml และ HCl 0.5 ml นำสารละลายไป คนตลอดเวลาโดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (คอยเติม ethanol เรื่อยๆเพื่อให้ปริมาตรคงที่) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

3.2.1.2 การตรึงสารกึ่งตัวนำ

- การเตรียมแผ่นรองรับกระจกนำไฟฟ้า (FTO)

ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า FTO โดยนำกระจกนำไฟฟ้าที่มีขนาด กว้าง x ยาว เท่ากับ 2x3 เซนติเมตร แล้วไป Sonicate ในสารละลาย detergent เป็นเวลา 10 นาที NaOH เป็นเวลา 30 นาที Ethanol เป็นเวลา 10 นาที และน้ำกลั่น เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ จากนั้นทำให้แห้ง นำกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่ทำความสะอาดแล้วมาวัดค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นทำการแบ่งพื้นที่การทำงานของกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้านที่นำไฟฟ้าให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 2x2 เซนติเมตร

- การตรึงสารกึ่งตัวนำบนแผ่นรองรับกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ

1) การตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO_4

นำกระจก FTO ที่ทำความสะอาดและแห้งสนิทแล้วนั้น ไปจุ่มลงในสารละลาย BiVO_4 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก็จะได้ชั้นไฟฟ้า FTO/ BiVO_4

2) การตรึงสารกึ่งตัวนำ WO_3

นำกระจก FTO ที่ทำความสะอาดและแห้งสนิทแล้วนั้น ไปจุ่มลงในสารละลาย WO_3 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก็จะได้ชั้นไฟฟ้า FTO/ WO_3

3) การตรึงสารกึ่งตัวนำ TiO_2

นำกระจก FTO ที่ทำความสะอาดและแห้งสนิทแล้วนั้น ไปจุ่มลงในสารละลาย TiO_2 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก็จะได้ชั้นไฟฟ้า FTO/ TiO_2

จากนั้นนำชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมาวัดค่าการนำไฟฟ้าแล้วนั้นนำส่วนที่เหลือต่อชั้นไฟฟ้ากับสายไฟและเคลือบทับด้วย Epoxy resin รोजनแห้ง ศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกของชั้นไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า โดยทำการศึกษาในสภาวะให้แสงและไม่ให้แสง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 1.0 V เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ โดยการพิจารณาค่ากระแสที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำภายใต้สภาวะที่มีแสงกระตุ้น (Photocurrent) เพื่อเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ดีที่สุด สำหรับการศึกษาผลของเทคนิคการตรึงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนชั้นไฟฟ้า โดยศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิค Dip Coating, Spin coating และ Electrodeposition และพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.2.1.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄

ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ใช้วิธีการตรึง BiVO₄ ด้วยเทคนิค Dip Coating, Spin coating และ Electrodeposition มีขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้างดังต่อไปนี้

- การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการตรึงแบบจุ่ม (Dip coating technique)

นำกระจกนำไฟฟ้า FTO มาจุ่ม ในสารละลาย 0.0375 M BiVO₄ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มาวัดค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นนำส่วนที่เหลือต่อขั้วไฟฟ้ากับสายไฟและเคลือบทับด้วย Epoxy resin รอจนแห้ง จะได้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄

- การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการตรึงแบบการหมุนเหวี่ยง (Spin coating technique)

เตรียมสารละลาย BiVO₄ จาก 0.075 M Bi(NO₃)₃·5H₂O 0.9095 g ใน Acetic acid 25 ml ละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน และ 0.075 M C₁₀H₁₄O₅V 0.4971 g ในสารละลาย Acetyl acetone 25 ml ละลายจนสีของสารละลายเกิดสีเขียว นำสารละลายทั้งสองผสมกัน จากนั้นนำไป Sonicate เป็นเวลา 30 นาที ก็ได้สารละลาย 0.0375 M BiVO₄ นำกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่ทำความสะอาดแล้ว หยดสารละลาย 0.0375 M BiVO₄ แล้วตรึงด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 1,000 rpm เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มาต่อขั้วไฟฟ้ากับสายไฟและเคลือบทับด้วย Epoxy resin รอจนแห้ง จะได้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄

- การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการตรึงทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition)

เตรียมสารละลาย BiVO₄ จาก 10mM Bi(NO₃)₃·5H₂O 0.2854 g ใน 10 ml ของสารละลาย 35mM VO(SO₄)_xH₂O 0.2425 g ปรับ pH ด้วยกรดไนตริก จนได้ pH <0.5 คนจนสารละลายจนหมด ปรับ pH ต่อด้วย 2 M CH₃COONa ให้ได้ pH 5.1 แล้วหยดไนตริกให้ได้ pH 4.7 สุดท้ายเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 50 ml จะได้สารละลายสีฟ้าอมเขียว นำกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่ทำความสะอาดแล้วมาวัดค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นทำการแบ่งพื้นที่การทำงานของกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้านที่นำไฟฟ้าให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 2x2 เซนติเมตร จากนั้นนำส่วนที่เหลือต่อขั้วไฟฟ้ากับสายไฟแล้วเคลือบทับด้วย Epoxy resin รอจนแห้ง นำขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับสายไฟไปตรึงกับสารละลาย BiVO₄ ที่เตรียมไว้ โดยใช้เทคนิค amperometry ด้วยเครื่อง potentiostat ใช้กระจกนำไฟฟ้า FTO เป็นขั้วทำงาน (Working electrode) ใช้ขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และใช้ขั้วไฟฟ้า Pt เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าที่

+1.9 V พร้อมควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 35-40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄

3.2.2 ศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic properties) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้

ศึกษาคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ โดยจะใช้เทคนิคหรือเครื่องมือที่เหมาะสมในการตรวจสอบวัด ดังนี้

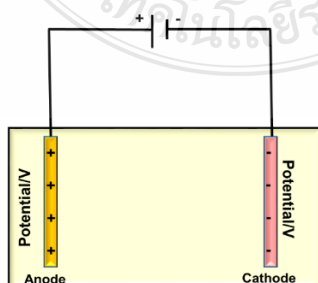
ตารางที่ 3.1 ศึกษาคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้

คุณลักษณะ	เทคนิคหรือเครื่องมือ
- ศึกษาสมบัติทางแสง	- UV-Vis spectrophotometer
- ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำ	- Potentiostat (Amperometry)
- ศึกษาความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าในการส่งผ่านอิเล็กตรอน	- Potentiostat (EIS)
- ศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา	- Scanning Electron Microscopy (SEM)
- ศึกษาโครงสร้างผลึก	- X-ray diffraction spectrophotometer (XRD)
- องค์ประกอบทางเคมี	- Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX)

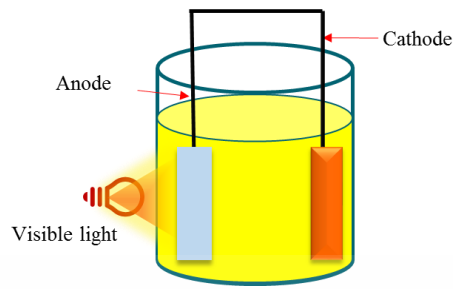
3.2.3 ศึกษากลไกการเร่งปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

เมื่อได้ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสภาวะต่างๆที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดแล้ว นำมาทำการศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ดังต่อไปนี้

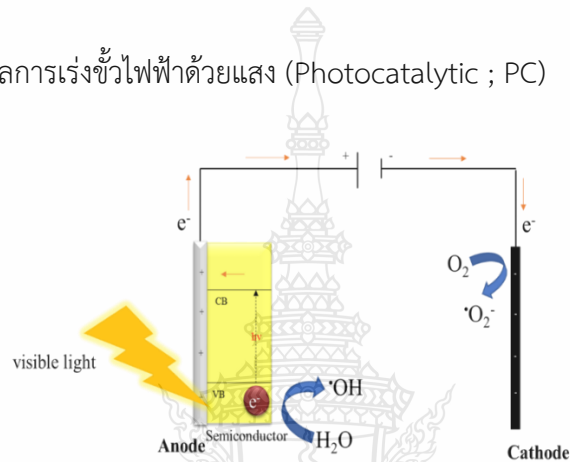
- การเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic ; EC)
- การเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยแสง (Photocatalytic ; PC)
- การเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalytic ; PEC)



รูปที่ 3.1 ศึกษากลไกการเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้า (Electrocatalytic ; EC)



รูปที่ 3.2 ศึกษาการไกลการเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยแสง (Photocatalytic ; PC)

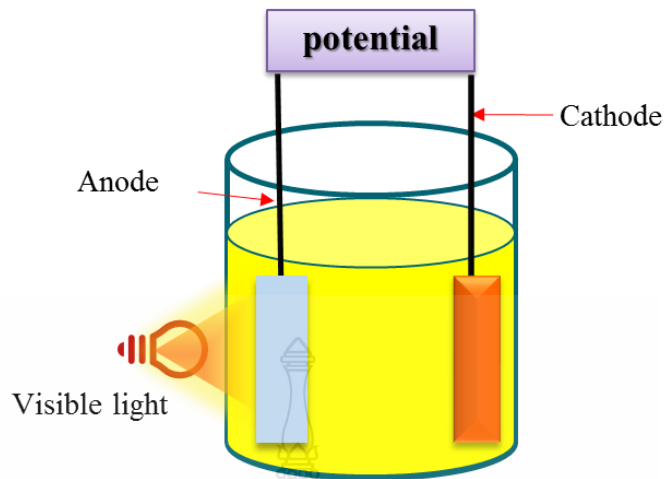


รูปที่ 3.3 ศึกษาการไกลการเร่งด้วยไฟฟ้าด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า (Photoelectrocatalytic ; PEC)

3.2.4 ศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli*

ศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli* โดยใช้ไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ ภายใต้กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่อไปนี้

- ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ
- ผลของความเข้มแสงที่ให้แก่ระบบ
- กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในระบบ
- เปรียบเทียบผลของขั้วไฟฟ้าแคโทดของขั้วไฟฟ้า สแตนเลสสตีล(SS), ทองแดง (Cu), ทองเหลือง (Brass), สังกะสี (Zn)

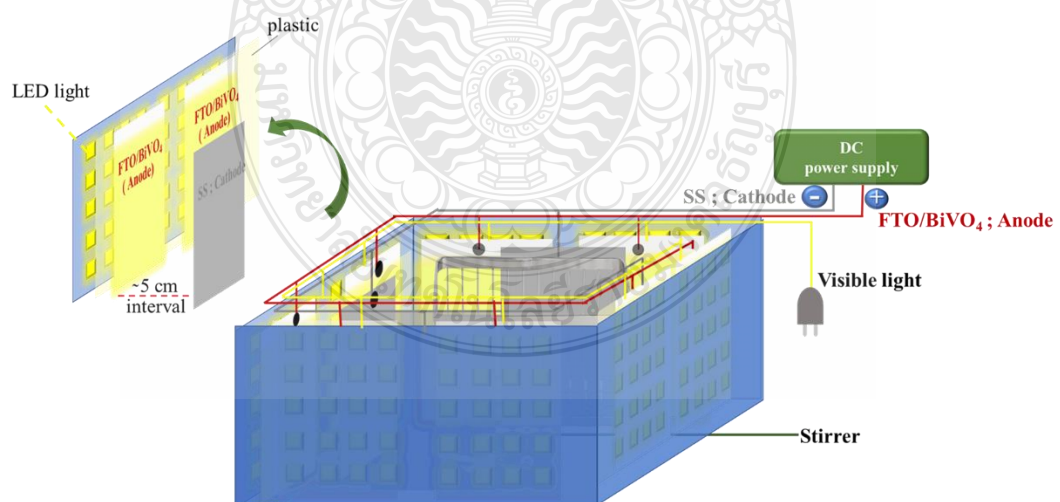


รูปที่ 3.4 การกำจัดเชื้อ *E. coli* ภายใต้กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

3.2.5 ศึกษาและออกแบบเซลล์ต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อ *E. coli*

ทำการออกแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก เพื่อใช้เป็นเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้า สำหรับกำจัดเชื้อในอุปกรณ์อาหาร ซึ่งจะศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆต่อไปนี้

- การวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะการนำสารเข้าสู่เซลล์
- ผลของความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ (ความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่ตรวจได้)
- อายุการใช้งาน



รูปที่ 3.5 การจัดอุปกรณ์เซลล์ต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อ *E. coli* ภายใต้กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

ในการศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ทำการตรวจสอบการลดลงของเชื้อ *E. coli* โดยการติดตามผลการกำจัดทุกๆ 10 นาที และนำเชื้อหลังการกำจัดไป drop plate บนอาหารแข็ง Eosin-methylene blue agar (EMB) และทำการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ 37 °C เพื่อให้เชื้อมีการเจริญเติบโต กลายเป็นโคโลนีที่สามารถนับได้และนำมาวิเคราะห์



บทที่ 4

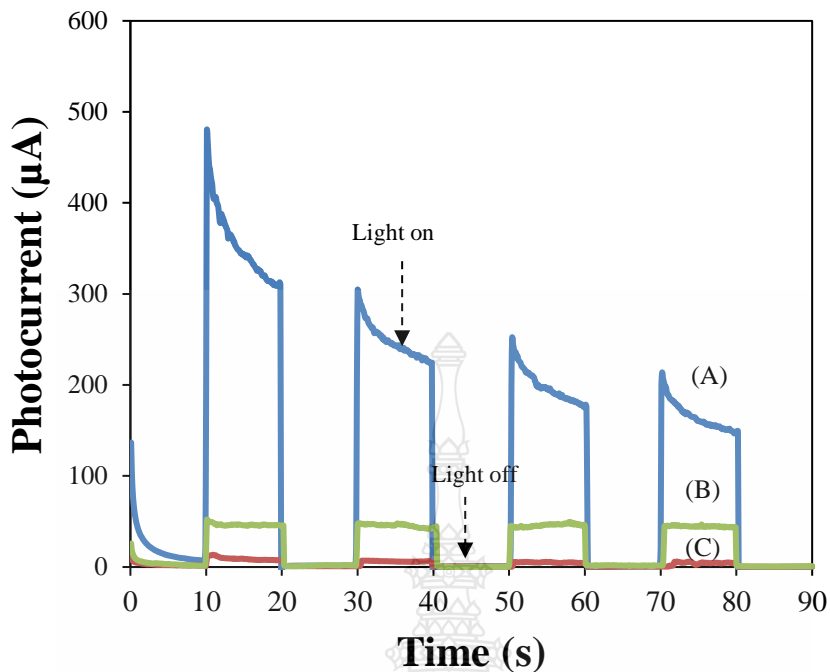
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำบิสมัทวานาเดต (Bismuth vanadate, BiVO_4) ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติลงบนวัสดุรองรับกระจกนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดปทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide, FTO) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นไฟฟ้าแอโนดสำหรับการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำภายใต้สภาวะที่มีแสงช่วงตามองเห็น โดยได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/ BiVO_4 และได้ศึกษาคุณลักษณะต่างๆของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ BiVO_4 บนชั้นไฟฟ้า FTO/ BiVO_4 ที่เตรียมได้ เช่น สมบัติการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV/vis spectrophotometer ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ศึกษาโครงสร้างผลึก ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) และ สมบัติความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเครื่อง Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) รวมทั้งศึกษากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ชั้นไฟฟ้า สมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ และสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยได้ลำดับผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาชนิดของสารกึ่งตัวนำ

4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

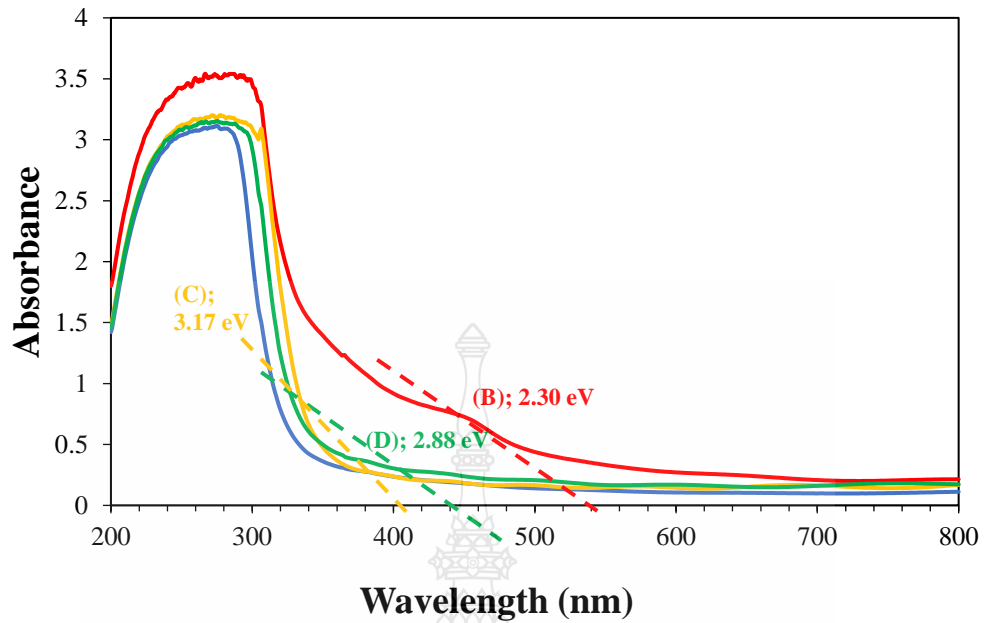
จากการศึกษาการวิจัยได้ทำการตรึงสารกึ่งตัวนำ WO_3 , TiO_2 และ BiVO_4 ลงบนกระจก FTO ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ (Manual) และศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ โดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรี ภายใต้การควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.0 V โดยใช้ชั้นไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl และ Pt เป็นชั้นไฟฟ้าช่วย ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl เป็นเวลา 90 วินาที โดยเปิดปิดแสงทุกๆ 10 วินาที เพื่อการตอบสนองของชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด ในสภาวะที่ให้แสงและไม่ให้แสง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 พบว่าการตรึง BiVO_4 ลงบน กระจก FTO สามารถให้ค่ากระแสจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ WO_3 และ TiO_2 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลการศึกษามีความชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงเพื่อยืนยันผลการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า



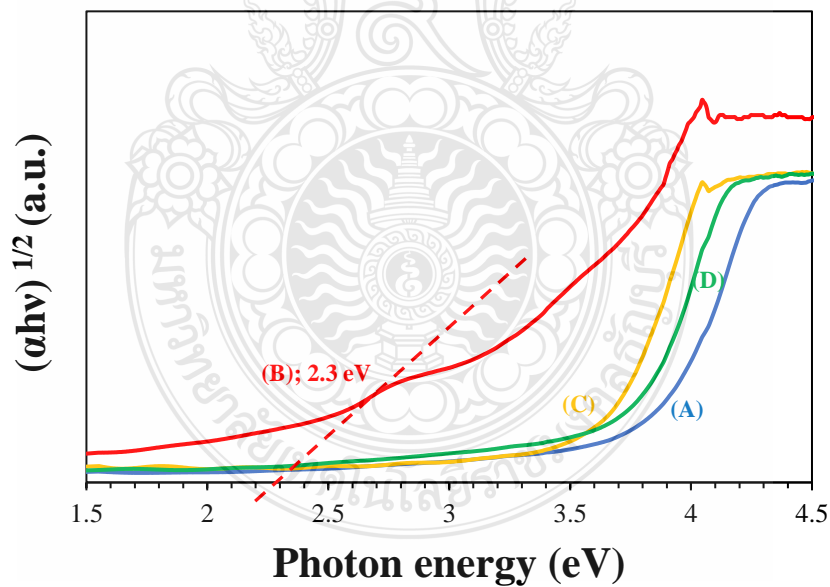
รูปที่ 4.1 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำด้วยขั้วไฟฟ้า (A) FTO/BiVO₄, (B) FTO/WO₃ และ (D) FTO/TiO₂ ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็น ในสารละลาย 0.5M NaCl ที่ ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

เทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกเป็นเทคนิคที่ทำงานร่วมกันระหว่างแสงและศักย์ไฟฟ้า การตอบสนองต่อแสงของขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำจึงมีความสำคัญอย่างมาก รูปที่ 4.2 แสดงสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO เปล่า, FTO/BiVO₄, FTO/TiO₂, และ FTO/WO₃ เริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 360 nm, 520 nm, 390 nm, และ 430 nm ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) [36] จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 3.44 eV, 2.3 eV, 3.17 eV, และ 2.88 eV ตามลำดับ และรูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ได้เท่ากับ 2.3 eV และยืนยันความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้มากกว่าขั้วไฟฟ้า FTO/TiO₂, และ FTO/WO₃ เนื่องจากขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มีค่าพลังงานแถบ (E_g) ที่แคบกว่า จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ซึ่งผลสอดคล้องกับสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของ (A) FTO, (B) FTO/BiVO₄ (C) FTO/TiO₂ และ (D) FTO/WO₃ โดยเตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบ (manual) ที่อุณหภูมิการเผาขี้ไฟฟ้า 550 °C

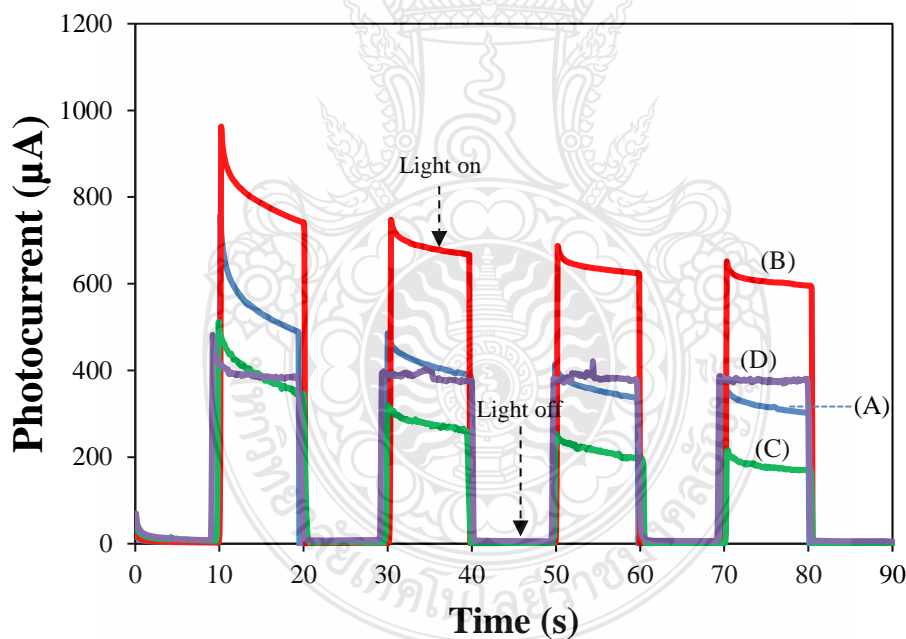


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขี้ไฟฟ้า (A) FTO , (B) FTO/BiVO₄ (C) FTO/TiO₂ และ (D) FTO/WO₃ โดยเตรียมด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบ (manual) ที่อุณหภูมิการเผาขี้ไฟฟ้า 550 °C

4.2 ผลการศึกษาเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

จากการศึกษาค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ จากการตรึงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค Dip Coating (Manual), Dip Coating (Machine), Spin coating และ Electrodeposition ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็นและศักย์ไฟฟ้าที่ 1.0 V vs. Ag/AgCl พบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) สามารถตอบสนองต่อแสงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำได้ดีกว่าการเตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating (Manual), Spin coating และ Electrodeposition แสดงดังรูปที่ 4.4 จากผลการศึกษาสามารถยืนยันได้ว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ จากการเตรียมได้ด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) จึงสนใจพัฒนาวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) ในการศึกษาต่อไป



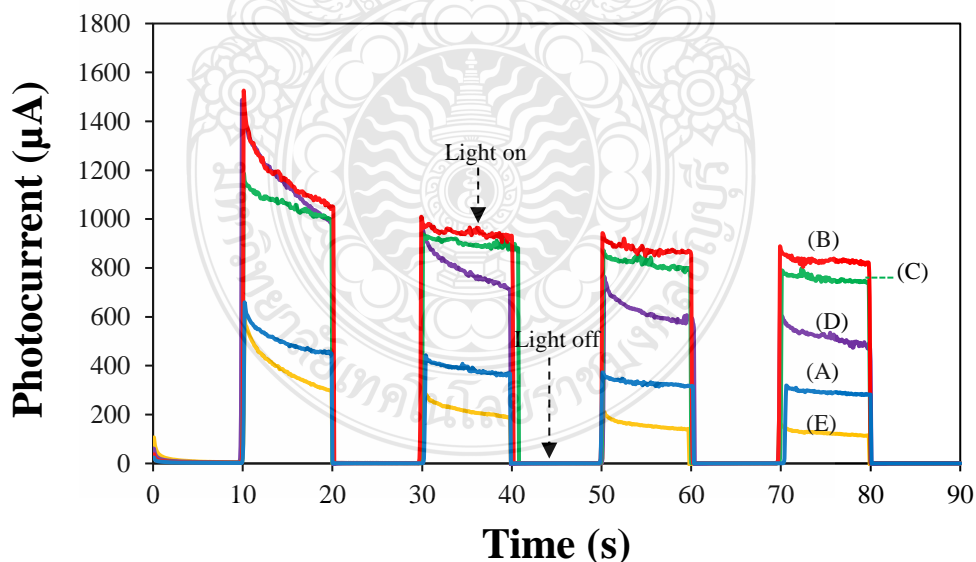
รูปที่ 4.4 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำด้วยวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า (A) dip coating method [manual], (B) dip coating method [machine] (C) spin coating method and (D) electrochemical deposition ที่อุณหภูมิในการเผาขั้วไฟฟ้า 550 °C

4.3 การศึกษาสภาวะต่างๆในการตรึงชีวไฟฟ้า BiVO_4 ด้วยเทคนิค dip coating method [machine]

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย BiVO_4

4.3.1.1 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

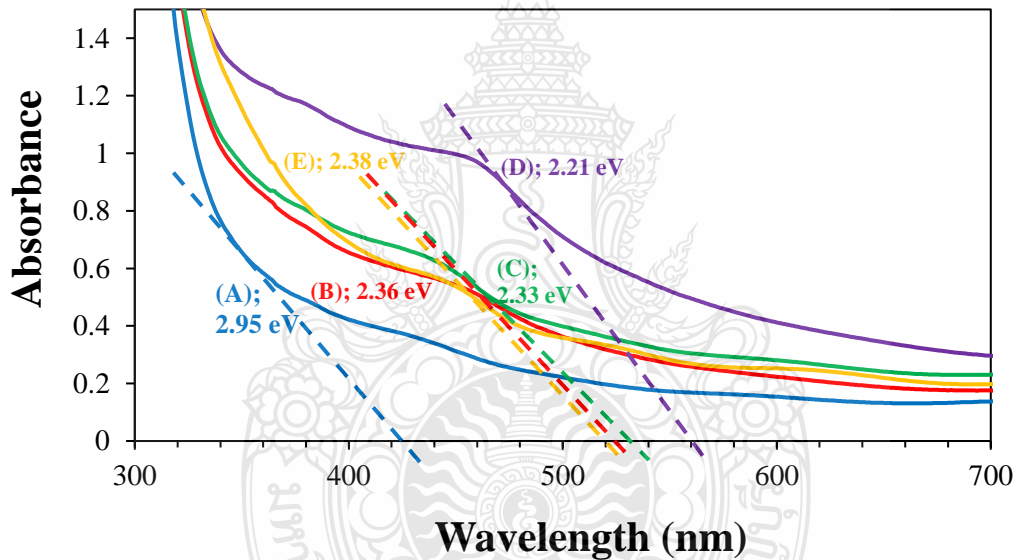
จากการศึกษาค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO_4 ที่เตรียมได้จากความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต) 0.0250 M, 0.0375 M, 0.0500 M, 0.0750 M, และ 0.1000 M ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต) 0.0375 M สามารถเตรียมชีวไฟฟ้า FTO/BiVO_4 ที่ให้ค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำได้มากที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต) ส่งผลให้ค่ากระแสที่ได้ลดลงตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้ผิวหน้าของชีวไฟฟ้ามีการเกาะติดของสารละลายบิสมัทวานาเดตมากเกินไปทำให้ฟิล์มบางบิสมัทวานาเดตมีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งผลสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO_4 เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จึงทำให้มีผลต่อการส่งผ่านอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต) ที่เหมาะสมในการเตรียมชีวไฟฟ้า FTO/BiVO_4 ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] คือความเข้มข้นที่ 0.0375 M



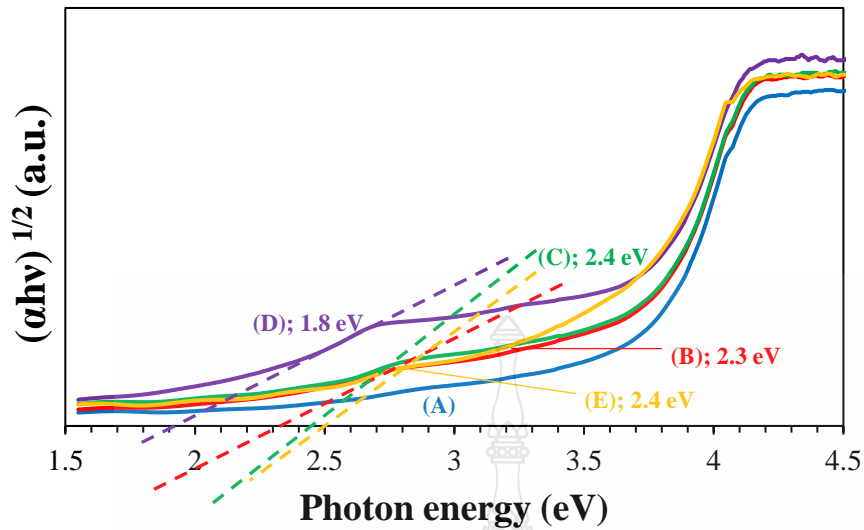
รูปที่ 4.5 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ (A) 0.0250 M, (B) 0.0375 M, (C) 0.0500 M, (D) 0.0750 M, และ (E) 0.1000 M ของสารละลาย BiVO_4 ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

4.3.1.2 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น(บิสมัทวานาเดต) 0.0250 M, 0.0375 M, 0.0500 M, 0.0750 M, และ 0.1000 M ตามลำดับ จากผลพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น(บิสมัทวานาเดต) เพิ่มขึ้นการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น และเมื่อคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 2.95 eV, 2.36 eV, 2.33 eV, 2.38 eV, และ 2.21 eV ตามลำดับ ดังแสดงใน รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จากข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้ที่สภาวะต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น(บิสมัทวานาเดต)มากขึ้นจะเห็นลักษณะการยกตัวของกราฟการดูดกลืนแสง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าจึงอาจส่งผลต่อคุณสมบัติการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น(บิสมัทวานาเดต)ที่เหมาะสม มีผลต่อคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้



รูปที่ 4.6 การดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต)ต่างๆ คือ (A) 0.0250 M, (B) 0.0375 M, (C) 0.0500 M, (D) 0.0750 M, และ (E) 0.1000 M

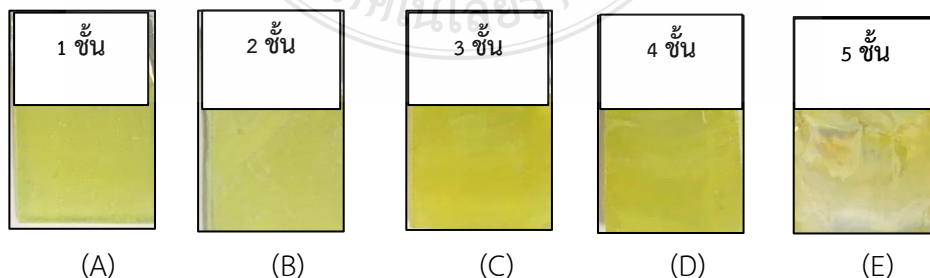


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (บิสมัทวานาเดต) ต่างๆ คือ (A) 0.0250 M, (B) 0.0375 M, (C) 0.0500 M, (D) 0.0750 M, และ (E) 0.1000 M

4.3.2 ผลของจำนวนชั้นของ BiVO₄

4.3.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า

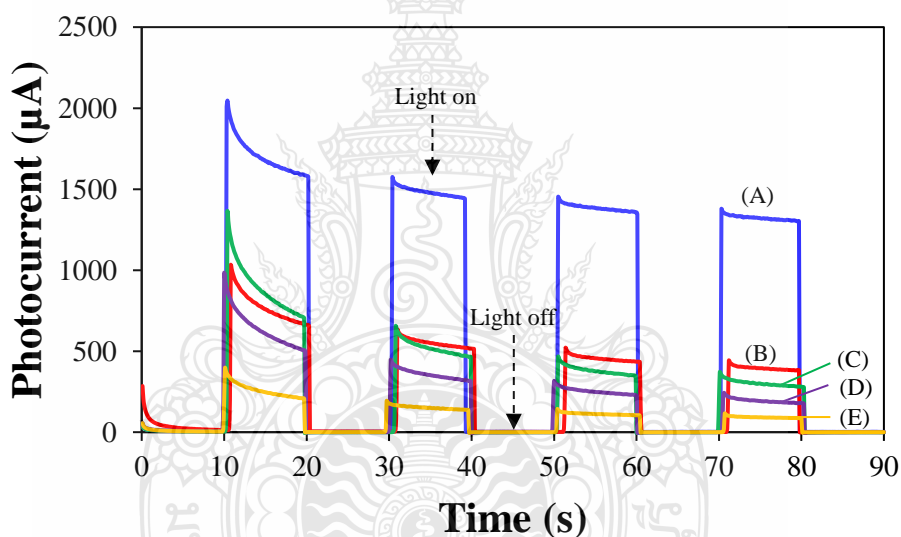
ในการเตรียมฟิล์มบาง BiVO₄ จำนวนชั้นในการตรึงมีผลต่อประสิทธิภาพและสมบัติโฟโตคะตะไลติก ได้ทำการศึกษาผลของจำนวนชั้นของ BiVO₄ ที่ 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั้น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 พบว่าการตรึงชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ยิ่งจำนวนชั้นในการตรึงเพิ่มขึ้นสีของฟิล์ม BiVO₄ ยิ่งเข้มขึ้น แสดงให้เห็นถึงปริมาณและความหนาของ BiVO₄ ที่มากขึ้นบนผิวหน้าชีวไฟฟ้า โดยการตรึงชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ 1 ชั้น พบว่าฟิล์มบาง BiVO₄ มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพจำนวนชั้นที่เหมาะสมของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] จึงเลือกที่ 1 ชั้น ในการศึกษาคุณสมบัติทางโฟโตคะตะไลติก สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำต่อไป



รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่จำนวนชั้นในการตรึงที่ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น

4.3.2.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

จากผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ โดยทำการศึกษาค่ากระแสของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ พบว่าที่ เมื่อจำนวนชั้นในการตรึงของ BiVO₄ เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากระแสที่ได้ลดลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความหนาของฟิล์มมีผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เมื่อฟิล์มมีความหนาเกินไปส่งผลต่อการผ่านได้ของแสงและ ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ไม่ดี ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลง แสดงให้เห็นว่าความหนาของฟิล์มมีผลต่อสมบัติการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกจำนวนชั้นที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] คือที่ 1 ชั้น

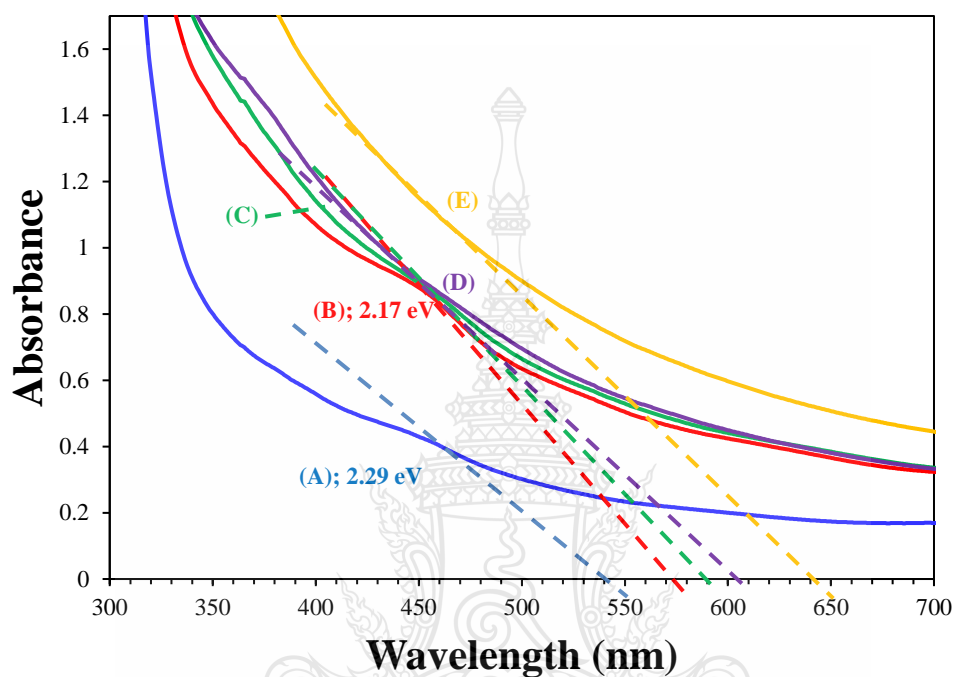


รูปที่ 4.9 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำ ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่จำนวนชั้นในการตรึงที่ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

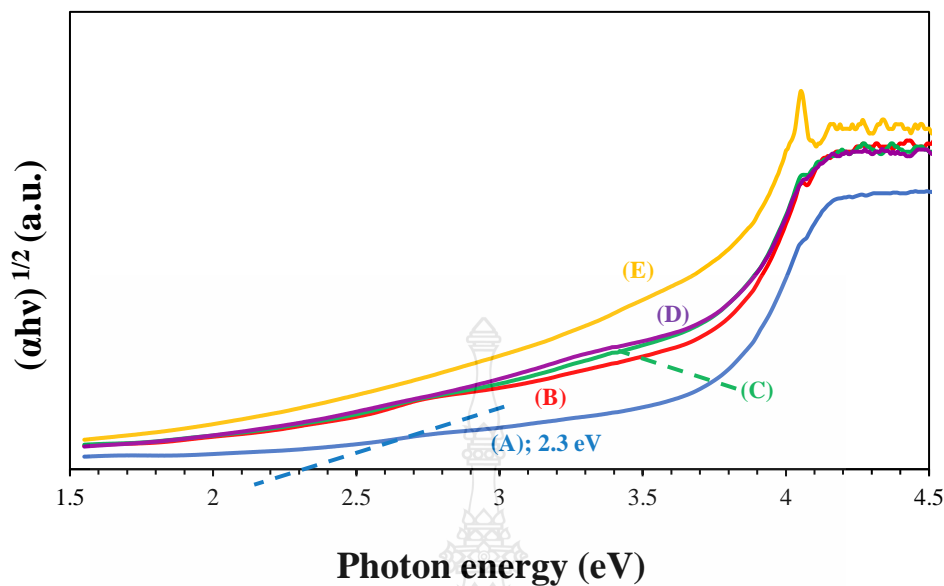
4.3.2.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลาย 0.0375 M โดยเปรียบเทียบจำนวนชั้นในการตรึงที่ 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั้น จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อจำนวนชั้นของสารละลายตั้งต้น(บิสมัทวานาเดต) มีผลโดยตรงกับสมบัติการดูดกลืนแสง และเมื่อคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 2.29 eV, 2.17 eV, 2.10 eV, 2.05 eV, และ 1.93 eV ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 และ

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยการตรึงด้วยสารละลายตั้งต้น(บิสมัท วานาเดต) จำนวน 1 ชั้น ให้ค่าพลังงานแถบ เท่ากับ 2.3 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานแถบของ BiVO₄ [37] สามารถยืนยันการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็นได้ที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าแอโนด FTO/BiVO₄ และส่งผลต่อคุณสมบัติโฟโตคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ดี



รูปที่ 4.10 การดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ตรึงด้วยจำนวนชั้นต่างๆ คือ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น

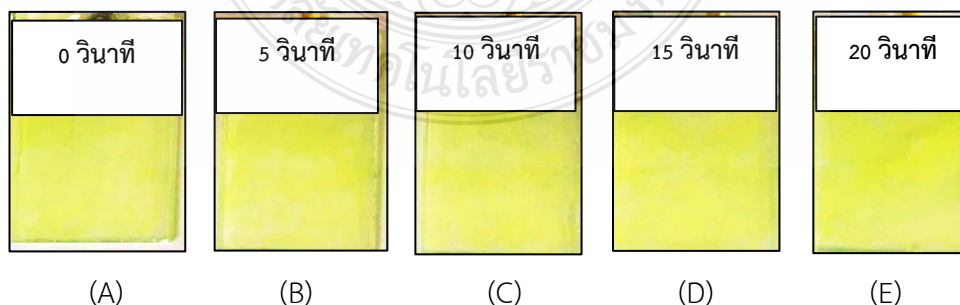


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยจำนวนชั้นต่างๆ คือ คือ (A) 1, (B) 2, (C) 3, (D) 4, และ (E) 5 ชั้น

4.3.3 ผลของระยะเวลาในการจุ่มสารละลาย

4.3.3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า

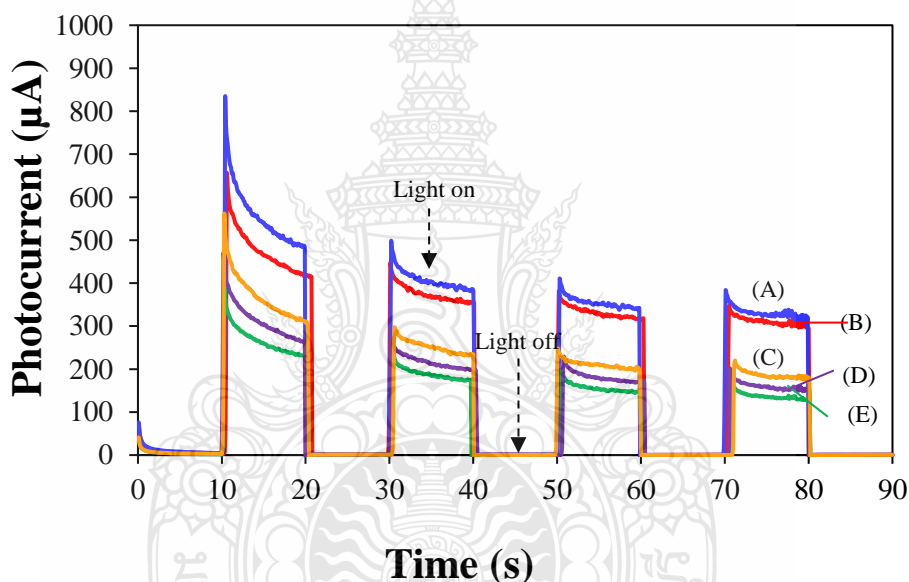
การเตรียมฟิล์มบาง BiVO₄ ได้ทำการศึกษาระยะเวลาในการจุ่มสารละลาย บิสมัทวานาเดต ที่ 0, 5, 10, 15, และ 20 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 พบว่าการตรึงชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ยิ่งเวลาในการจุ่มเพิ่มขึ้นสีของฟิล์ม BiVO₄ ยิ่งเข้มขึ้น โดยการตรึงชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ 0 วินาที (ไม่มีการแช่ชีวไฟฟ้าในสารละลาย) พบว่าฟิล์มบาง BiVO₄ มีความบางและสม่ำเสมอของผิวหน้าชีวไฟฟ้ามากที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพระยะเวลาในการจุ่มบิสมัทวานาเดตที่เหมาะสมของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] ที่ 0 วินาที ในการศึกษาคุณสมบัติทางโฟโตคะตะไลติกสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำต่อไป



รูปที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มที่ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที

4.3.3.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

จากผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำจากรูปที่ 4.13 แสดงค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ พบว่าระยะเวลาในการจุ่มสารละลายบิสมัทวานาเดตเพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสที่ได้จะลดลง แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการจุ่มมีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ซึ่งอาจเกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการจุ่มนานขึ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการจุ่มขั้วไฟฟ้า FTO ลงในสารละลายบิสมัทวานาเดต คือที่ 0 วินาที (ไม่แช่ขั้วไฟฟ้าในสารละลายจุ่มแล้วตั้งขึ้นเลย) ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] ซึ่งทำให้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

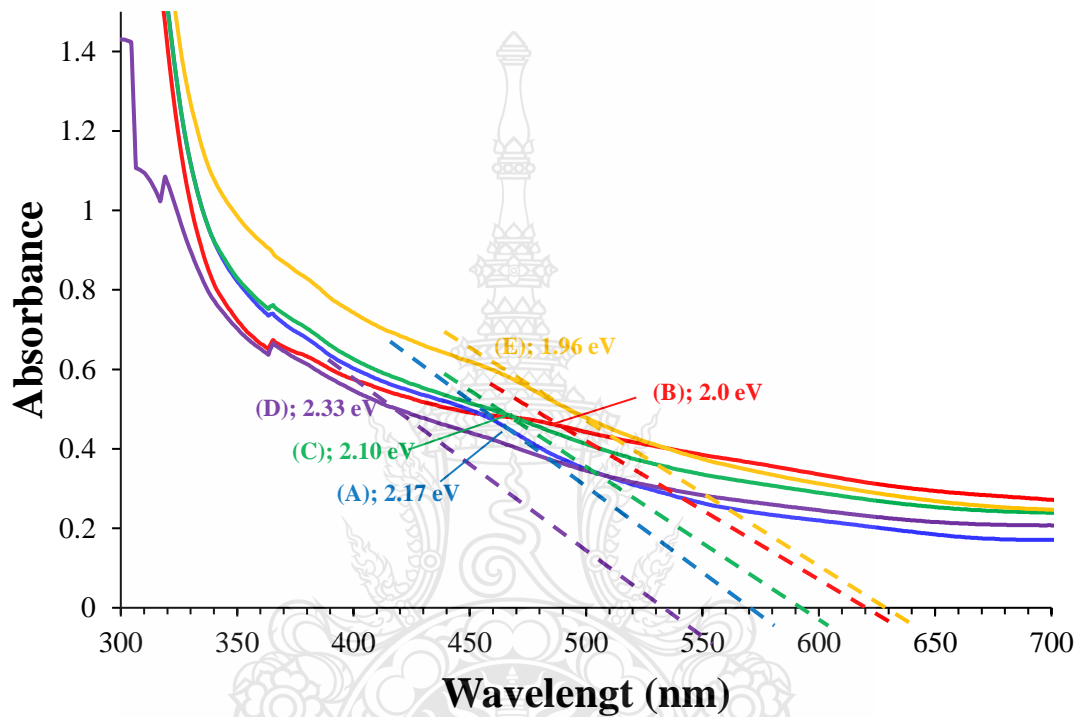


รูปที่ 4.13 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มที่ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็นในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

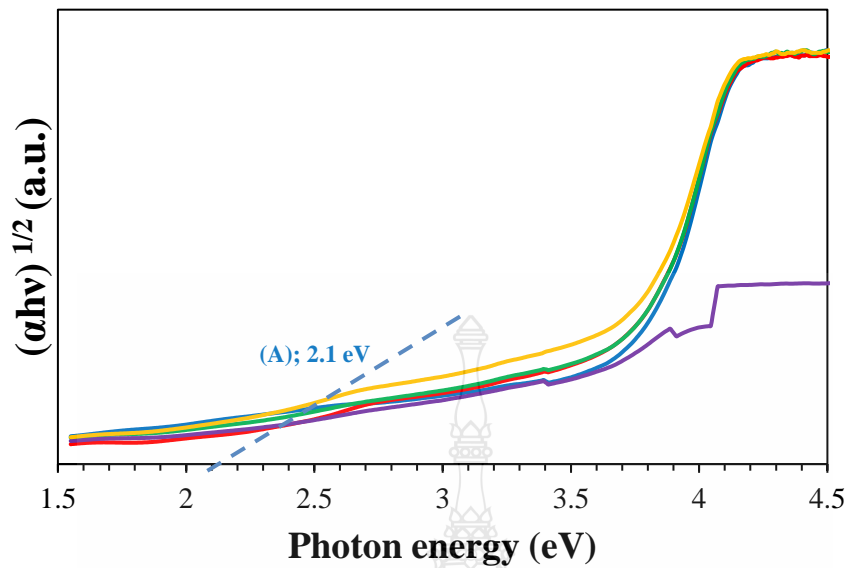
4.3.3.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากการศึกษาการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยระยะเวลาในการจุ่มที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 14.4 พบว่าที่ระยะเวลาจุ่ม 0, 5, 10, 15, และ 20 วินาที เริ่มดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น 570, 620, 590, 530, และ 630 nm ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 2.17 eV, 2.0 eV, 2.10 eV, 2.33 eV และ 1.96 eV ตามลำดับ เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าแอโนด ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ได้ค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า

FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มที่ 0 วินาที ได้เท่ากับ 2.1 eV โดยจะสังเกตจากช่วงของกราฟปรากฏความชันเพื่อใช้ในการคำนวณค่า E_g ดังกล่าวได้อย่างชัดเจนที่สุด สามารถยืนยันถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมของช่วงเวลาในการจุ่มแช่เพื่อให้ได้ลักษณะฟิล์มบางของ BiVO₄ ที่เหมาะสมในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าแอโนด FTO/BiVO₄ และทำให้มีคุณสมบัติโฟโตคะตะไลติกที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ



รูปที่ 4.14 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มต่างๆ คือ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที

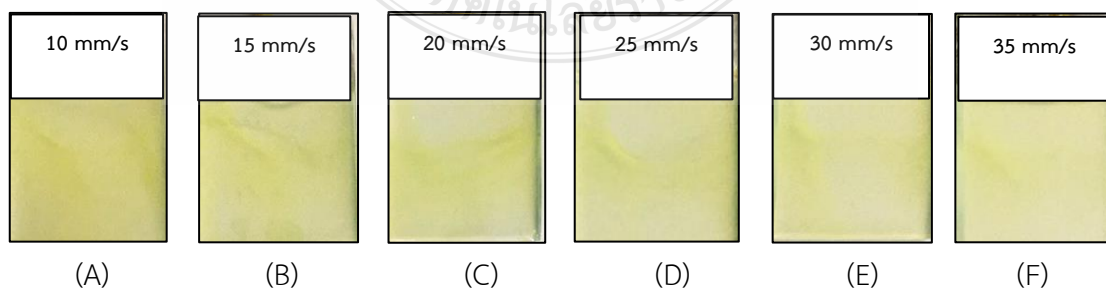


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ระยะเวลาในการจุ่มต่างๆ คือ (A) 0, (B) 5, (C) 10, (D) 15, และ (E) 20 วินาที

4.3.4 ผลของอัตราเร็วในการจุ่มลง

4.3.4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า

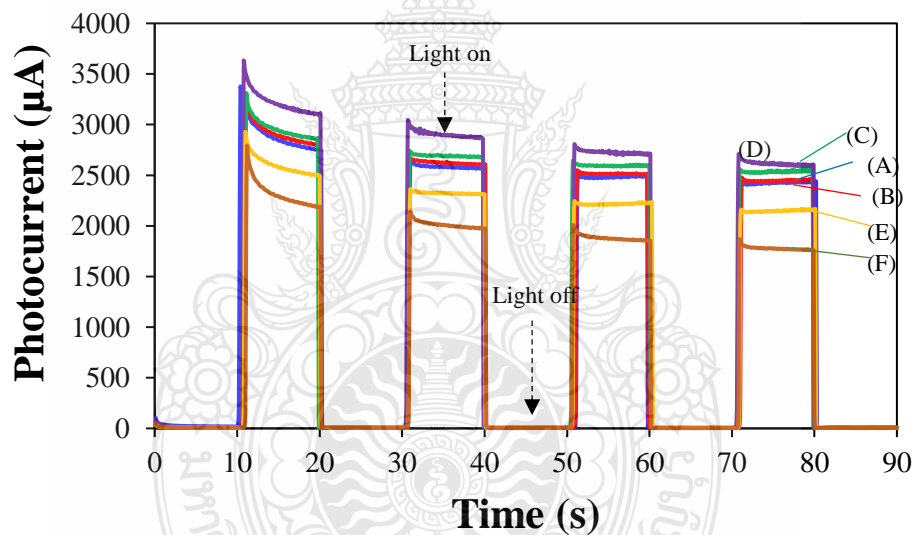
ในการเตรียมฟิล์มบาง BiVO₄ ได้ทำการศึกษาอัตราเร็วในการจุ่มลงของ FTO ในสารละลายบิสมาทวานาเดต ที่อัตราเร็วในการจุ่มลงของชีวไฟฟ้า FTO ที่ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s จากรูปที่ 4.16 พบว่าการตรึงชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ยิ่งอัตราเร็วในการจุ่มลงเพิ่มขึ้นลักษณะสีของฟิล์ม BiVO₄ ค่อยๆจางลง ซึ่งเกิดจากระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายตั้งต้นบิสมาทวานาเดตของชีวไฟฟาลดลงเมื่อความเร็วในการจุ่มมากขึ้นทำให้มีสารกึ่งตัวนำบิสมาทวานาเดตมาเกาะที่ผิวหน้าชีวไฟฟ้าน้อยลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้พิจารณาสถานะที่เหมาะสมจากค่ากระแสจากชีวไฟฟ้าที่เตรียมได้ จึงศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำต่อไป



รูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s

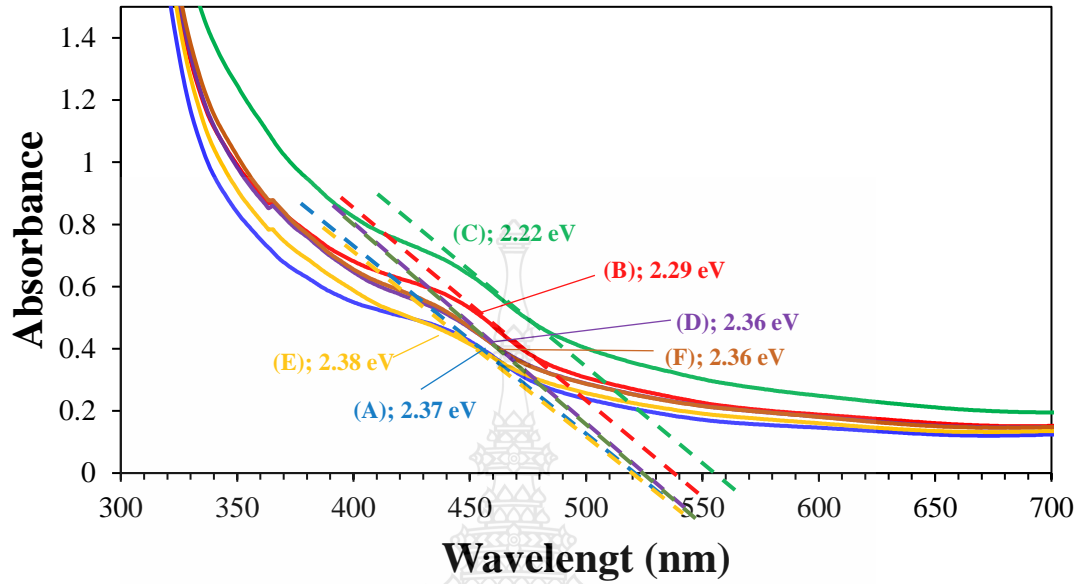
4.3.4.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

จากผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าอัตราเร็วในการจุ่มลงของขั้วไฟฟ้า FTO ลงในสารละลายบิสมัทวานาเดตเพิ่มมากขึ้นจาก 10 – 25 mm/s ค่ากระแสที่ได้จะเพิ่มขึ้น และที่อัตราเร็วมากกว่า 25 mm/s คือ ที่อัตราเร็ว 30 – 35 mm/s ค่ากระแสลดลง จากรูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพข้างต้นของฟิล์มมีความบางเกินไป ทำให้ส่งผลต่อการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากชั้นสารกึ่งตัวนำไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลง แสดงให้เห็นอัตราเร็วในการจุ่มลงมีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ดังนั้นอัตราเร็วในการจุ่มลงที่เหมาะสมที่สุดในการจุ่มขั้วไฟฟ้า FTO ลงในสารละลายบิสมัทวานาเดต คือที่ 25 mm/s ด้วยเทคนิค dip coating method [machine]

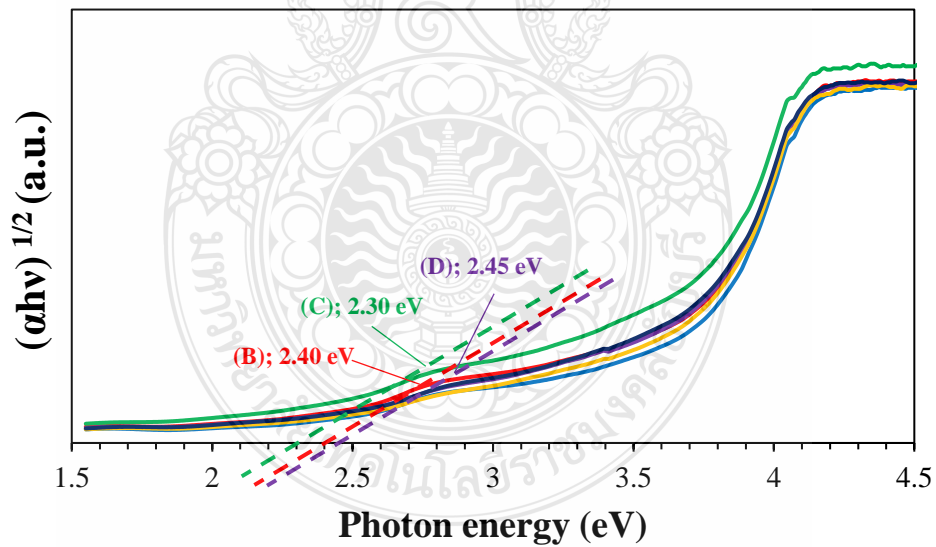


รูปที่ 4.17 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

4.3.4.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง



รูปที่ 4.18 การดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s



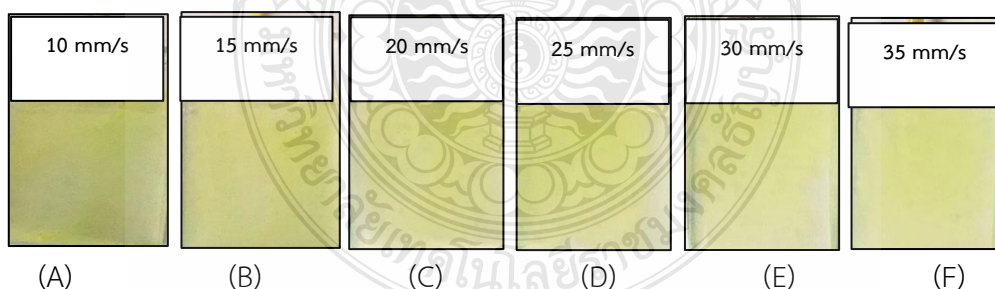
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการจุ่มลง คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s

จากรูปที่ 4.18 แสดงสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยอัตราเร็วในการจุ่มลงที่ต่างกัน คือ ที่ 10, 15, 20, 25, 30, และ 35 mm/s ตามลำดับ พบว่าสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ 500 – 600 nm เป็นต้นไป เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 2.37 eV, 2.29 eV, 2.22 eV, 2.36 eV, 2.38 และ 2.36 eV ตามลำดับ เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าแอโนด ดังแสดงในภาพที่ 4.19 ได้ค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมที่สภาวะอัตราเร็วในการจุ่มลงที่ 15, 20, และ 25 mm/s ตามลำดับ ซึ่งมีความชัดเจนมากที่สุดในการคำนวณหา E_g ได้เท่ากับ 2.40 eV, 2.30 eV, และ 2.45 eV ตามลำดับ จากสมบัติการดูดกลืนแสงดังกล่าวยืนยันได้ว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้ สามารถยืนยันสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้เป็นอย่างดี

4.3.5 ผลของอัตราเร็วในการดิ่งขึ้น

4.3.5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาอัตราเร็วในการดิ่งขึ้นของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] ที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้นของขั้วไฟฟ้า ที่ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อตรึงขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้นเพิ่มขึ้นลักษณะสีของฟิล์ม BiVO₄ ค่อยๆจางลงฟิล์มมีความบาง และมีความสม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองคล้ายกับปัจจัยอัตราเร็วในการจุ่มลง คือ เมื่อความเร็วมากขึ้นทำให้ขั้วไฟฟ้ามีระยะเวลาสัมผัสกับสารที่ต้องการตรึงน้อยจึงเกิดฟิล์มสารกึ่งตัวนำเกาะติดที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยลง อย่างไรก็ตามเพื่อผลการศึกษาที่มีความชัดเจนขึ้น จึงศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำต่อไป

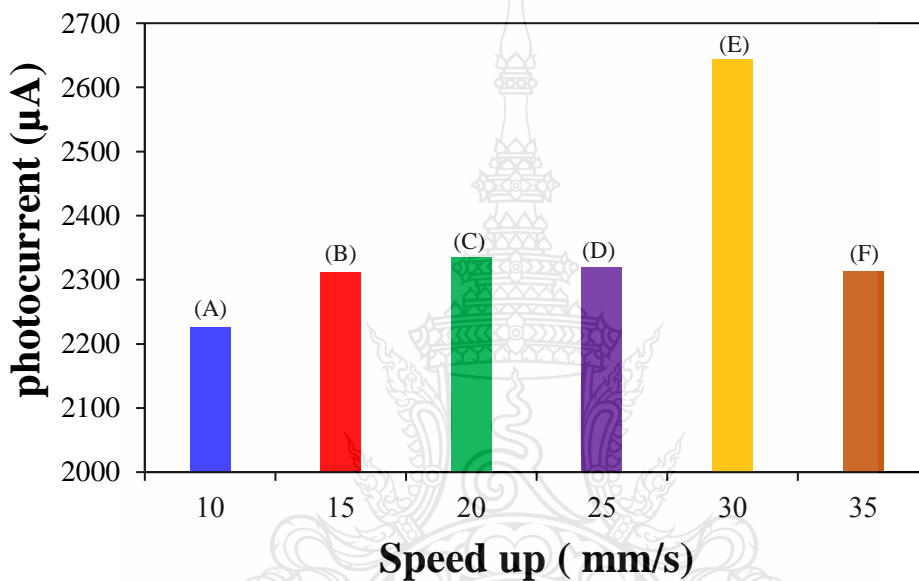


รูปที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้น (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s

4.3.5.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการดิ่งขึ้นของขั้วไฟฟ้ามากขึ้นจาก 10 – 30 mm/s

ค่ากระแสที่ได้จะเพิ่มขึ้น และที่อัตราเร็วมากกว่า 30 mm/s คือ ที่อัตราเร็ว 35 mm/s ค่ากระแสลดลง แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการดึงขึ้นของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ และที่อัตราเร็วที่ 30 mm/s ได้ค่ากระแสที่สูงกว่าอัตราเร็วอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ ฟิล์มที่มีความบางมีผลต่อการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นอัตราเร็วในการดึงขั้วไฟฟ้าขึ้นที่เหมาะสมที่สุดของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ คือที่ 30 mm/s ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

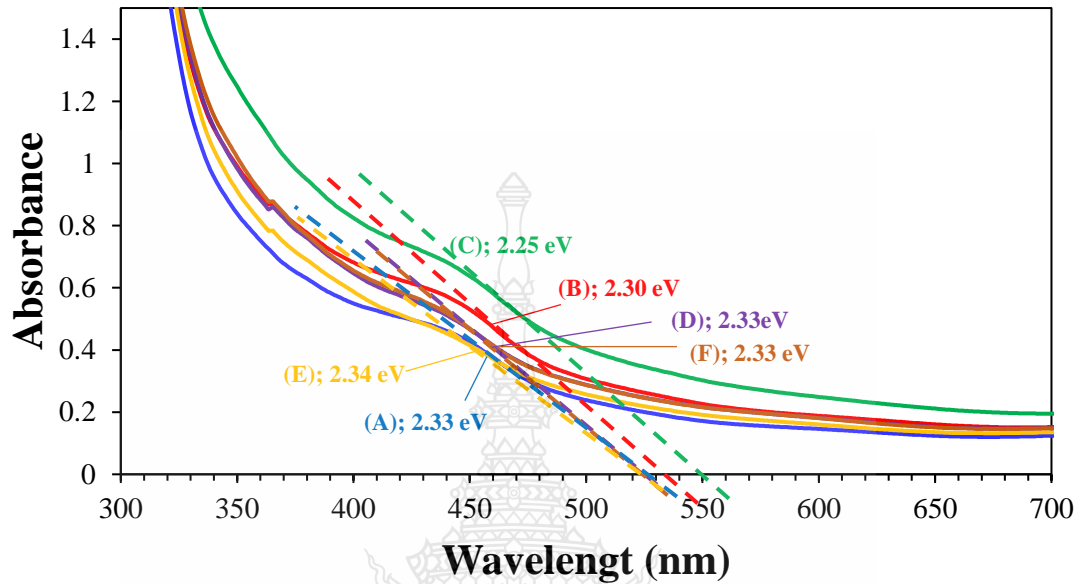


รูปที่ 4.21 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการดึงขึ้น (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

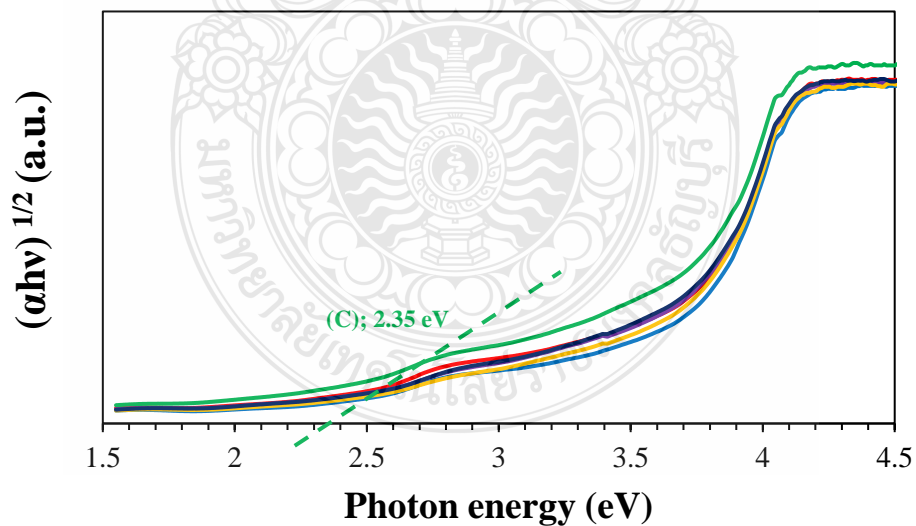
4.3.5.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากรูปที่ 4.22 แสดงสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยอัตราเร็วในการดึงขึ้นของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ ที่ 10, 15, 20, 25, 30, และ 35 mm/s ตามลำดับ เริ่มดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นที่ความยาวคลื่น 530, 538, 550, 530, 529, และ 530 nm ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ ได้เท่ากับ 2.33 eV, 2.30 eV, 2.25 eV, 2.33 eV, 2.34 และ 2.33 eV ตามลำดับ เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าแอนอด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ได้ค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นที่ 20 mm/s ได้เท่ากับ

2.35 eV จากสมบัตการดูดกลืนแสงดังกล่าวยืนยันได้ว่าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้ สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงที่ตามองเห็น



รูปที่ 4.22 กราฟการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้น คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s

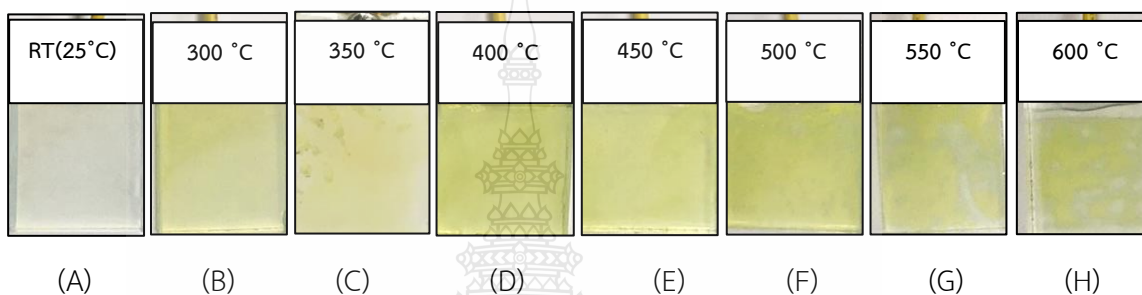


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้น คือ (A) 10, (B) 15, (C) 20, (D) 25, (E) 30, และ (F) 35 mm/s

4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการเผาขี้ไฟฟ้า FTO/BiVO₄

4.3.6.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขี้ไฟฟ้า

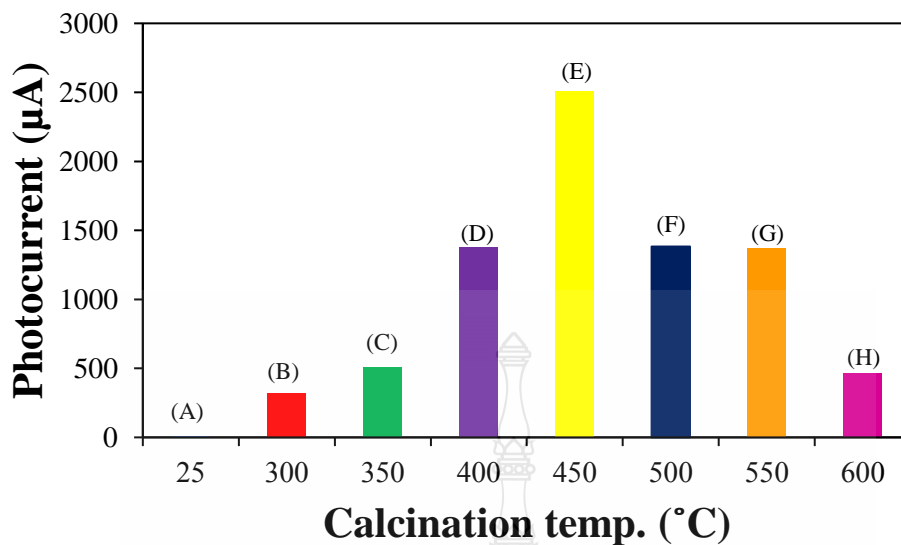
ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมขี้ไฟฟ้า FTO/BiVO₄ โดยทำการตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนวัสดุรองรับ FTO ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมขี้ไฟฟ้า FTO/BiVO₄ โดยทำการศึกษาอุณหภูมิในการเผาที่ (ก่อนเผา) 25°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม BiVO₄ ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ลักษณะของฟิล์มมีการแตกเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด[38, 39] จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติอื่นๆต่อไป



รูปที่ 4.24 ลักษณะทางกายภาพของขี้ไฟฟ้า FTO/BiVO₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C

4.3.6.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

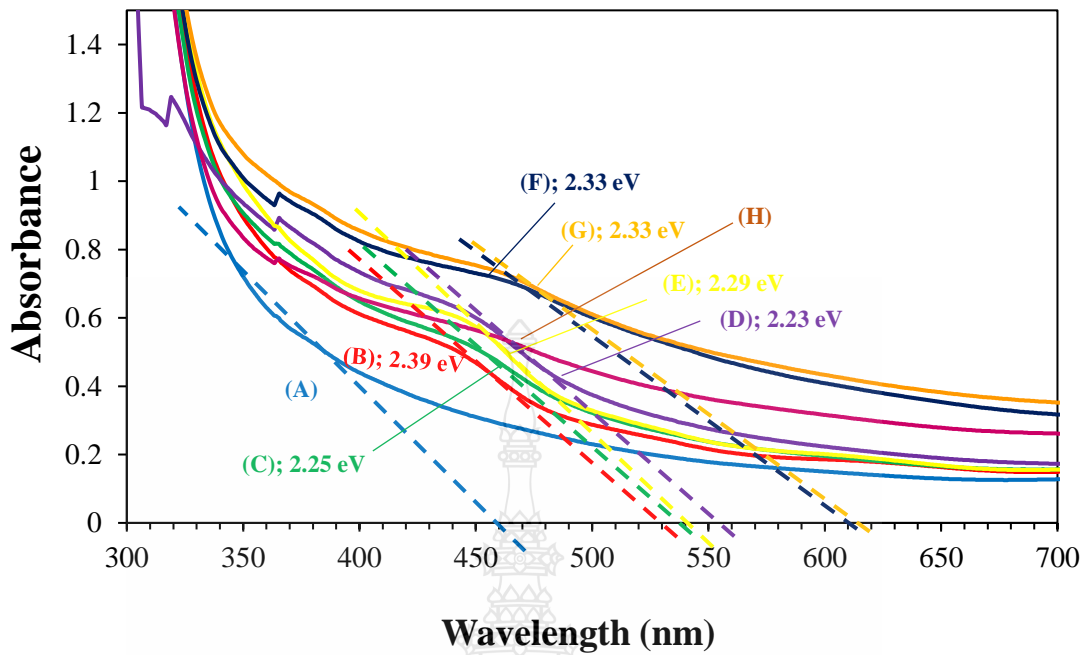
จากผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของขี้ไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากการเผาขี้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C จากรูปที่ 4.25 แสดงค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่อุณหภูมิ 300 - 450°C ค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ และค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลงที่อุณหภูมิ 500 - 600°C พบว่าที่อุณหภูมิ 450 °C ให้ค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำสูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ อย่างเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงผลของอุณหภูมิในการเผามีผลต่อประสิทธิภาพและสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก รวมทั้งมีผลต่อโครงสร้างผลึกและลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อยืนยันผลของอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม จึงต้องพิจารณาค่าคุณสมบัติดังกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป



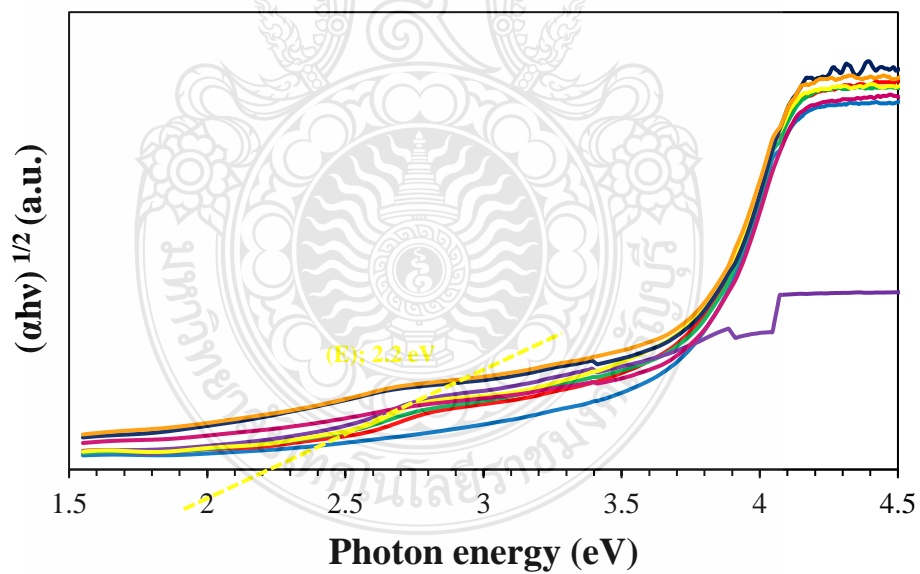
รูปที่ 4.25 ค่ากระแสจากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

4.3.6.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากการเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากการเผาขั้วไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450, 500, และ 550 °C เริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530, 539, 555, 540, 610, และ 611 nm เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (E_g) ได้เท่ากับ 2.39, 2.30, 2.23, 2.29, 2.03 และ 2.02 eV ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาถึง 600 °C พบว่าขั้วไฟฟ้าไม่มีสมบัติการดูดกลืนแสง ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปทำให้ฟิล์มของ BiVO₄ เสียสภาพและสอดคล้องกับผลทางกายภาพที่ผ่านมา จากการพิจารณาผลการศึกษาศักยภาพการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าพบว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิการเผาที่ 450°C มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นชัดเจนมากกว่าอุณหภูมิการเผาอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 4.26 เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าแอนโนด ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 450°C มีการดูดกลืนแสงมากที่สุด และได้ค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ได้เท่ากับ 2.2 eV จึงส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมีประสิทธิภาพดีที่สุด



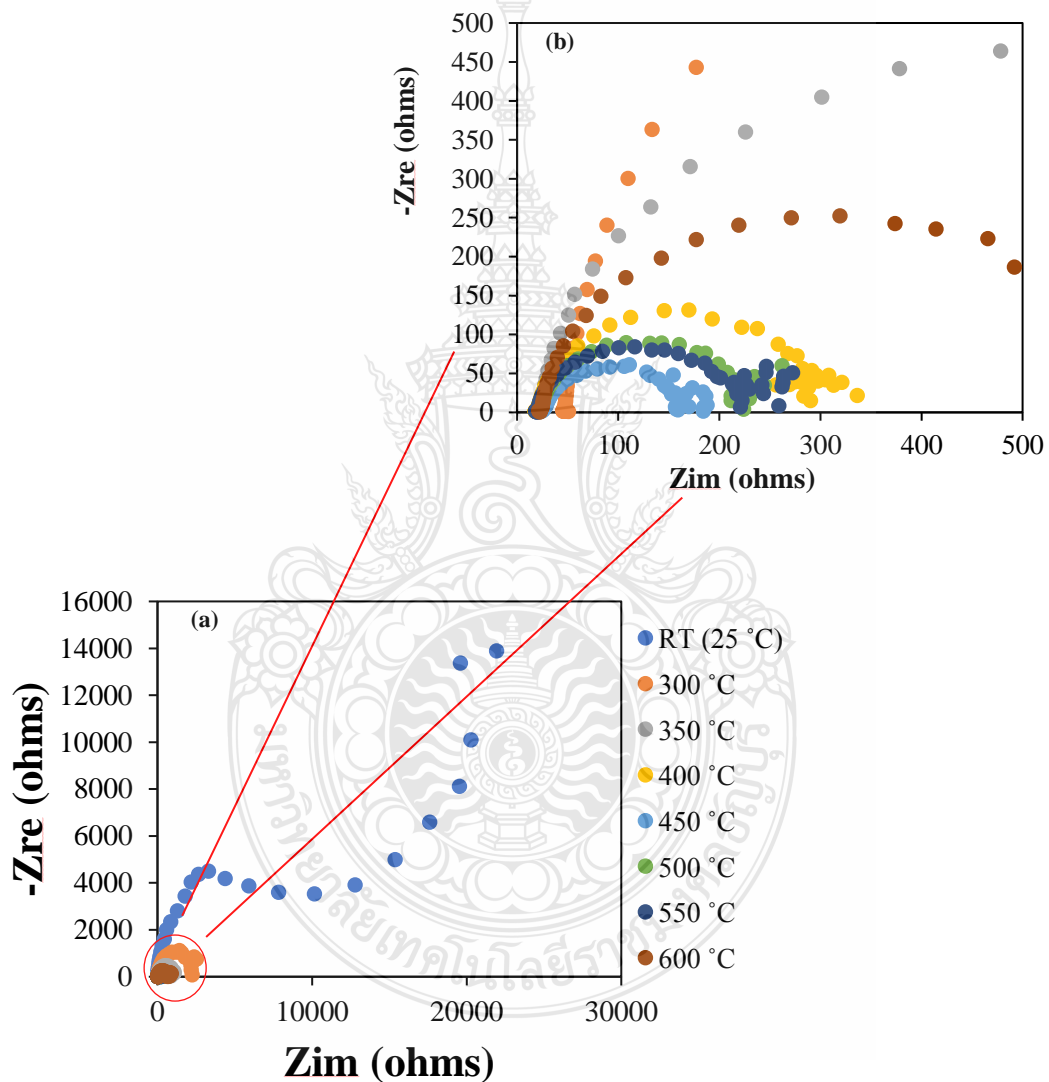
รูปที่ 4.26 กราฟการดูดกลืนแสงของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของชีวไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ FTO/BiVO₄ (A) ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ (B) 300°C, (C) 350°C, (D) 400°C, (E) 450°C, (F) 500°C, (G) 550°C, และ (H) 600°C

4.3.6.4 ผลของค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากผลการเผาที่อุณหภูมิ 25°C (RT), 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy; (EIS) เพื่อทดสอบการส่งผ่านอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าแอนโนด FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค dip coating method [machine] พบว่าการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 450°C มีค่าความต้านทานการส่งผ่านประจุน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.28(b) และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.28 กราฟ Nyquist plots ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄; (a) ก่อนเผา และหลังเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ และ(b) กราฟขยายอุณหภูมิในการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 300 - 600°C

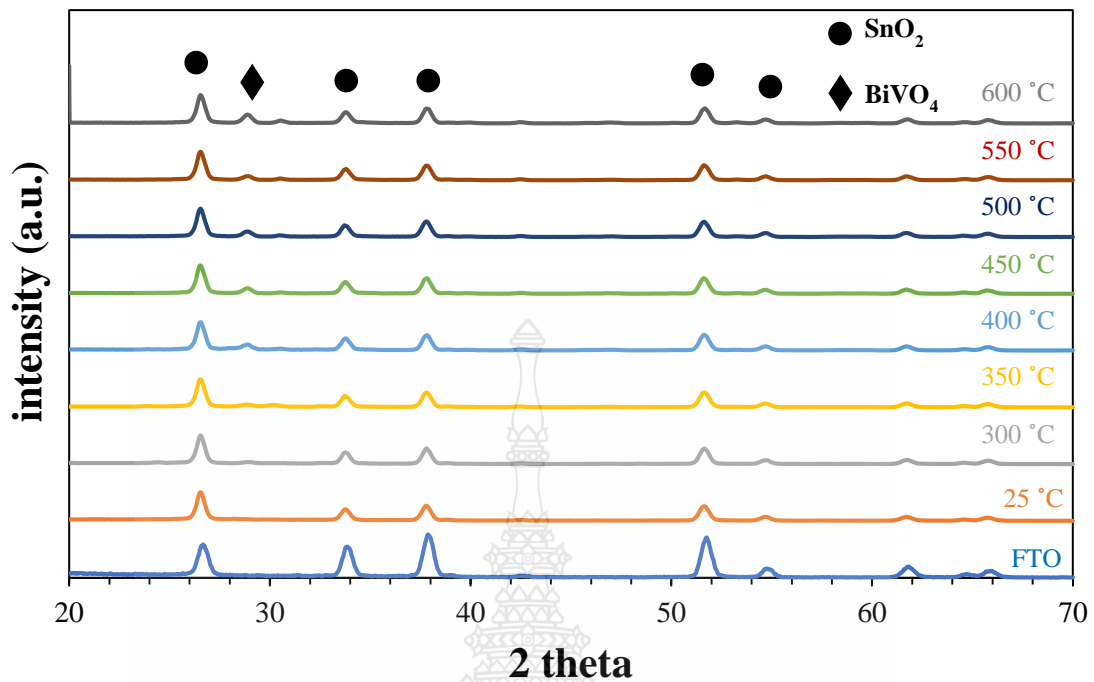
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 25°C (RT), 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C

Calcination temperature (°C)	Charge Transfer Resistance; Rct (Ohm)
Room temperature (RT)	20,800
300	2,455
350	945.7
400	276.5
450	138.4
500	204.5
550	211.5
600	652.8

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 450°C มีค่าความต้านทานการส่งผ่านประจุน้อยที่สุดทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในขั้วไฟฟ้าได้ง่าย และมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ซึ่งผลสอดคล้องกับค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ดังรูปที่ 4.25 จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาส่งผลต่อสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C สามารถลดค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากที่สุดจึงส่งผลทำให้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้ได้ขั้วไฟฟ้าที่มีสมบัติที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

4.3.6.5 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างผลึก

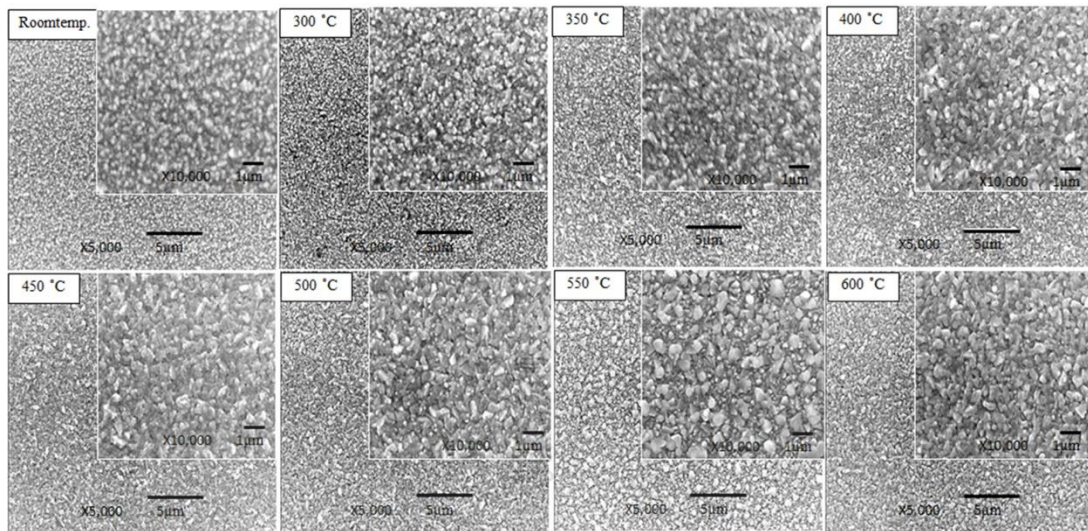
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction; (XRD) พบว่าโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อุณหภูมิจึงเผาแตกต่างกัน มีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ 2θ เท่ากับ 28.9° และตรงกับ ระนาบ 121 ซึ่งตรงกับ ระบบ JCPDS หมายเลข 14-0688[40-43] สามารถยืนยันโครงสร้างผลึกของ BiVO₄ บนขั้วไฟฟ้า เป็นแบบ monoclinic ที่อุณหภูมิจึงเผา 400 – 600 °C ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่มีคุณสมบัติที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสงช่วงที่ตามองเห็น ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 โครงสร้างผลึกของกระจกนำไฟฟ้า FTO และ ชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ก่อนเผา และหลังเผา ชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.6.6 ผลของอุณหภูมิการเผาชั้นไฟฟ้าต่อสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ภายใต้สภาวะก่อนทำการเผา และหลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, และ 600°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ก่อนทำการเผามีลักษณะพื้นผิวเป็นทรงกลมขนาดเล็กเชื่อมติดกัน เมื่อทำการเผาชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อุณหภูมิ 300 – 450 °C ลักษณะพื้นผิวที่เป็นเม็ดมีความหนาแน่นมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิที่ 450 °C พื้นผิวมีการหลอมรวมกันจนมีความหนาแน่นที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า และเมื่อทำการเผาชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อุณหภูมิ 500 – 600 °C ลักษณะพื้นผิวของชั้นไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่ากระแสของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่เกิดขึ้น ความหมายคือเมื่อชั้นไฟฟ้ามีสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะที่มีความหนาแน่นที่ผิวหน้ามาก ส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄



รูปที่ 4.30 ภาพ SEM ของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, และ 600 °C

4.3.6.7 ผลการศึกษาค่าองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄

จากการศึกษาค่าองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เพื่อยืนยันการตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ที่เตรียมได้จากการเผาชั้นไฟฟ้าที่ อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังตารางที่ 4.2 พบว่าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มีองค์ประกอบของ Bi อยู่ 4.35 %, มีองค์ประกอบของ Sn อยู่ 71 %, มีองค์ประกอบของ Si อยู่ 1.38 %, มีองค์ประกอบของ V อยู่ 0.99 %, และมีองค์ประกอบของ O อยู่ 22 % จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนถึงองค์ประกอบทางเคมีบนผิวหน้าชั้นไฟฟ้า เพื่อยืนยันการมีอยู่ของ Bi, V, O บนผิวหน้าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาค่าองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค EDX

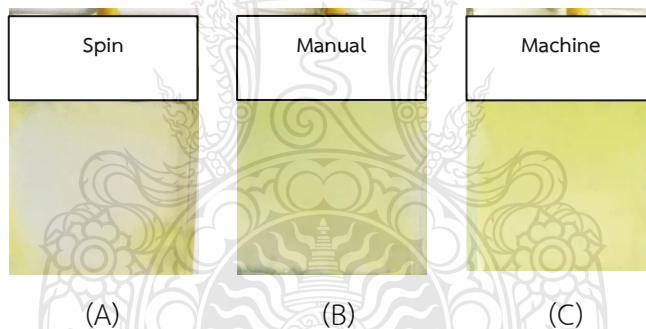
Element	Weight %	Compound %	Formula
Si K	1.39	2.98	SiO ₂
V K	0.99	1.77	V ₂ O ₅
Sn L	71.20	90.40	SnO ₂
Bi M	4.35	4.85	Bi ₂ O ₃
O	22.06		
Totals	100.00		

4.3.7 ผลการเปรียบเทียบเทคนิคในการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄

หลังจากศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค dip coating method [machine] ได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมชั้นไฟฟ้าด้วยเทคนิค dip coating method [manual] และ Spin coating [44] โดยทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.7.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า

จากผลการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ โดยทำการตั้งสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ลงบนวัสดุรองรับ FTO ด้วยเทคนิค Spin coating, Dip Coating [Manual], และ Dip Coating [Machine] จากรูปที่ 4.31 พบว่าลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Spin coating ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า FTO มีการเกาะติดของสาร BiVO₄ ไม่เต็มผิวหน้าชั้นและสม่ำเสมอ ส่วนชั้นไฟฟ้าที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Manual] ฟิล์มบาง BiVO₄ แสดงการเกาะติดที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และสีที่อ่อนกว่าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Machine] ซึ่งมองเห็นลักษณะของฟิล์มบางเรียบและสม่ำเสมอกว่าวิธีอื่นอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเพื่อผลที่ชัดเจน จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติอื่นๆต่อไป

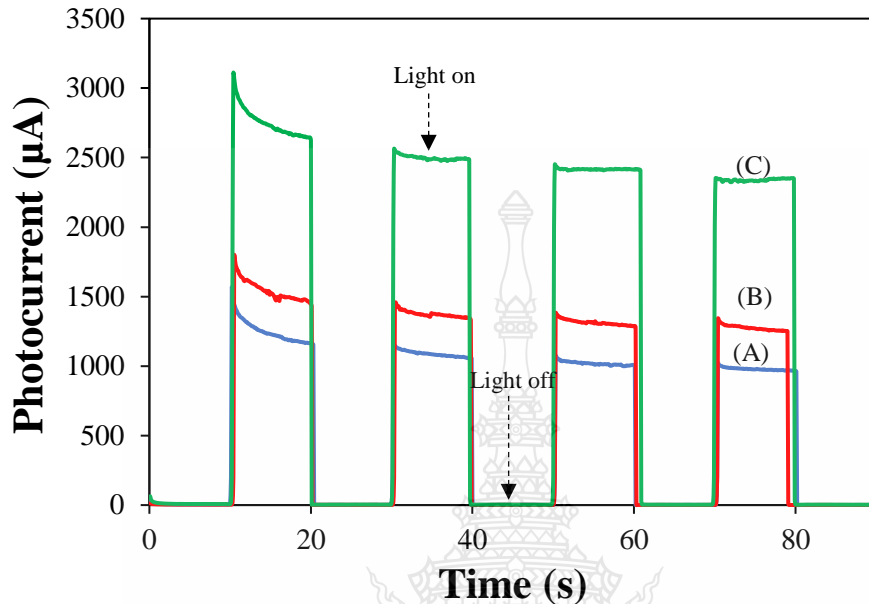


รูปที่ 4.31 ลักษณะทางกายภาพของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine]

4.3.7.2 ผลการศึกษาสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ

จากค่ากระแสการตอบสนองต่อแสงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Spin coating, Dip Coating [Manual], และ Dip Coating [Machine] จากรูปที่ 4.32 พบว่าค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Machine] ให้ค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำเพิ่มสูงกว่าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วย เทคนิค Dip Coating [Manual] และ Spin coating ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพจาก

หัวข้อที่ผ่านมา สามารถยืนยันได้เบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพว่าการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำได้อย่างสม่ำเสมอส่งผลต่อคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

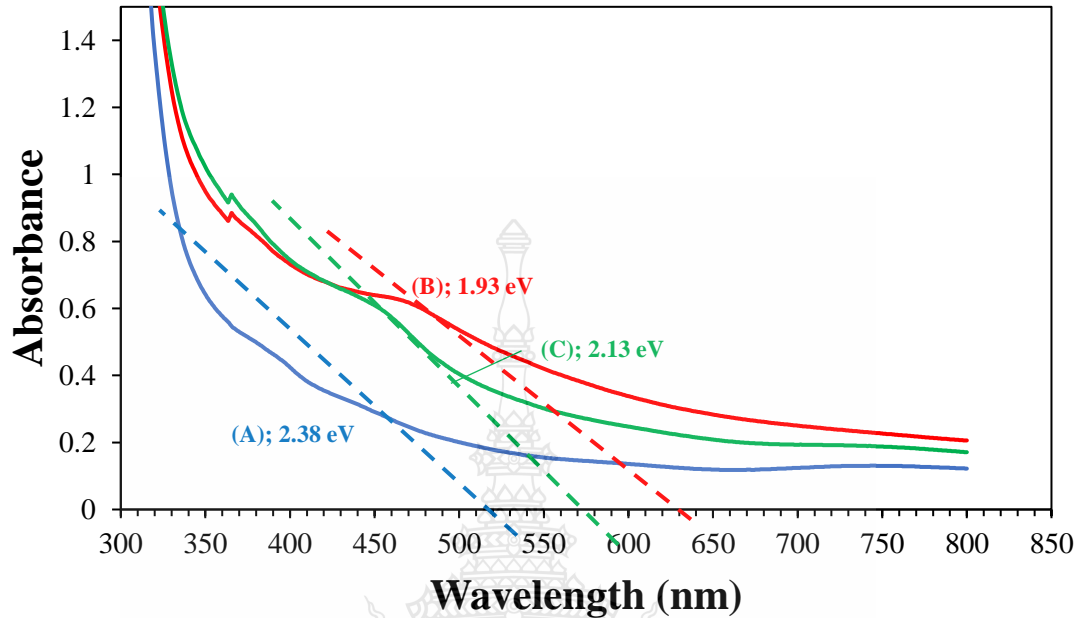


รูปที่ 4.32 ค่ากระแสจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของน้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบ (A) spin coating, (B) dip coating method [manual], และ (C) dip coating method [machine] ภายใต้การเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น ในสารละลาย 0.5 M NaCl ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โวลต์

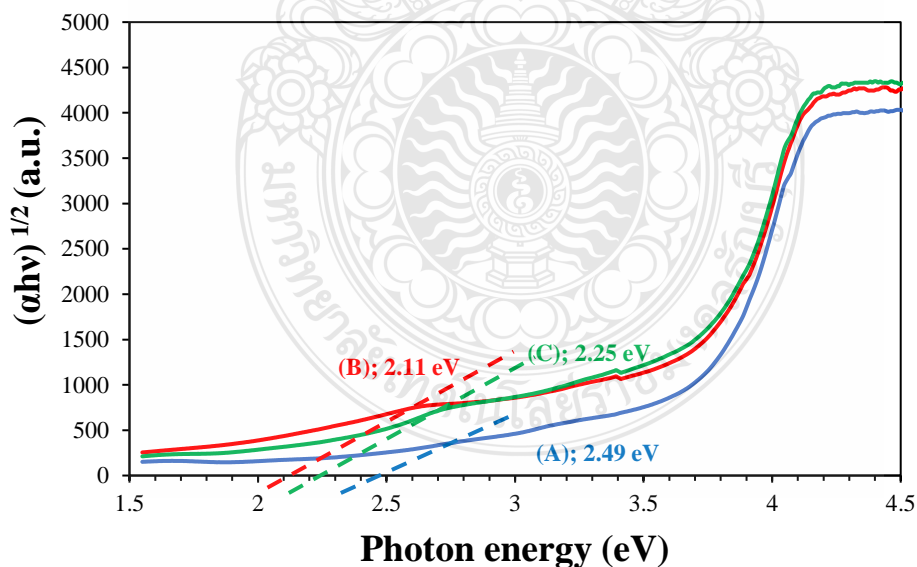
4.3.7.3 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

จากรูปที่ 4.33 แสดงสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วย 3 เทคนิคได้แก่ เทคนิค Spin coating, Dip Coating [Manual], และ Dip Coating [Machine] เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band gap energy; E_g) จากสมการ $E_g = 1240/\lambda$ พบว่าเริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 nm, 630 nm, และ 575 nm ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าพลังงานแถบ (E_g) ได้เท่ากับ 2.38 eV, 1.96 eV, และ 2.15 eV ตามลำดับ เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าแอนโนด เมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น พบว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Dip Coating [Machine] มีการดูดกลืนแสงมากกว่าเทคนิค Spin coating และ Dip Coating [Manual] ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และได้ค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เท่ากับ 2.25 eV จากคุณสมบัติการดูดกลืนแสง ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Machine] ที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นที่ดีในชั้นสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ จึงส่งผลทำให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอน (e⁻) และ ช่องว่าง (h⁺) และเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิด h⁺

ปริมาณมาก ส่งผลไปยังประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ภายใต้การเร่งด้วยแสงช่วงที่ตาเรามองเห็น ได้เป็นอย่างดี



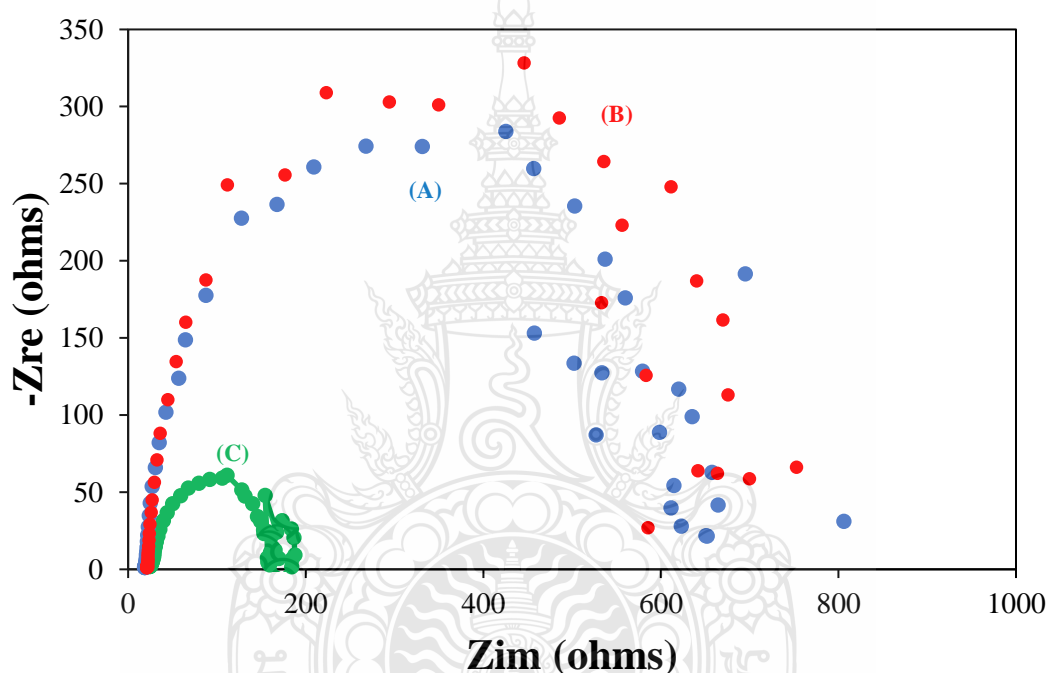
รูปที่ 4.33 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) spin coating, (B) dip coating method [manual], และ (C) dip coating method [machine]



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค (A) spin coating, (B) dip coating method [manual], และ (C) dip coating method [machine]

4.3.7.4 ผลของค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาค่าความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้จากเทคนิคต่างๆ ซึ่งทำการศึกษา 3 เทคนิค ประกอบด้วยเทคนิค Dip Coating (Manual), Dip Coating (Machine), และ Spin coating โดยใช้เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy; (EIS) ในการวิเคราะห์ พบว่าการตรึงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) มีค่าความต้านทานการส่งผ่านประจุ (Charge Transfer Resistance; Rct) น้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.35 โดยพิจารณาจากรัศมีครึ่งวงกลมกราฟ Nyquist plots ที่แคบที่สุด และเมื่อคำนวณค่า Rct ตามรายละเอียดในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.35 กราฟ Nyquist plots ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine]

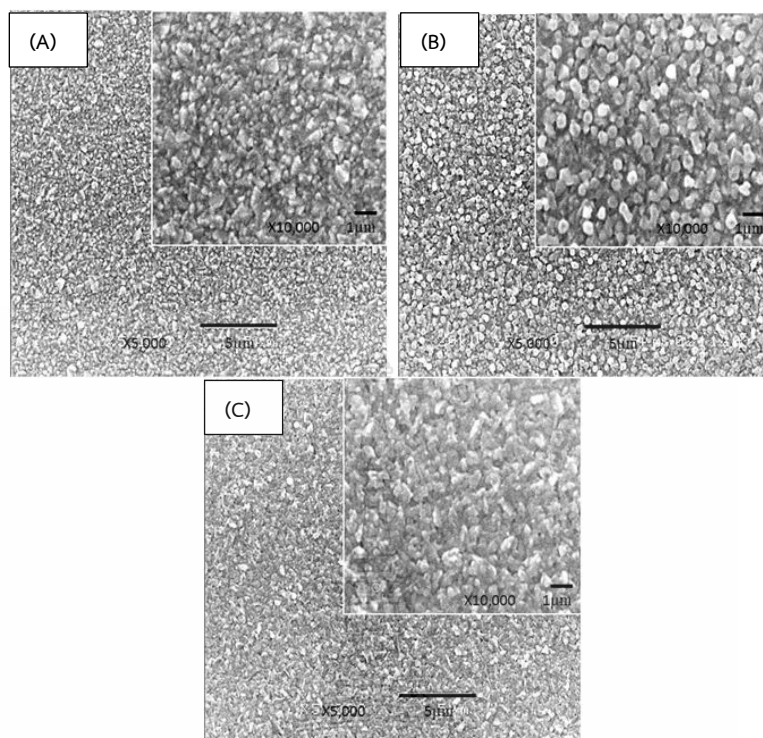
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Manual], Dip Coating [Machine], และ Spin coating

BiVO ₄ thin film preparation Technique	Charge Transfer Resistance; Rct (Ohm)
Spin coating	608.5
Dip coating (Manual)	688.6
Dip coating (Machine)	138.5

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) มีค่าความต้านทานการส่งผ่านประจุน้อยที่สุดทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นไฟฟ้าได้ง่าย และมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ซึ่งผลสอดคล้องกับค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ดังรูปที่ 4.32

4.3.4.5 ผลของเทคนิคการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำต่อสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า

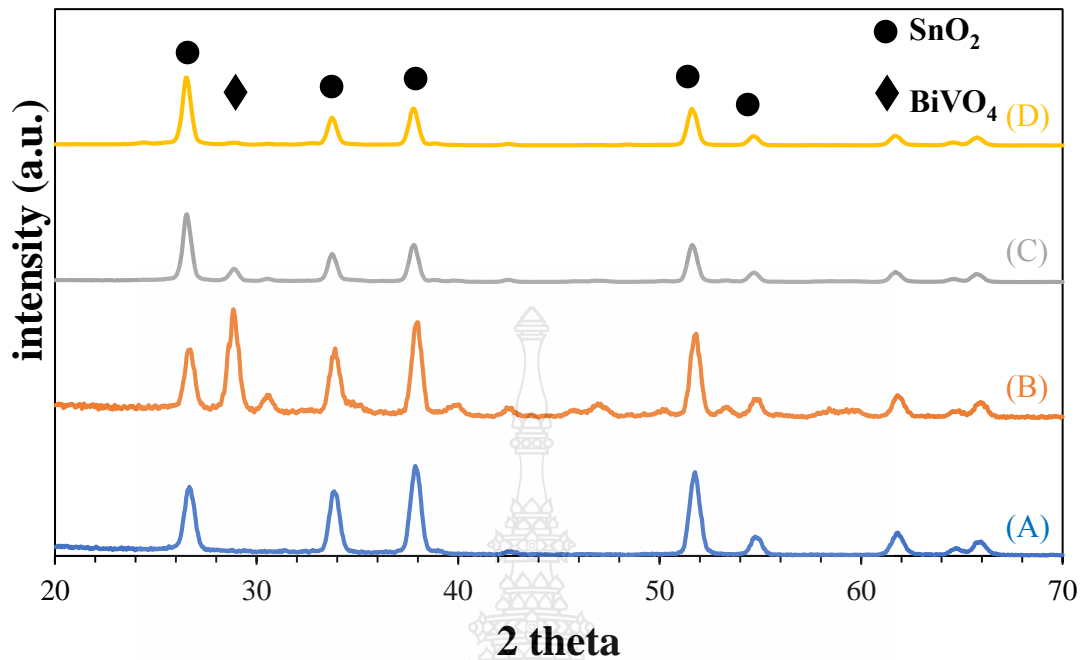
จากการศึกษาเทคนิคการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำต่อสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating (Manual), Dip Coating (Machine), และ Spin coating โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Spin coating มีลักษณะคล้ายทรงกลมเชื่อมติดกัน มีความขรุขระ และมีความเป็นรูพรุน เมื่อเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Dip Coating (Manual) พื้นผิวมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีการจัดเรียงอนุภาคที่ไม่เป็นระเบียบ รวมทั้งมีความเป็นรูพรุนสูง และการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) พบว่าพื้นผิวของชั้นไฟฟ้ามีลักษณะขรุขระมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคหนาแน่นมากเต็มพื้นผิวชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ดังรูปที่ 4.36 จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะของอนุภาคหนาแน่นเต็มพื้นผิวชั้นไฟฟ้า บ่งชี้ถึงการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ครอบคลุมเต็มพื้นที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นถึงมีปริมาณสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ที่มากพอและเหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้า



รูปที่ 4.36 ภาพ SEM ของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine]

4.3.4.6 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างผลึก

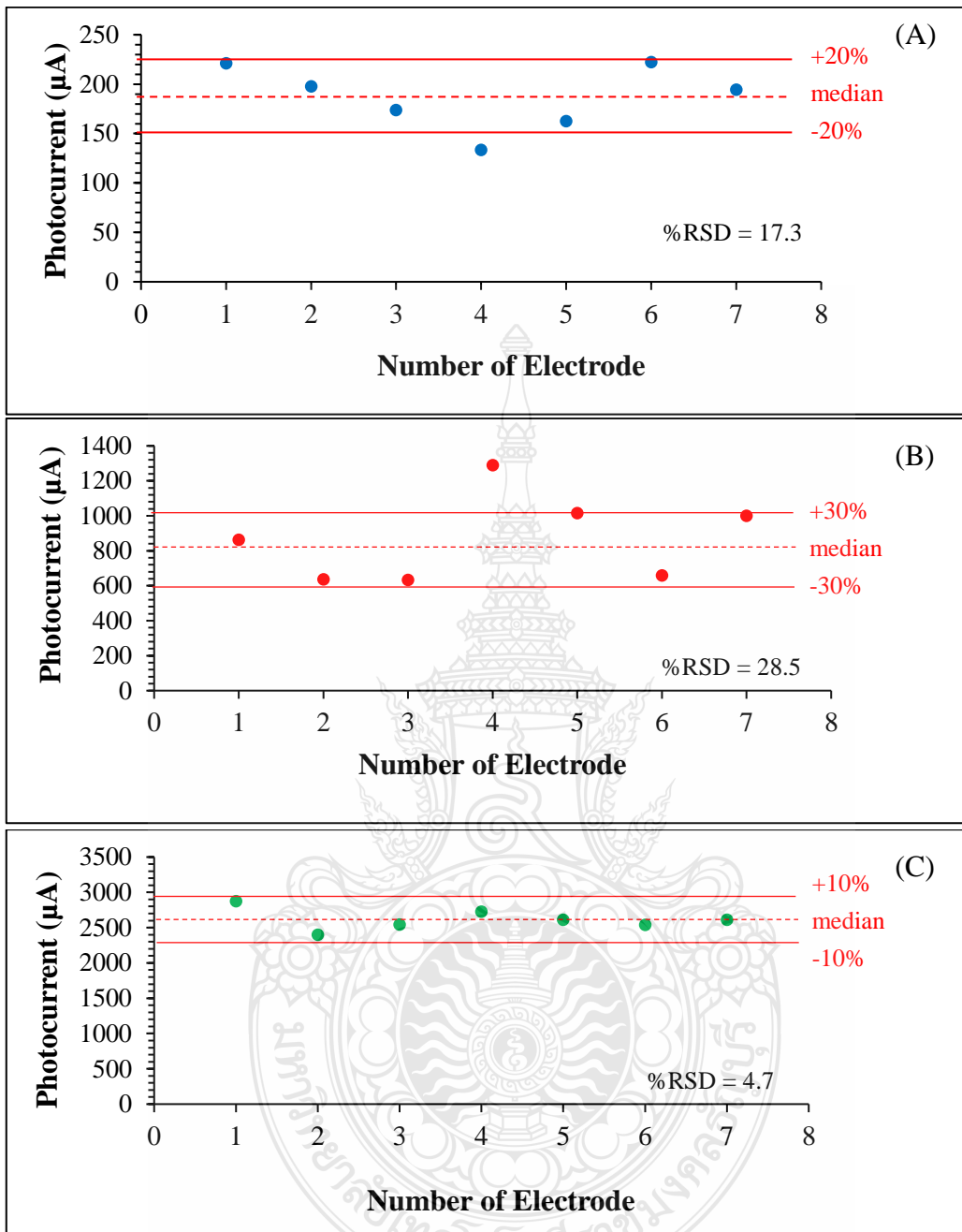
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วย 3 เทคนิค ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) พบว่าโครงสร้างผลึกของกระจกนำไฟฟ้า FTO มี SnO₂ เป็นองค์ประกอบ มีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ 2 theta เท่ากับ 26.8 °, 34.1 °, 38.0 °, 52.0 ° และ 55.1 ° ซึ่งตรงกับโครงสร้าง tetragonal [45] พบโครงสร้างผลึกของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Machine] และ Dip Coating [Manual] เป็นแบบ monoclinic มีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ 2 theta เท่ากับ 28.9° ซึ่งตรงกับระนาบ 121 และสอดคล้องกับข้อมูลในฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 14-0688 [46] ส่วนชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Spin coating แสดง XRD peak สารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ไม่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.37 อาจเนื่องมาจาก BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Spin coating ที่ผิวหน้าชั้นไฟฟ้ามีปริมาณน้อยเกินไปเนื่องด้วยกระบวนการตรึงแบบหมุนเหวี่ยงทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่บางมากกว่าเทคนิคอื่นๆ จนไม่สามารถวิเคราะห์ด้วย XRD ได้



รูปที่ 4.37 โครงสร้างผลึกของ (A) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) , ชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine], (D) Spin coating

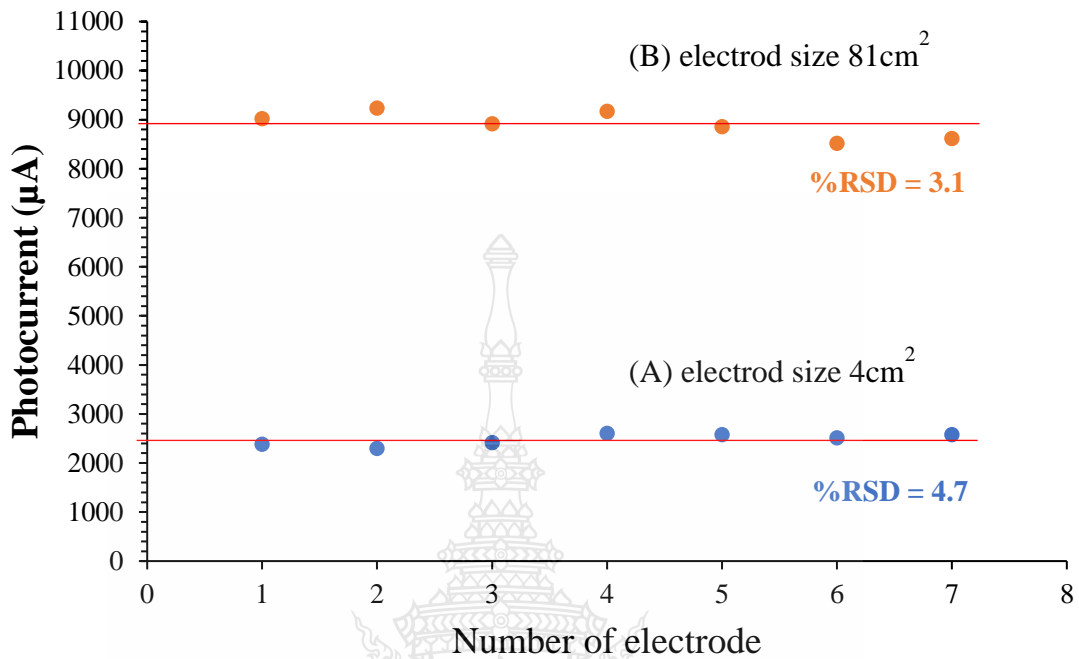
4.3.4.7 ผลการเตรียมชั้นของชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄

จากการศึกษาการเตรียมชั้นไฟฟ้าแอโนด BiVO₄ ที่เตรียมได้จากเทคนิค Dip Coating (Manual), Dip Coating (Machine), และ Spin coating โดยการเตรียมชั้นไฟฟ้าชั้นในในแต่ละเทคนิค และตรวจสอบสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำจากรูปที่ 4.38 แสดงค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำของชั้นไฟฟ้าที่เตรียมได้จากทั้ง 3 เทคนิค และยังศึกษาประสิทธิภาพของการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำซ้ำพบว่าชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) มีค่าเฉลี่ยของกระแส (median) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD) น้อยกว่าเทคนิค Spin coating และ Dip Coating (Manual) ตามลำดับอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งชี้ถึงกระบวนการที่มีความแม่นยำสูงสำหรับการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ให้มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และสามารถทำซ้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งถือว่าเป็นจุดแข็ง ของเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้เครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ และถือว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.38 ผลการศึกษาการเตรียมชั้นของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิค (A) Spin coating, (B) Dip Coating [Manual], และ (C) Dip Coating [Machine]

4.3.4.8 ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.39 ผลการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ขนาด (A) 4 cm² และ (B) 81 cm² เตรียมเทคนิคด้วย Dip Coating [Machine]

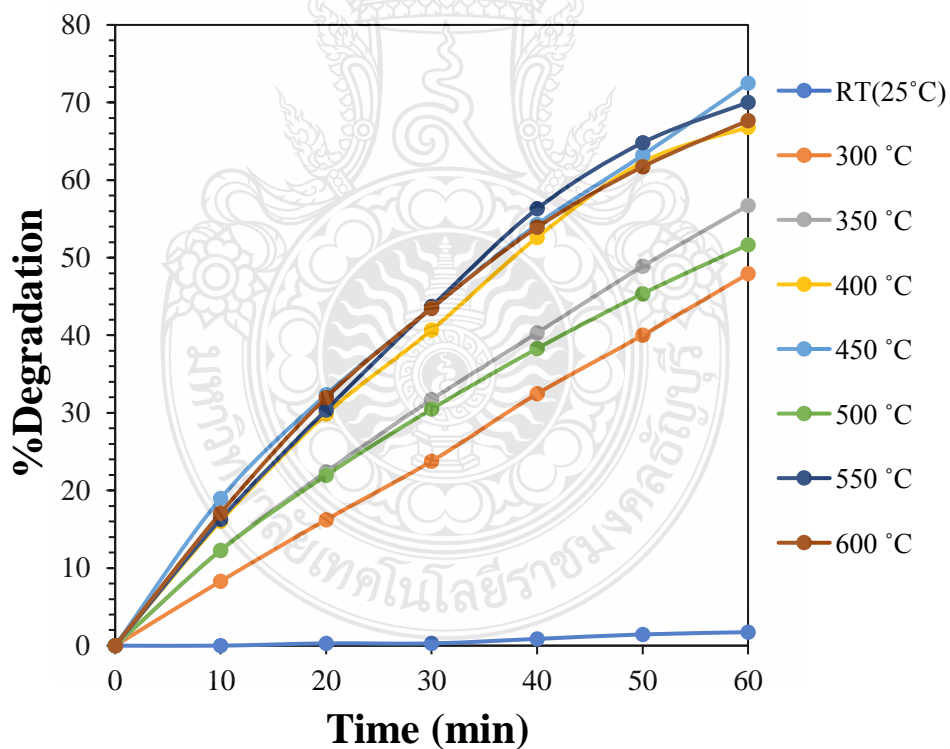
ในการศึกษาการขยายขนาดของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมด้วยเทคนิค Dip Coating [Machine] ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม และตรวจสอบสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกจากการเตรียมแต่ละครั้งของขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งได้ทำการศึกษานขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่ขนาด 4 cm² และ 81 cm² และยังคงศึกษาประสิทธิภาพของการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด BiVO₄ แบบทำซ้ำขนาดใหญ่ จากรูปที่ 4.39 พบว่าค่ากระแสจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ขนาดพื้นที่ผิว 4 cm² ค่ากระแสเท่ากับ 2,500 µA และ ที่ขนาดพื้นที่ผิว 81 cm² ค่ากระแสเท่ากับ 10,100 µA จะเห็นได้ว่าค่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อขยายขนาดพื้นที่ผิวใหญ่ขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการขยายขนาดการใช้งานต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ทั้งสองขนาดให้ค่ากระแสจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำที่ยอมรับได้ในประสิทธิภาพการทำซ้ำของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ที่ต่ำ ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการที่มีความแม่นยำสูงสำหรับการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ส่งผลให้สามารถยืนยันจุดแข็งของวิธีการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติสำหรับการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ ทั้งกระบวนการที่ง่าย สะดวก สามารถทำซ้ำได้เป็นอย่างดี และเหมาะสมที่จะขยายขนาดเพื่อการใช้งานต่อไป

4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้ที่สภาวะเหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Dip Coating (Machine) และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ โดยใช้ สารละลายMethyl Red เป็นตัวแทนสารอินทรีย์เริ่มต้น ใช้สารละลายNaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปริมาตร 50 mL โดยได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลอุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้า

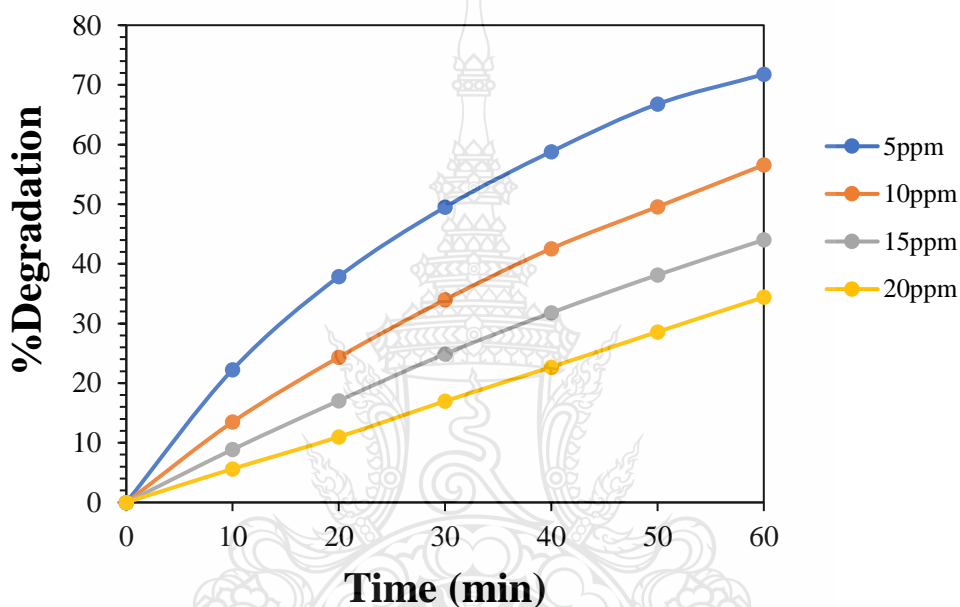
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ Methyl Red เป็นตัวแทนสารอินทรีย์เริ่มต้น พบว่าอุณหภูมิการเผาขั้วไฟฟ้าที่ 450 °C สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 72 % ในระยะเวลา 60 นาที ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่ากระแส ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ผิวขั้วไฟฟ้ามีความหนาแน่น จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มาก ดังนั้นส่งผลให้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมจากการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C มีประสิทธิภาพในการกำจัด Methyl Red แสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ผลการเผาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.4.2 ผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น

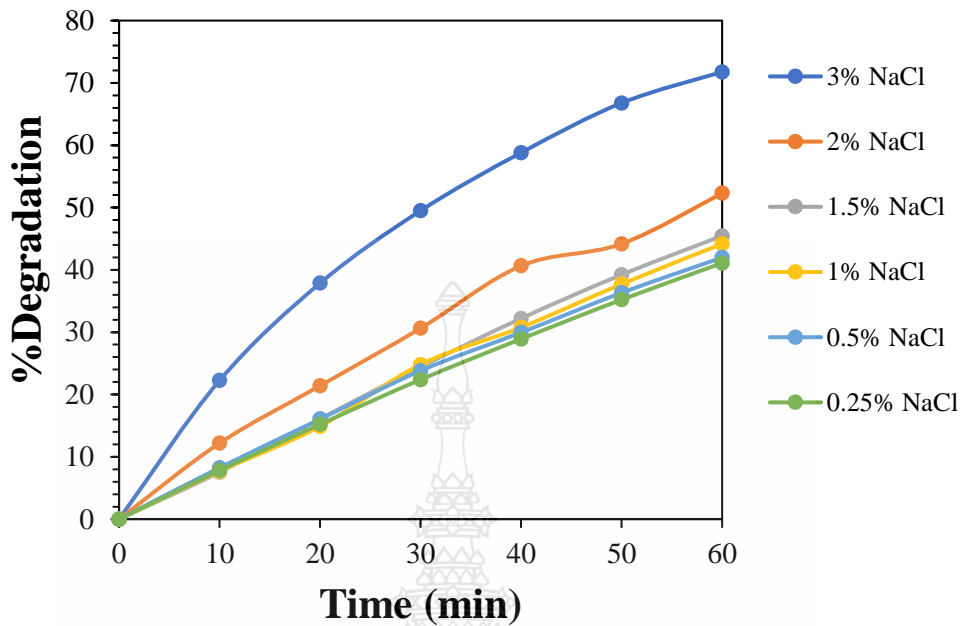
จากการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น (Methyl Red) โดยศึกษาที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, และ 20 ppm ภายใต้สภาวะการเร่งด้วยแสง และให้ศักย์ไฟฟ้า 2 V จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด Methyl Red ลดลง โดยที่ความเข้มข้น 5 ppm มีประสิทธิภาพการกำจัด Methyl Red ได้สูงสุดที่ 71 % ในระยะเวลา 60 นาที แสดงดังรูปที่ 4.41 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ด้วย ซึ่งจะต้องศึกษาเบื้องต้นเพื่อดำเนินการวางแผนการกำจัดสารอินทรีย์แต่ละแหล่งด้วย



รูปที่ 4.41 ผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.4.3 ผลความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

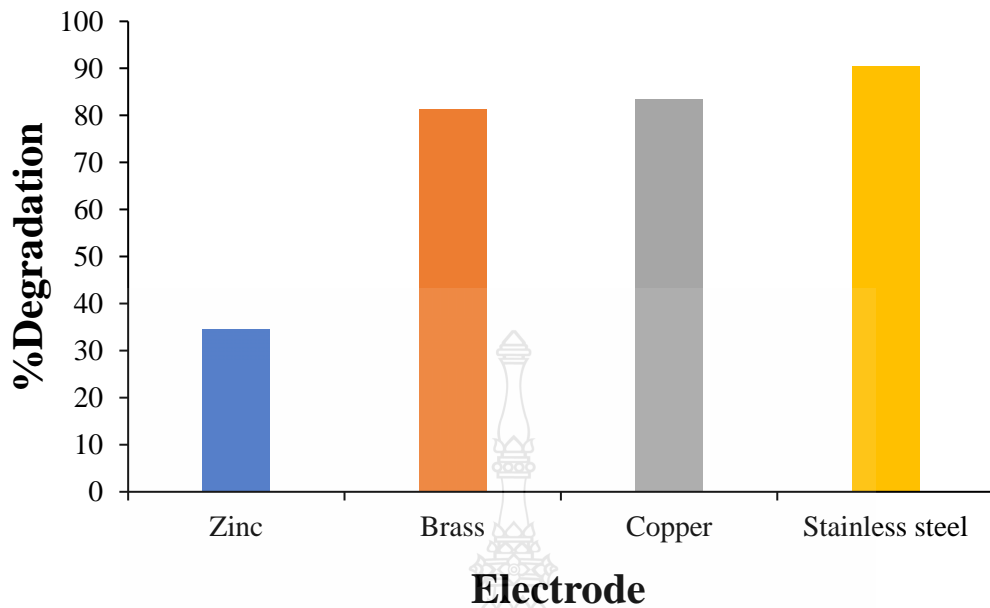
จากผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการกำจัดสารอินทรีย์สีส้ม Methyl Red ที่ความเข้มข้น 0.25%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, และ 3% จากการทดลองพบว่าสามารถกำจัด Methyl Red ได้ 41%, 41%, 45%, 49%, 52% และ 71% ในเวลา 60 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด Methyl Red เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.42 อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ยอมรับได้ของสมาชิกห้องปฏิบัติการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการตอบสนองต่อรสชาติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าที่ความเข้มข้นที่ 0.5 % เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ยอมรับได้เกี่ยวกับรสชาติของวัตถุหรือสิ่งที่จะนำมาผ่านระบบเพื่อประยุกต์ใช้กับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอนาคตต่อไป



รูปที่ 4.42 ผลความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที ด้วยขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้น









4.4.4 ผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด

จากการศึกษาการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ Methyl Red โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน ได้แก่ สังกะสี ทองเหลือง ทองแดง และ สแตนเลสสตีล และใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สแตนเลสสตีล มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด Methyl Red สามารถกำจัดได้ 90% ในระยะเวลา 60 นาที รองลงมาคือ ทองแดง ทองเหลือง และ สังกะสี ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.43 รวมทั้งแสดงลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าแคโทดก่อนและหลังกำจัด Methyl Red พบว่าหลังการกำจัดที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สังกะสี ทองเหลืองมีการเกาะติดของสารละลายที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าทองแดงหลังการกำจัดเกิดรูพรุนและมีสีดำที่ผิวหน้าขั้วทองแดง สแตนเลสสตีลที่ผิวหน้าขั้วไม่มีการเกาะติดของสารรวมทั้งไม่เกิดการสึกกร่อนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้างดงตารางที่ 4.4 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สแตนเลสสตีล ช่วยเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอน ภายใต้การทำงานร่วมกับขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ จึงทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัด Methyl Red นอกจากนี้แล้ว สแตนเลสสตีล ยังมีความทนทาน และมีราคาที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงที่มีขนาดสเกลที่ใหญ่ในอนาคตต่อไปได้เป็นอย่างดี



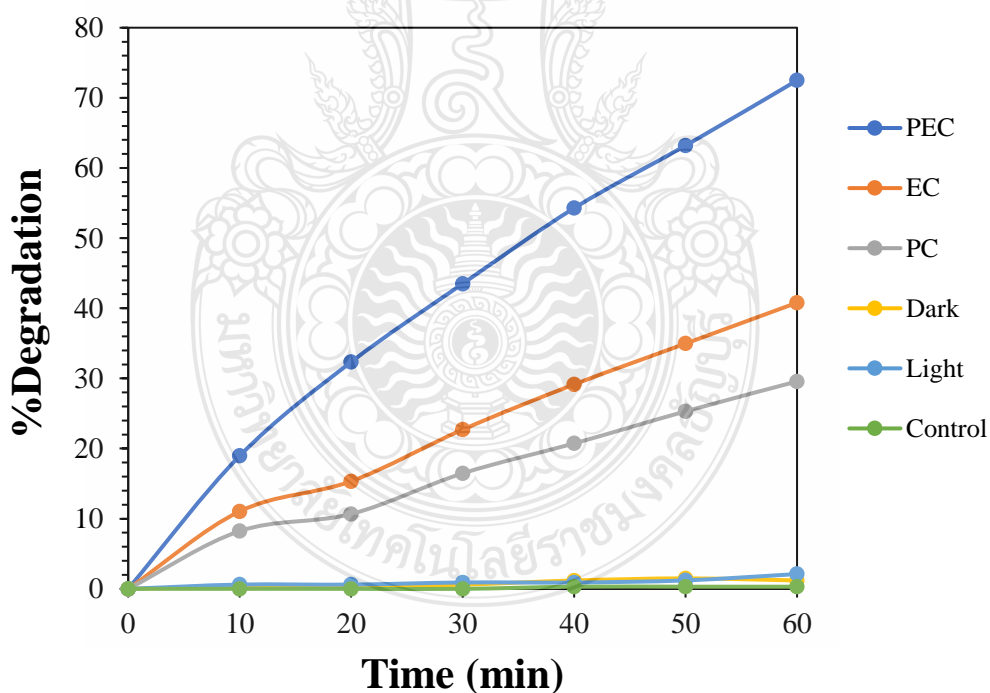
รูปที่ 4.43 ผลของชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพขั้วไฟฟ้าแคโทดก่อน และหลังกำจัดสารอินทรีย์

Electrode	Before Degradation	After Degradation
Zinc		
Brass		
Copper		
Stainless steel		

4.4.5 ผลการศึกษากลไกการกำจัดสารอินทรีย์

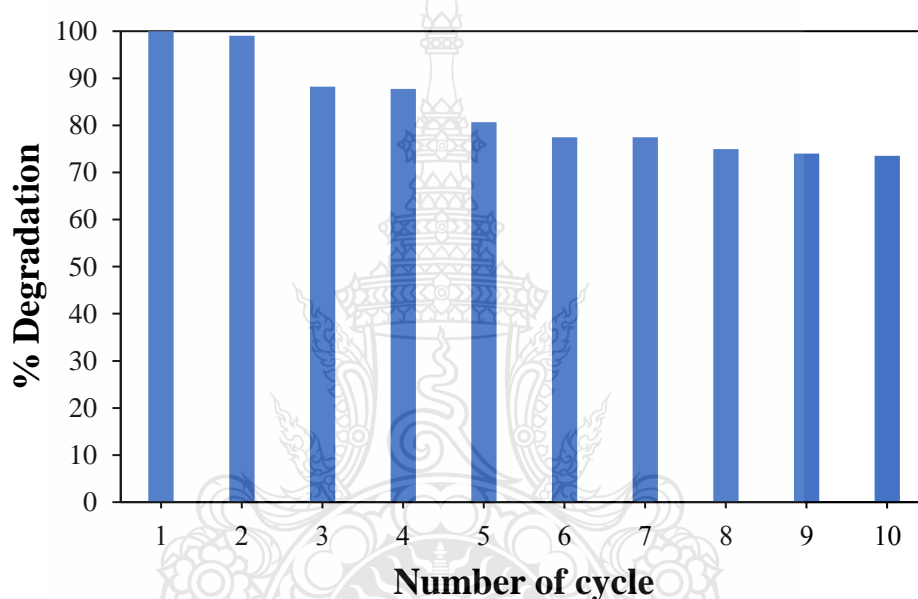
การศึกษากลไกการกำจัด Methyl Red ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ได้ศึกษาทั้งหมด 5 กลไก ได้แก่ 1) Photoelectrocatalytic (PEC) เป็นกลไกที่ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำทำงานภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าและเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น 2) Electrocatalytic (EC) เป็นกลไกที่ขั้วไฟฟ้าใช้การเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้า 3) Photocatalytic (PC) กลไกที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าโดยใช้แสงเพียงอย่างเดียว 4) Light กลไกนี้ให้แสงอย่างเดียว โดยไม่ใช้ขั้วไฟฟ้า 5) Dark กลไกนี้ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าและตัวเร่งปฏิกิริยาใดๆ โดยมีตัวแปรควบคุมเป็น Control ที่ไม่มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl จากผลการทดลองพบว่าในระยะเวลา 60 นาที กลไก Photoelectrocatalytic มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (Methyl Red) ได้สูงที่สุดถึง 72 % รองลงมาคือ Electrocatalytic สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 40 %, Photocatalytic สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 29 %, Light สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 2 %, Dark สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 1 % ดังรูปที่ 4.44 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ถึงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับกำจัดสารอินทรีย์ (Methyl Red) จำเป็นต้องมีการเร่งขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น หรือเรียกว่ากระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic ; PEC) จึงจะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.44 กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ ที่เวลา 60 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.4.6 ผลการศึกษาการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์

จากศึกษาการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้าในการกำจัด Methyl Red ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ได้ศึกษาจำนวนรอบในการกำจัดทั้งหมด 10 รอบ ที่ความเข้มข้น 5 ppm ของสารละลาย Methyl Red จากผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 100% ในช่วงแรก และจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรอบในการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ในการกำจัด Methyl Red ลดลงและเริ่มคงที่ที่จำนวนรอบการกำจัดตั้งแต่ 5 รอบเป็นต้นไป โดยสามารถกำจัดได้ประมาณ 70-80 % ดังแสดงในรูปที่ 4.45 ซึ่งการลดลงดังกล่าวยังเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้และสามารถยืนยันถึงความเสถียรของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นได้เป็นอย่างดี

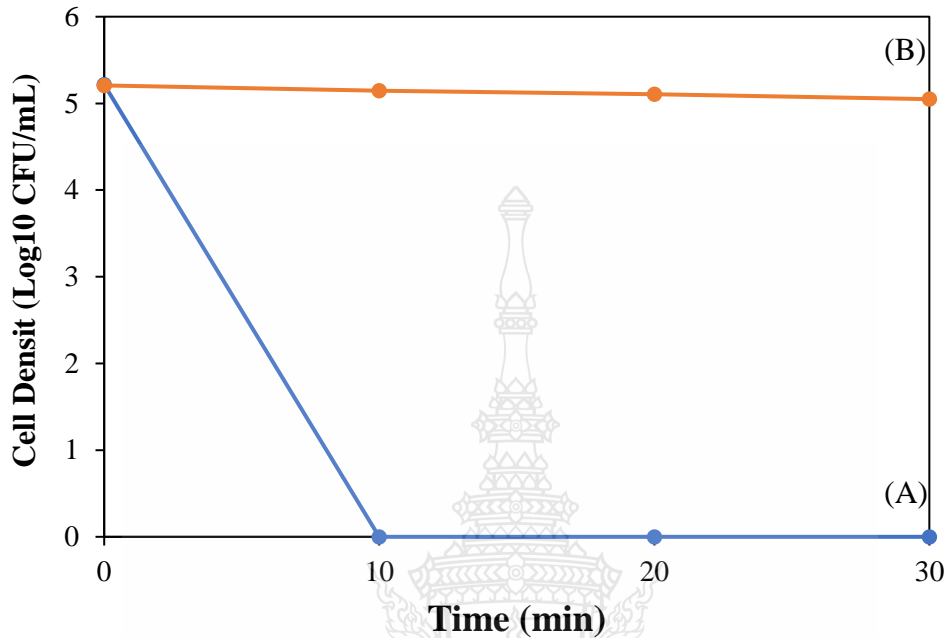


รูปที่ 4.45 ผลการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ สำหรับการกำจัด Methyl Red ที่เวลา 20 นาที โดยใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.4.7 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli*

การศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli* ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) ที่มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าและการให้แสงในช่วงที่ตามองเห็น โดยใช้สารละลาย 0.5 % NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เทียบกับการศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli* ที่ไม่ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก กล่าวคือไม่มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าหรือแสง ภายใต้สารละลาย 0.5 % NaCl (non-PEC) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้ทำการตรวจสอบการลดลงของเชื้อ *E. coli* โดยการติดตามการกำจัดทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการกำจัดเชื้อ *E. coli* ด้วยเทคนิค PEC มีประสิทธิภาพกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่า non-PEC อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยสามารถกำจัดเชื้อได้หมด 100% ที่เวลา 10 นาที ในขณะที่ non-PEC สามารถกำจัดได้เพียง

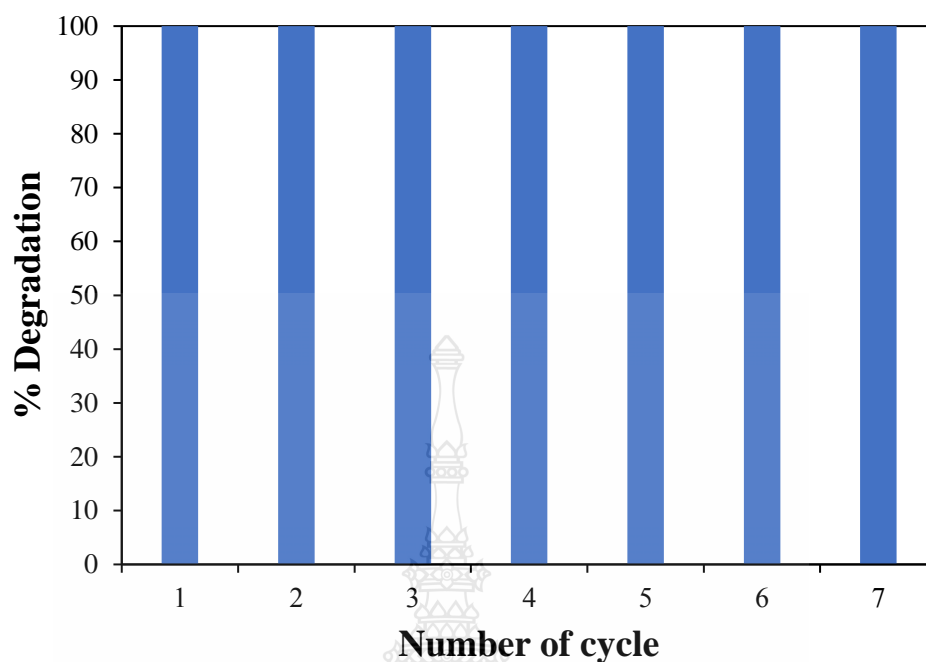
เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.46 เนื่องจากเทคนิค PEC เป็นเทคนิคที่มีการเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าและการเร่งด้วยแสง ในช่วงที่ตาเรามองเห็น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิเดชัน *E.coli* ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.46 ผลการกำจัดเชื้อ *E.coli* โดย (A) ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (PEC) และ (B) ไม่ใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (non-PEC) โดยใช้สารละลาย 0.5 % NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.4.8 ผลการศึกษาการใช้ขั้วไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อ *E. coli*

การศึกษาจำนวนรอบในการกำจัดเชื้อ *E. coli* ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าและการให้แสง ในช่วงที่ตาเรามองเห็น โดยใช้สารละลาย 0.5 % NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทำการศึกษาทั้งหมด 7 รอบ ได้ทำการตรวจสอบการลดลงของเชื้อ *E. coli* โดยการติดตามการกำจัดทุกๆ 10 นาที พบว่าเมื่อทำการกำจัดเชื้อ *E. coli* จำนวน 7 รอบ ยังสามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ 100% ดังรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มีความเสถียร และมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัด *E. coli* และยังสามารถใช้งานซ้ำได้เป็นอย่างดี



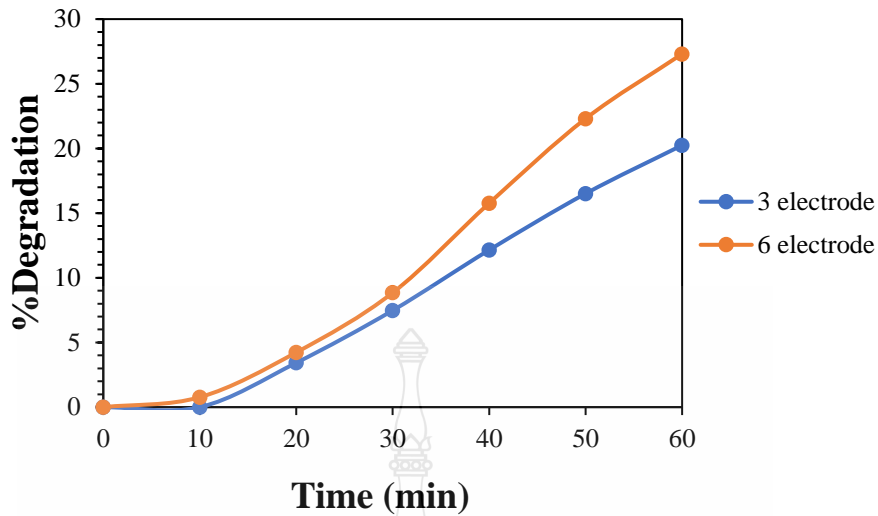
รูปที่ 4.47 ผลของการใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้นซ้ำในการกำจัดเชื้อ *E. coli* โดยใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก โดยใช้สารละลาย 0.5 % NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.5 ผลการศึกษาการออกแบบและสถานะที่เหมาะสมของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ และเชื้อ *E. coli*

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าในการกำจัด Methyl Red ของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการศึกษาอัตราเร็วในการหมุนที่ให้แก่ระบบ ค่าศักย์ไฟฟ้า ความเข้มแสง ลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 81 cm² ที่ความเข้มข้น 5 ppm Methyl Red ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M NaCl ปริมาตร 6,000 mL

4.5.1 ผลการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนด

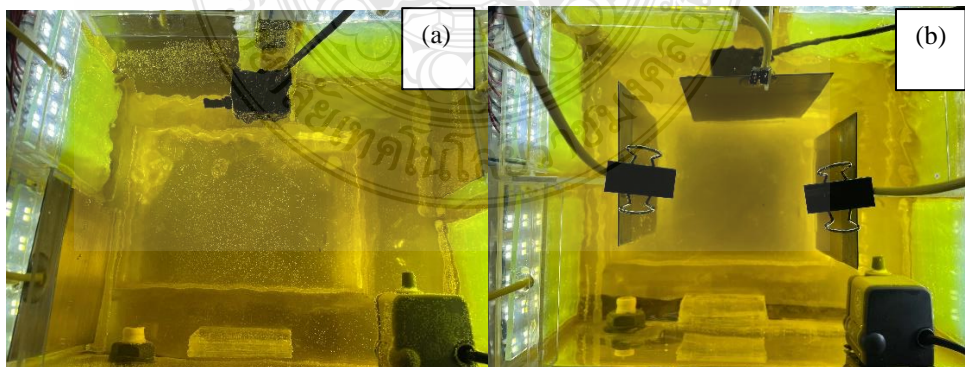
การศึกษานับขั้วไฟฟ้าแอโนด (FTO/BiVO₄) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัด Methyl Red ได้ทำการศึกษานับขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ 3 ขั้ว และ ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่ 6 ขั้ว พบว่าการใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ 3 ขั้ว สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 20% และ ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ 6 ขั้ว สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 27% ในระยะเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.48 เมื่อคำนวณหาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรสารละลายที่ใช้ พบว่าจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ 6 ขั้ว มีค่าพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับปริมาตรที่ใช้



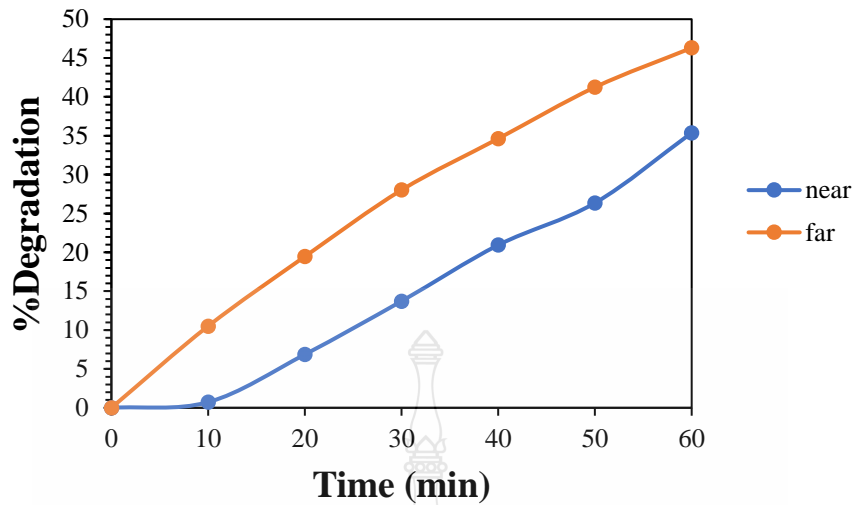
รูปที่ 4.48 ผลการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าแอโนดต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.5.2 ผลการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า

ในการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแอโนด และขั้วไฟฟ้าแคโทด พิจารณา ลักษณะการวางขั้วไฟฟ้า 2 ลักษณะ ลักษณะแรกคือ การวางขั้วไฟฟ้าแอโนดใกล้กับขั้วไฟฟ้าแคโทด ลักษณะที่สองคือ การวางขั้วไฟฟ้าแอโนดห่างกับขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังรูปที่ 4.49(a) และ 4.49(b) จากผลการทดลองการกำจัด Methyl Red พบว่าการวางขั้วไฟฟ้าแอโนดใกล้ขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถกำจัดได้ 35% และการวางขั้วไฟฟ้าแอโนดให้ห่างออกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถกำจัดได้ 46% แสดงให้เห็นว่าการวางขั้วไฟฟ้าห่างกันทำให้เกิดการสัมผัสสารที่ผิวหน้าได้ดีกว่า จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดี ดังรูปที่ 4.50



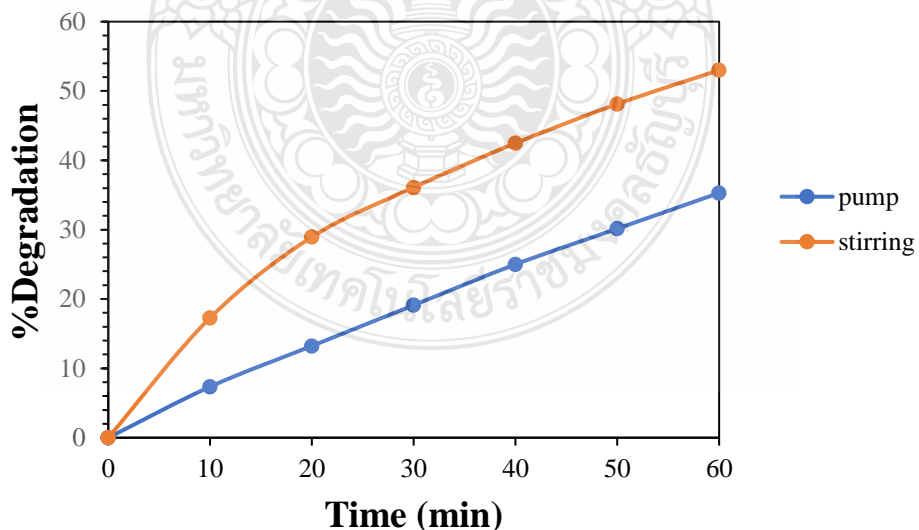
รูปที่ 4.49 แสดงลักษณะการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า (a) ขั้วไฟฟ้าแอโนดอยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าแคโทด และ (b) ขั้วไฟฟ้าแอโนดอยู่ห่างขั้วไฟฟ้าแคโทด



รูปที่ 4.50 ผลการศึกษาการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแอโนดใกล้(near) และไกล(far)กันต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.5.3 ผลการศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบ

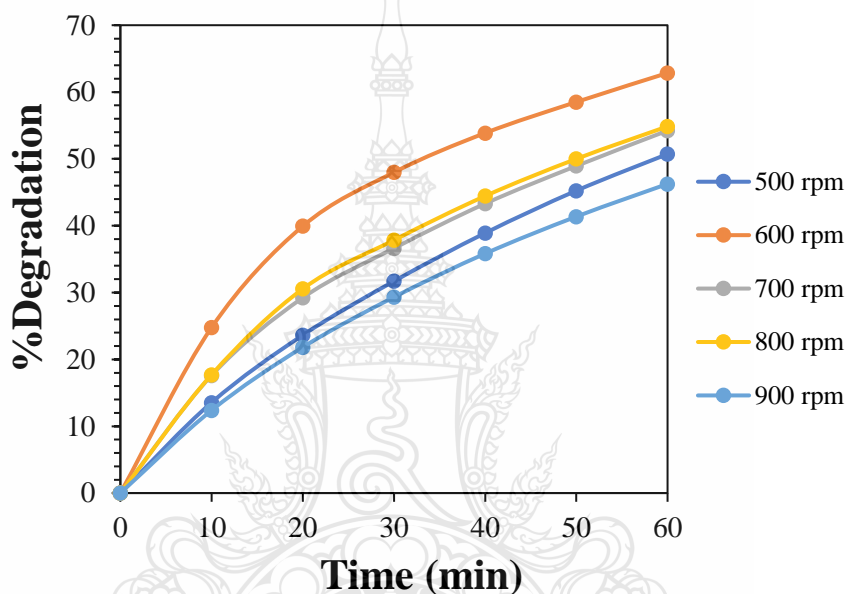
การศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบได้ทำการศึกษา 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้ pump และ การใช้ stirring ในการนำสารเข้าสู่ระบบ จากรูปที่ 4.51 พบว่าการนำสารเข้าสู่ระบบโดยใช้ stirring สามารถกำจัด Methyl Red ได้มากกว่าใช้ pump เนื่องจากการใช้ stirring สามารถควบคุมอัตราเร็วในการหมุนได้ดีกว่าการใช้ pump ทำให้มีการกระจายตัวของสารที่ดีกว่า เกิดการสัมผัสสารละลายที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ดีกว่า จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ดีกว่า



รูปที่ 4.51 ผลการศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.5.4 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการหมุนที่ให้แก่ระบบ

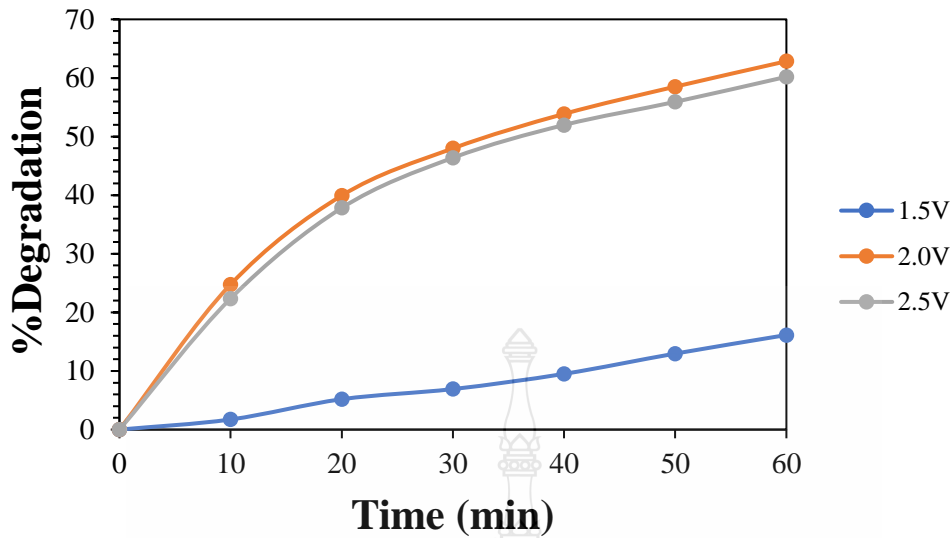
ในการศึกษาอัตราเร็วในการหมุนที่ให้แก่ระบบในการกำจัด Methyl Red ได้ศึกษาอัตราเร็วในช่วง 500-600 rpm จะเห็นได้ว่าความเร็วในการหมุนแรงมากขึ้นส่งผลต่อการกำจัด Methyl Red ที่มากตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มแรงหมุนมากขึ้นตั้งแต่ 700 – 900 rpm ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Methyl Red ลดลง อาจเกิดจากการที่ความเร็วในการหมุนมากเกินไปทำให้เวลาในการสัมผัสของสารที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยลง แสดงดังรูปที่ 4.52 จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลของความแรงในการหมุนที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.52 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการหมุนที่ให้แก่ระบบต่อการกำจัด Methyl Red โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.5.5 ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้า

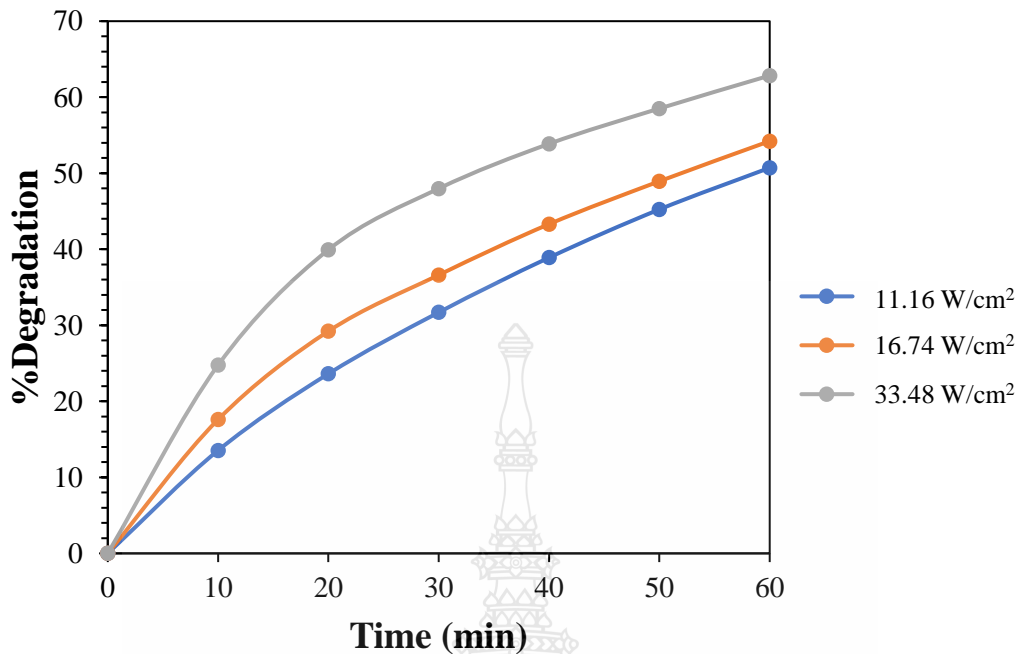
จากการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Methyl Red ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเพิ่มขึ้นจะไปช่วยเร่งการส่งผ่านของอิเล็กตรอนและเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนเข้าขั้วไฟฟ้าแคโทดได้ดี และที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแอโนดมี hole (h^+) มากขึ้นซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัด Methyl Red ได้ดีขึ้น แต่ถ้าใช้ศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 2 V ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง อาจเป็นผลมาจากการให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปทำให้ขั้วไฟฟ้าถูกทำลายหรือเกิดการหลุดของผิวหน้าขั้วไฟฟ้า รวมทั้งมีผลต่ออายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2 V ดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 ผลการศึกษาค่าศักย์ต่อการกำจัด MR โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.5.6 ผลของความเข้มแสง

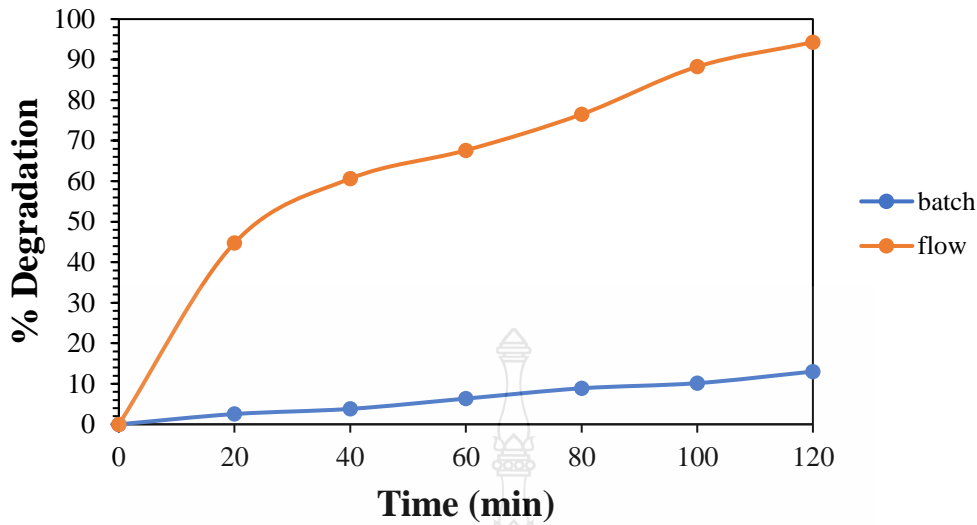
จากการศึกษาผลของความเข้มแสงสำหรับการกำจัด Methyl Red จากการทำงานร่วมกันระหว่างขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ได้ศึกษาที่ความเข้มแสงที่ 11.16, 16.74, 33.48 W/cm² พบว่าความเข้มแสงที่ 11.16 W/cm² สามารถกำจัดได้ 49%, 16.74 W/cm² สามารถกำจัดได้ 54% และ 33.48 W/cm² สามารถกำจัดได้ 61% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแสงจะช่วยกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน (e⁻) และช่องว่าง (h⁺) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ดังรูปที่ 4.54 แต่อย่างไรก็ตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.54 ผลการศึกษาความเข้มแสงต่อการกำจัด MR โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

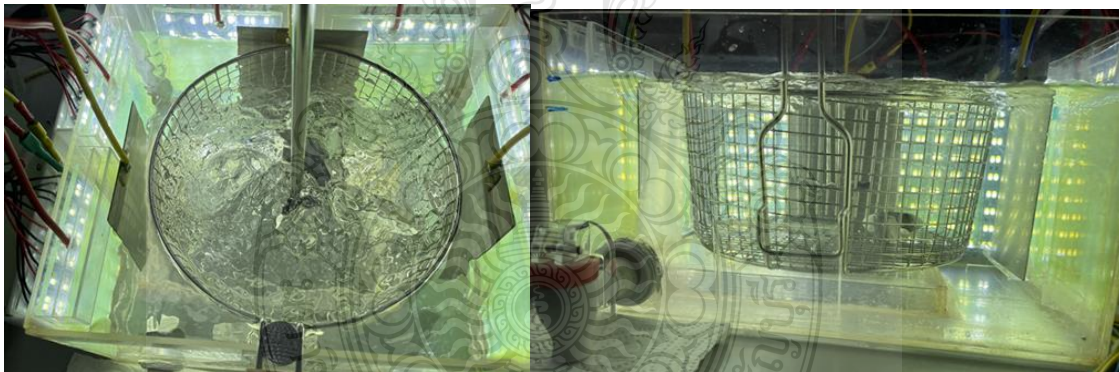
4.5.7 ผลการศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบ

จากการศึกษาการนำเข้าสู่สารตัวอย่างเข้าสู่เซลล์ต้นแบบโดยทำการศึกษาระบบที่ flow และ batch เป็นเวลา 120 นาที ดังรูปที่ 4.55 พบว่าระบบที่ทำการไหลผ่านของสารตัวอย่างต่อเนื่องสามารถกำจัด Methyl Red ได้ 94% และดีกว่าระบบที่ไม่มีการ flow สารละลายอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ มีการสัมผัสสารละลายตลอดเวลา จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีกว่าแบบไม่มีการ flow สารละลาย ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.55 ผลการศึกษาลักษณะการนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบต่อการกำจัด MR โดยใช้สารละลาย 0.5 M NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

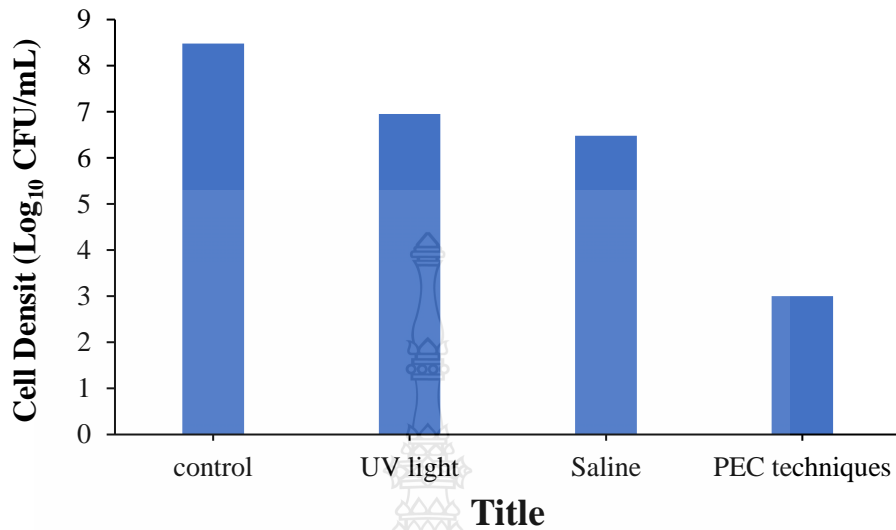
4.5.8 ผลการศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli* ของเซลล์ต้นแบบ



รูปที่ 4.56 เซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดเชื้อ *E. coli*

จากรูปที่ 4.56 ออกแบบเซลล์ต้นแบบในปริมาตร 6,000 mL โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ จำนวน 6 ขั้ว ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีล จำนวน 3 ขั้ว ในสารละลาย 0.5 % NaCl และให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 2 V ตลอดการกำจัด โดยทำการศึกษาการเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ในการกำจัดเชื้อ *E. coli* มีดังนี้ control, UV light, Saline (NaCl) และ PEC โดยทำการจุ่มชิ้นในเชื้อ *E. coli* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10^{8.5} CFU/mL เป็นเวลา 5 นาที ทุก ๆ ครั้ง แล้วนำศึกษาการกำจัดเชื้อ *E. coli* ด้วยกระบวนการให้แสงยูวี การจุ่มในน้ำเกลือ และการใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก เป็นเวลา 10 นาที ทุกกระบวนการ จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.57 พบว่าเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก สามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่า นำไปให้แสงยูวี และ จุ่มในน้ำเกลือ ในเวลา 10 นาที เนื่องจาก

เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก เป็นเทคนิคที่เร่งปฏิกิริยาทั้งแสงและศักย์ จึงมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชัน *E. coli* เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.57 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ในการกำจัดเชื้อ *E. coli*

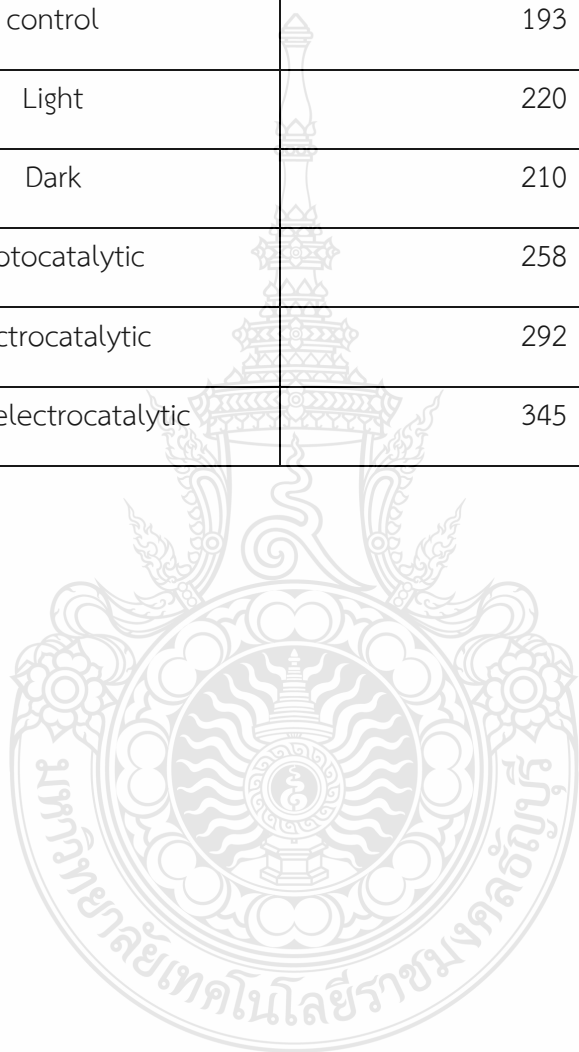
4.5 ผลการศึกษาศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation reduction potential, ORP) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชัน (การเกิดปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอน) และรีดักชัน (การเกิดปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอน) ของสารที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ภายใต้การศึกษากลไกการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 5 กลไก ได้แก่ 1) Photoelectrocatalytic (PEC) เป็นกลไกที่เร่งขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำทำงานภายใต้การให้ศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็น 2) Electrocatalytic (EC) เป็นกลไกที่เร่งขั้วไฟฟ้าด้วยศักย์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 3) Photocatalytic (PC) เป็นกลไกที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าด้วยแสงเพียงอย่างเดียว 4) Light คือกลไกนี้ให้แสงอย่างเดียว โดยไม่ใช้ขั้วไฟฟ้า และ 5) Dark กลไกที่ไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าและตัวเร่งปฏิกิริยาใดๆ โดยมีตัวแปรควบคุม (Control) ที่ไม่มีการเติมสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าและการเร่งปฏิกิริยาใดๆ จากตารางที่ 4.5 พบว่ากลไกโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก มีค่า ORP สูงที่สุดถึง 345 mV เมื่อเปรียบเทียบกับกลไก Electrocatalytic, Photocatalytic, Light, Dark และ control ตามลำดับ ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงกลไกการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทั้งศักย์ไฟฟ้าและแสงทำให้เกิดสารที่มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่สุด ส่งเสริมสมมติฐานการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (^oOH) หรือสารอื่นที่มีสมบัติที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี และทำให้ระบบมีศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ผลการศึกษาที่

สอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมและเชื้อจุลินทรีย์ที่มากที่สุดภายใต้กลไกการเร่งปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

สภาวะการศึกษา	ค่า ORP (mV)
control	193
Light	220
Dark	210
Photocatalytic	258
Electrocatalytic	292
Photoelectrocatalytic	345



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ บิสมัทนาเดตด้วยเทคนิคการตรึงฟิล์มบางแบบจุ่มเคลือบด้วยเครื่องจุ่มเคลือบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก สามารถขนาดสเกลได้ดี และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเพื่อประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็นและศักย์ไฟฟ้า โดยพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ เพื่อใช้เป็นชั้นไฟฟ้าแอโนด เพื่อศึกษาการทำงานร่วมกับชั้นไฟฟ้าแคโทดที่เป็นโลหะ ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ และสามารถออกแบบเซลล์ต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมและเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซลล์ต้นแบบสำหรับการล้างอุปกรณ์อาหารดังมีรายละเอียดแบ่งเป็นสองส่วนตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังนี้

ส่วนแรก สามารถพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ สภาวะที่เหมาะสมคือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นบิสมัทนาเดตเท่ากับ 0.0375 M โดยการตรึงสารกึ่งตัวนำ BiVO₄ 1 ชั้น ลงบนกระจกนำไฟฟ้า ที่เวลาในการจุ่มลงในสารละลาย 0 วินาที อัตราเร็วในการจุ่มลงของกระจกนำไฟฟ้า 25 mm/s อัตราเร็วในการดึงขึ้นของชั้นไฟฟ้า 30 mm/s และอุณหภูมิในการเผาชั้นไฟฟ้าที่ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พิจารณาจากค่ากระแสที่เกิดขึ้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำประสิทธิภาพสูงที่สุดภายใต้การเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งผลสอดคล้องกับคุณสมบัติต่างๆของชั้นไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบกับเทคนิคการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ พบว่า เทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติสามารถเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ที่สามารถให้ค่ากระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบใช้มือ และเทคนิคการหมุนเหวี่ยง นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันคุณลักษณะต่างๆของชั้นไฟฟ้าสอดคล้องกับการพัฒนาสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่สำคัญเราสามารถยืนยันได้ถึงความสามารถในการเตรียมชั้นไฟฟ้าซ้ำ ได้เป็นอย่างดีโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ที่ต่ำ ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการที่มีความแม่นยำสูงสำหรับการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ และยังสามารถขยายขนาดสเกลได้เป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาการเตรียมชั้นไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ ทำให้ได้ชั้นไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกในการ

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และสามารถประยุกต์ใช้กับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ต่อไปได้เป็นอย่างดี

ขั้นที่สองสามารถพัฒนาเซลล์ต้นแบบโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์ โดยใช้ Methyl Red เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ ที่ความเข้มข้น 5ppm ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3% NaCl ใช้ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำงานร่วมกับขั้วไฟฟ้าแอนโนด FTO/BiVO₄ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่ดี สามารถกำจัด Methyl Red ได้ถึง 72% ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่มีการเร่งขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็นและสามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยพบว่าที่เวลา 10 นาที สามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ทั้งหมด 100% และได้ออกแบบเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/BiVO₄ ขนาด 81 cm² เป็นขั้วไฟฟ้าแอนโนด และใช้ขั้วไฟฟ้าโลหะสแตนเลสสตีล ขนาด 81 cm² เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำงานร่วมกันภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยศักย์ไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตามองเห็น ที่สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ขั้วไฟฟ้าแอนโนด 3 ขั้ว วางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าแอนโนดห่างออกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด ใช้ stirring ในการพาสารเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ที่อัตราเร็วในการหมุน 600 rpm ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 2 V ความเข้มแสงที่ 33.48 W/cm² เมื่อทำการศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดแล้ว ในเวลา 2 ชั่วโมง สามารถกำจัด Methyl Red ได้ 94% ในปริมาตรสารละลาย 6,000 mL ที่สำคัญคือต้นแบบเซลล์โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้กับการกำจัดเชื้อ *E. coli* บนชั้นที่เป็นตัวแทนของอุปกรณ์อาหาร ได้ 100 % ในเวลา 10 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่า การใช้รังสียูวี การแช่ในน้ำเกลือ ที่เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้อย่างชัดเจน

จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือได้กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ FTO/BiVO₄ ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแบบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก สามารถเตรียมขั้วไฟฟ้าซ้ำและขยายสเกลได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในสารละลายน้ำ ที่สำคัญคือสามารถประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงานสำหรับการพัฒนาเซลล์ต้นแบบเคมีไฟฟ้าขั้นสูงด้วยหลักการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์บนเบื่อนบนอุปกรณ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะที่จะพัฒนาต่อยอดเพื่อการผลิตเครื่องล้างอุปกรณ์อาหารเพื่อกำจัดเชื้อโรคให้กับสถานที่ต่างๆที่ต้องใช้อุปกรณ์อาหารกับกลุ่มคนจำนวนมาก รวมถึงการประยุกต์ใช้กับครัวเรือนในอนาคตได้เป็นอย่างดี

บรรณานุกรม

- [1] M.G. Muellner, E.D. Wagner, K. McCalla, S.D. Richardson, Y.-T. Woo, M.J. Plewa, Haloacetonitriles vs. Regulated Haloacetic Acids: Are Nitrogen-Containing DBPs More Toxic?, *Environmental Science & Technology*, 41 (2007) 645-651.
- [2] W.A.M. Hijnen, E.F. Beerendonk, G.J. Medema, Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review, *Water Research*, 40 (2006) 3-22.
- [3] A.I. Silverman, B.M. Peterson, A.B. Boehm, K. McNeill, K.L. Nelson, Sunlight Inactivation of Human Viruses and Bacteriophages in Coastal Waters Containing Natural Photosensitizers, *Environmental Science & Technology*, 47 (2013) 1870-1878.
- [4] K.G. McGuigan, R.M. Conroy, H.-J. Mosler, M.d. Preez, E. Ubomba-Jaswa, P. Fernandez-Ibañez, Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top, *Journal of Hazardous Materials*, 235-236 (2012) 29-46.
- [5] A. Erkan, U. Bakir, G. Karakas, Photocatalytic microbial inactivation over Pd doped SnO₂ and TiO₂ thin films, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 184 (2006) 313-321.
- [6] E.J. Wolfrum, J. Huang, D.M. Blake, P.-C. Maness, Z. Huang, J. Fiest, W.A. Jacoby, Photocatalytic Oxidation of Bacteria, Bacterial and Fungal Spores, and Model Biofilm Components to Carbon Dioxide on Titanium Dioxide-Coated Surfaces, *Environmental Science & Technology*, 36 (2002) 3412-3419.
- [7] N. Lagopati, P.V. Kitsiou, A.I. Kontos, P. Venieratos, E. Kotsopoulou, A.G. Kontos, D.D. Dionysiou, S. Pispas, E.C. Tsilibary, P. Falaras, Photo-induced treatment of breast epithelial cancer cells using nanostructured titanium dioxide solution, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 214 (2010) 215-223.
- [8] J. Choi, H. Park, M.R. Hoffmann, Effects of Single Metal-Ion Doping on the Visible-Light Photoreactivity of TiO₂, *The Journal of Physical Chemistry C*, 114 (2010) 783-792.
- [9] Q. Li, R. Xie, Y.W. Li, E.A. Mintz, J.K. Shang, Enhanced Visible-Light-Induced Photocatalytic Disinfection of *E. coli* by Carbon-Sensitized Nitrogen-Doped Titanium Oxide, *Environmental Science & Technology*, 41 (2007) 5050-5056.
- [10] J. Huang, W. Ho, X. Wang, Metal-free disinfection effects induced by graphitic carbon nitride polymers under visible light illumination, *Chemical Communications*, 50 (2014) 4338-4340.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [11] S.B. Gawande, K.B. Gawande, S.R. Thakare, N.R. Manwar, V.R. Mate, Photocatalytic degradation of phenol over novel rod shaped Graphene@BiPO₄ nanocomposite, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 85 (2015) 132-137.
- [12] H. Wang, X. Yuan, Y. Wu, G. Zeng, H. Dong, X. Chen, L. Leng, Z. Wu, L. Peng, In situ synthesis of In₂S₃@MIL-125(Ti) core-shell microparticle for the removal of tetracycline from wastewater by integrated adsorption and visible-light-driven photocatalysis, *Applied Catalysis B: Environmental*, 186 (2016) 19-29.
- [13] F. López-Gálvez, G.D. Posada-Izquierdo, M.V. Selma, F. Pérez-Rodríguez, J. Gobet, M.I. Gil, A. Allende, Electrochemical disinfection: An efficient treatment to inactivate *Escherichia coli* O157:H7 in process wash water containing organic matter, *Food Microbiology*, 30 (2012) 146-156.
- [14] P. Chatchai, Y. Murakami, S.-y. Kishioka, A.Y. Nosaka, Y. Nosaka, Efficient photocatalytic activity of water oxidation over WO₃/BiVO₄ composite under visible light irradiation, *Electrochimica Acta*, 54 (2009) 1147-1152.
- [15] Z. Liu, Q. Wang, W. Rong, R. Jin, Y. Cui, S. Gao, CTAB assisted hydrothermal preparation of Bi₂WO₆/WO₃ nanosheets on TiO₂ nanotube arrays for photoelectrocatalytic applications, *Separation and Purification Technology*, 200 (2018) 191-197.
- [16] M. Poladia, P. Fakatkar, S.S.J.s.I.C.o.N.G.C.T. Rathod, Designing an economical system to detect *Escherichia coli* bacteria colonies in remote locations for water quality assessment, (2015) 471-474.
- [17] N. Kangkun, N. Kiama, N. Saito, C. Ponchio, Optical properties and photoelectrocatalytic activities improvement of WO₃ thin film fabricated by fixed-potential deposition method, *Optik*, 198 (2019) 163235.
- [18] C.A.K. Gouvêa, F. Wypych, S.G. Moraes, N. Durán, N. Nagata, P. Peralta-Zamora, Semiconductor-assisted photocatalytic degradation of reactive dyes in aqueous solution, *Chemosphere*, 40 (2000) 433-440.
- [19] W. Yin, W. Wang, L. Zhou, S. Sun, L. Zhang, CTAB-assisted synthesis of monoclinic BiVO₄ photocatalyst and its highly efficient degradation of organic dye under visible-light irradiation, *Journal of Hazardous Materials*, 173 (2010) 194-199.
- [20] M. Rismanchian, S. Barakat, N. Khoshzat, R. Keshavarzi, M. Shakerian, Investigation of TiO₂/zeolite photocatalytic activity for Safranin dye removal of aqueous solution, *International Journal of Environmental Health Engineering*, 4 (2015) 4.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [21] S. Gorjian, H. Ebadi, Chapter 1 - Introduction, in: S. Gorjian, A. Shukla (Eds.) Photovoltaic Solar Energy Conversion, Academic Press 2020, pp. 1-26.
- [22] F. Opoku, K.K. Govender, C.G.C.E. van Sittert, P.P. Govender, Recent Progress in the Development of Semiconductor-Based Photocatalyst Materials for Applications in Photocatalytic Water Splitting and Degradation of Pollutants, *Advanced Sustainable Systems*, 1 (2017) 1700006.
- [23] I.A. Neacșu, A.I. Nicoară, O.R. Vasile, B.Ș. Vasile, Chapter 9 - Inorganic micro- and nanostructured implants for tissue engineering, in: A.M. Grumezescu (Ed.) *Nanobiomaterials in Hard Tissue Engineering*, William Andrew Publishing 2016, pp. 271-295.
- [24] G. Amokrane, C. Falentin-Daudré, S. Ramtani, V. Migonney, A Simple Method to Functionalize PCL Surface by Grafting Bioactive Polymers Using UV Irradiation, *IRBM*, 39 (2018).
- [25] G. Faraji, H.S. Kim, H.T. Kashi, Introduction, in: G. Faraji, H.S. Kim, H.T. Kashi (Eds.) *Severe Plastic Deformation*, Elsevier 2018, pp. 1-17.
- [26] H.O. Soonmin, A review of nanostructured thin films for gas sensing and corrosion protection, *Mediterranean Journal of Chemistry*, 7 (2018) 433.
- [27] N. Bhardwaj, S.C. Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advances*, 28 (2010) 325-347.
- [28] R.C. Mehrotra, A. Singh, S. Sogani, Recent Advances in the Chemistry of Homo- and Heterometallic Alkoxides of p-Block Metal(loid)s, *Chemical Reviews*, 94 (1994) 1643-1660.
- [29] Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, M. Kumar, Growing carbon nanotubes, *Materials Today*, 7 (2004) 22-29.
- [30] F. Niu, D. Chen, L. Qin, T. Gao, N. Zhang, S. Wang, Z. Chen, J. Wang, X. Sun, Y. Huang, Synthesis of Pt/BiFeO₃ heterostructured photocatalysts for highly efficient visible-light photocatalytic performances, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 143 (2015) 386-396.
- [31] K.-H. Ye, Z. Chai, J. Gu, X. Yu, C. Zhao, Y. Zhang, W. Mai, BiOI–BiVO₄ photoanodes with significantly improved solar water splitting capability: p–n junction to expand solar adsorption range and facilitate charge carrier dynamics, *Nano Energy*, 18 (2015) 222-231.
- [32] M. Pirhashemi, A. Habibi-Yangjeh, Ternary ZnO/AgBr/Ag₂CrO₄ nanocomposites with tandem n–n heterojunctions as novel visible-light-driven photocatalysts with excellent activity, *Ceramics International*, 41 (2015) 14383-14393.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [33] N. Güy, K. Atacan, İ. Yıldırım, M. Özacar, Insight into the efficient photocatalytic removal mechanism of organic pollutants by plasmonic Z-scheme MoS₂/Ag/Ag₃VO₄ heterojunction under visible light, *Journal of Molecular Liquids*, 326 (2021) 115311.
- [34] A. Galińska, J. Walendziewski, Photocatalytic Water Splitting over Pt–TiO₂ in the Presence of Sacrificial Reagents, *Energy & Fuels*, 19 (2005) 1143-1147.
- [35] P. Chatchai, S.-y. Kishioka, Y. Murakami, A.Y. Nosaka, Y. Nosaka, Enhanced photoelectrocatalytic activity of FTO/WO₃ / BiVO₄ electrode modified with gold nanoparticles for water oxidation under visible light irradiation, *Electrochimica Acta*, 55 (2010) 592-596.
- [36] H.-z. Cao, C.-j. Tong, H.-b. Zhang, G.-q. Zheng, Mechanism of MoO₂ electrodeposition from ammonium molybdate solution, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29 (2019) 1744-1752.
- [37] J. Su, L. Guo, N. Bao, C.A. Grimes, Nanostructured WO₃/BiVO₄ Heterojunction Films for Efficient Photoelectrochemical Water Splitting, *Nano Letters*, 11 (2011) 1928-1933.
- [38] X. Zhang, Z. Ai, F. Jia, L. Zhang, X. Fan, Z.J.M.C. Zou, Physics, Selective synthesis and visible-light photocatalytic activities of BiVO₄ with different crystalline phases, 103 (2007) 162-167.
- [39] N. Kiama, C. Ponchio, Photoelectrocatalytic performance improvement of BiVO₄ thin film fabrication via effecting of calcination temperature strategy, *Surface and Coatings Technology*, 383 (2020) 125257.
- [40] T. Sharifi, D. Jozić, M. Kovačić, H. Kušić, A. Lončarić Božić, In-situ high temperature XRD study on thermally induced phase changes of BiVO₄: The formation of an iso-type heterojunction, *Materials Letters*, 305 (2021) 130816.
- [41] I. Khan, A.Z. Khan, A. Sufyan, M.Y. Khan, S. Inayath Basha, A. Khan, Ultrasonically controlled growth of monodispersed octahedral BiVO₄ microcrystals for improved photoelectrochemical water oxidation, *Ultrasonics Sonochemistry*, 68 (2020) 105233.
- [42] D. Xu, T. Xia, W. Fan, H. Bai, J. Ding, B. Mao, W. Shi, MOF-derived Co₃O₄ thin film decorated BiVO₄ for enhancement of photoelectrochemical water splitting, *Applied Surface Science*, 491 (2019) 497-504.
- [43] B.O. Orimolade, B.A. Koiki, G.M. Peleyeju, O.A. Arotiba, Visible light driven photoelectrocatalysis on a FTO/BiVO₄/BiOI anode for water treatment involving emerging pharmaceutical pollutants, *Electrochimica Acta*, 307 (2019) 285-292.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [44] K. Sekiguchi, K.-i. Katsumata, H. Segawa, T. Nakanishi, A. Yasumori, Effects of particle size, concentration and pore size on the loading density of silica nanoparticle monolayer arrays on anodic aluminum oxide substrates prepared by the spin-coating method, *Materials Chemistry and Physics*, 277 (2022) 125465.
- [45] S.M. Patil, A.G. Dhodamani, S.A. Vanalakar, S.P. Deshmukh, S.D. Delekar, Multi-applicative tetragonal TiO₂/SnO₂ nanocomposites for photocatalysis and gas sensing, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 115 (2018) 127-136.
- [46] S.S. Kalanur, Y.J. Lee, H. Seo, A versatile synthesis strategy and band insights of monoclinic clinobisvanite BiVO₄ thin films for enhanced photoelectrochemical water splitting activity, *Applied Surface Science*, 562 (2021) 150078.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

ภาคผนวก ก

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อ (Culture medium) หมายถึงอาหารซึ่งมีส่วนประกอบของสารอาหารที่เอื้ออำนวยให้จุลินทรีย์เจริญและแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวน โดยจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน มีความต้องการสารอาหาร ตลอดจนสภาพความเป็นกรดต่าง (pH) ของอาหารแตกต่างกัน ซึ่งอาหารเลี้ยงเชื้อโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีธาตุอาหารและความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์
2. มีความเป็นกรดและต่าง (pH) ที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์
3. ปราศจากสารพิษที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์
4. ปราศจากสิ่งมีชีวิตชนิดใด ๆ ในอาหารเลี้ยงเชื่อนั้น

อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในงานทางจุลชีววิทยามีหลายลักษณะ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความต้องการธาตุอาหาร ตลอดจน pH ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ จึงต่างกันไปตามความต้องการของจุลินทรีย์และวัตถุประสงค์ของการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในงานทางจุลชีววิทยามีหลายลักษณะ เช่น อาหารเหลว (Broth) อาหารแข็ง (Solid medium) โดยการเติมวุ้น 1.5 – 2.0 % เป็นตัวทำให้แข็ง ถ้าอาหารแข็งบรรจุในหลอดทดสอบและทำให้แข็งในลักษณะที่เอียงเป็นแนวลาด เรียก Slant Agar แต่ถ้าแข็งในลักษณะหลอดทดลองตั้งตรงเรียก Agar Deep Tube แต่ถ้าบรรจุในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) เรียก Agar Plate นอกจากนี้ ยังมีอาหารลักษณะกึ่งแข็ง (Semi – solid) ที่เติมผง วุ้น (Agar) เพียง 0.3 – 0.5 % เพื่อใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของแบคทีเรีย

วัตถุประสงค์ของการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ มีหลายประการ เช่น เพื่อแยกเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อศึกษาลักษณะการเจริญ เพื่อการจำแนกชนิดของจุลินทรีย์ เพื่อเพาะเลี้ยงเซลล์ เพื่อเก็บรักษาเชื้อจุลินทรีย์

ภาคผนวก





ภาคผนวก ข

ผลงานเผยแพร่ทางวิชาการ

Highly practical and reproducible BiVO₄ thin film fabrication using automatic dip-coating machine towards for photoelectrocatalytic activities improvement

Praewnapa Tomkham^a, Chowarit Mitsantisuk^b and Chatchai Ponchio^{b,c}

^aDepartment of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Phatumtani, Thailand;

^bDepartment of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Chatuchak, Thailand; ^cAdvanced Materials Design and Development (Amdd) Research Unit, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

ABSTRACT

This research developed a simple method for bismuth vanadate (BiVO₄) thin film using an automatic dip-coating method. A precursor solution concentration, dipping speed, and calcination temperature were optimized to obtain the highest photoelectrocatalytic (PEC) BiVO₄ electrode for water oxidation. The BiVO₄ electrode was applied to organic dye degradation and studied the catalytic mechanism at the electrode surface. A calcination temperature of 450 °C was optimized for BiVO₄ photoanode preparation for the highest PEC water oxidation and had good charge transfer process properties. The proposed automatic dip-coating method presents high efficiency for the large scale of BiVO₄ electrode fabrication, and it was highly reproducible at a low relative standard deviation of less than 5%. The developed BiVO₄ electrode can eliminate methyl red organic dyes by more than 70% within 1 hour. This research offers a new alternative approach for a simple, convenient, reproducible, and scaled-up method for semiconductor thin film fabrication.

ARTICLE HISTORY

Received 25 June 2021
Accepted 10 October 2021

KEYWORDS

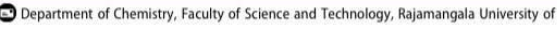
Dip coating; BiVO₄ thin film; photoelectrocatalytic oxidation; organic dye degradation

Introduction

The photoelectrocatalytic (PEC) process is continually being developed for energy and environmental applications because it is highly efficient, involves low power consumption, is not complicated, and is environmentally friendly [1–7]. The PEC process development usually includes selecting the appropriate semiconductor for the target reaction and improvement of the semiconductor film fabrication on the electrode substrate. Bismuth vanadate (BiVO₄) is one of the most common semiconductors that researchers select for organic matter degradation by the PEC process due to its good absorbance of visible light and high positive potential of valence band position suitable for oxidising the organic substances in aqueous solution [8–14]. The critical point for developing BiVO₄ electrodes in the PEC process is developing the BiVO₄ film deposition on the electrode substrate. The main goals of the development are effectiveness in the target reaction, a simple method, an uncomplicated process, good reproducibility, and being able to scale up for application on a larger scale [15–19]. There are many methods of BiVO₄ film fabrication, such as an electrochemical method [20–23], a spray method [24,25], a spin-coating method [26–28], a sputtering method [29], a hydrothermal method [30], and a dip-coating method [31–34]. Of all the BiVO₄ film preparation methods mentioned, a simple and well-scalable method is the dip-coating method. However, the artificial dip-coated film

deposition has significant limitations, such as being non-reproducible and incompatible for large-scale preparation processes. Therefore, the application of an automatic dip-coating machine is a promising alternative to address this limitation. Importantly, there have been no research reports on the development of BiVO₄ film preparation using an automatic dip-coating machine.

Therefore, the objective of this research was to develop a BiVO₄ film preparation technique with an automatic dip-coating machine, manufactured by a Thai company, that can control various essential parameters in the dip-coating process thoroughly and support the application of large-sized electrode substrates suitable for industrial application. We studied and developed the BiVO₄ electrode preparation, characterisation, and application to remove organic dyes, as shown in the following sections. A significant novelty of this research is the ability to prepare BiVO₄ semiconductor thin films in a simple method, good scaling up, and a highly reproducible process. The automatic dip coating machine cooperated to study the optimum conditions for the initial precursor solution, the deposition process, and calcination temperature are essential in preparing the electrodes in simple, quick, repeatable, and scalable applications. It is suitable for application in PEC process development for future applications for energy and environmental management.

CONTACT Chatchai Ponchio  chatchai@rmutt.ac.th 

© 2021 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

Experiment

BiVO₄ thin film fabrication improvement

Conducting glass fluorine-doped tin oxide (FTO, Bangkok Solar Co. Ltd., Thailand) was cleaned and used as a substrate. A precursor 0.1 M BiVO₄ solution was prepared by mixing 0.2 M of bismuth nitrate pentahydrate (Bi(NO₃)₃·5H₂O, Sigma-Aldrich) in acetic acid (CH₃COOH, RCI Labscan) solution and 0.2 M of vanadium oxide acetylacetonate (C₁₀H₁₄O₅V, Merck) in acetylacetonate (C₅H₈O₂, Merck) solution. The mixed BiVO₄ precursor solution was then homogenised using a stirrer and ultrasonic process for 30 min. Figure 1 shows an automatic dip-coating machine (Kazem Corporation Co., Ltd., Thailand) to prepare BiVO₄ films on the FTO substrate. The proposed dip coating machine is XYZ type cartesian robot system using a teaching box. The stepping motor are used to control X-axis for horizontal movement of the FTO substrate and to move Y-axis for dip coating tank. The trajectory planning of Z-axis for vertical movement of FTO substrate is needed to achieve high-performance position and velocity accuracy. Therefore, AC servo motor with closed-loop PID controller is applied to control Z-axis. High mechanical efficiency can be obtained by using low friction ball screw system. The gripper with pneumatic is designed to grip a mirror with the maximum size at 1,000 × 1,000 mm. In the dip-coating development process, we studied the effects of the initial BiVO₄ precursor

solution concentrations, dipping speed, dip-coating time, lifting speed, and number of layer depositions. The optimised calcination temperature of the dip-coated FTO/BiVO₄ ranges from 300 to 600°C. We determined the optimum conditions based on the highest PEC water oxidation activity of the prepared BiVO₄ electrodes. FTO/BiVO₄ prepared by traditional spin-coating [27] and manual dip-coating methods [2] were studied to compare the PEC properties and characteristic improvement of the introduced automatic dip-coating method.

Characterisation and PEC activities study

The morphology of the top view of the fabricated FTO/BiVO₄ electrode surface was studied using a scanning electron microscope (SEM, JSM-5410LV). X-ray diffraction (XRD, JDX-3530) in the 2θ range from 20° to 70° was investigated to approve the crystalline structure of the BiVO₄ film. An energy-dispersive x-ray spectrometer (EDX, LINK ISIS300) was used to confirm the elemental composition of the prepared BiVO₄ film. The absorption property was studied using a UV/Vis spectrophotometer (Shimadzu, UV-1601). The PEC activity for water oxidation and charge transfer resistance was studied using a voltammetry analyser (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.

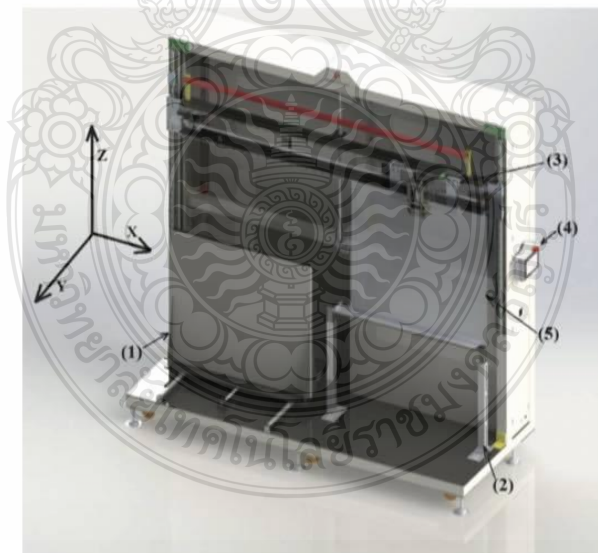


Figure 1. Automatic dip-coating machine: (1) dip-coating tank, (2) substrate holder, (3) gripper, (4) teaching box, and (5) FTO substrate.

Organic dye degradation study

We used the prepared FTO/BiVO₄ as an anode electrode and stainless steel as a cathode electrode to study the organic dye degradation under applied potential of 2.0 V and visible light irradiation conditions. Methyl red (MR) in sodium chloride (NaCl) electrolyte solution was used to study the organic dye degradation efficiency. A PEC cell reactor for MR dye removal was designed by setting up the 9 × 9 cm² anode electrodes parallel to the exact size of cathode electrodes in a 6,000 mL container. A light-emitting diode (1.24 W/cm² [2]) visible light source is placed outside the PEC cell and positioned close to the anode electrode side. DC power supply (NPS306W) was used to control the constant voltage at both electrodes while the anode electrode was irradiated throughout the organic dye removal process. We studied the effect of initial MR concentration, NaCl electrolyte solution concentration, calcination temperature of BiVO₄ electrode preparation, and catalytic mechanism by considering the MR degradation efficiency. We measured the absorbance of MR dye relative to removal time at a wavelength of 435 nm using a UV/Vis spectrophotometer (Shimadzu, UV-1601). The MR degradation efficiency was studied by calculating the percentage of MR degradation, as show in the follow equation:

$$\% \text{ MRdegradation} = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

where A_0 is the initial absorbance of MR and A_t is the absorbance of MR at given time t .

Results and discussion

Optimisation and characterisation of the BiVO₄ electrode fabrication

The BiVO₄ thin film deposition on FTO substrate with the automatic dip-coating method by studying essential factors such as initial BiVO₄ precursor solution concentration, speed of dip-coating process, and calcination temperature parameters. The criteria for the optimisation study were the highest photocurrent from water oxidation and good characteristic properties.

Optimisation of the BiVO₄ electrode preparation process

The concentration of the BiVO₄ precursor solution has a significant effect on the photocurrent of the prepared FTO/BiVO₄ electrode. (Figure 2(a)) shows that the water oxidation photocurrent of the prepared FTO/BiVO₄ electrode is proportional to the BiVO₄ precursor solution concentration from 0.025 M to 0.0375 M. However, the results showed the opposite effect when the initial precursor solution concentration was increased by 0.05 to 0.1 M. We confirmed that the proper precursor solution

concentration resulted in the adhesion efficiency of the semiconductor film to the electrode surface and effective control of the fabricated electrode's PEC activity. The number of immersion layers is another factor influencing the properties of the prepared BiVO₄ electrode. (Figure 2(b)) shows that the number of dip-coating layers is inversely proportional to the oxidation efficiency of the prepared BiVO₄ electrode, and it is optimised at 1 layer. Increasing the number of layers in the dip coating resulted in decreasing PEC activity due to low charge transferred at the high thickness layer of the fabricated BiVO₄ electrode. The dipping speed of the FTO substrate into the precursor solution, dipping time, and lifting speed of the substrate from the solution were optimised to obtain the most efficient PEC water oxidation of the prepared BiVO₄ electrode, as shown in (Figure 2(c,d)). We found that at high dipping and lifting speeds and a short time of immersion in the solution, we could obtain smooth, homogeneous, and thin film properties of the prepared BiVO₄ electrode. We discovered that light could pass through well with the appropriate BiVO₄ content at the electrode surface, resulting in high PEC activity for water oxidation. The optimum conditions for the BiVO₄ electrode preparation using an automatic dip-coating machine are summarised as an initial precursor BiVO₄ solution concentration of 0.0375 M, dipping speed of 25 mm/s, lifting speed of 30 mm/s, and 1-layer deposition condition.

Effect of calcination temperature

The calcination temperature is one of the essential factors affecting the characteristic and PEC properties of the prepared BiVO₄ electrodes after the dip-coating process. (Figure 3(a)) shows the yellow thin film colour after calcination at the temperature from 300 to 600°C, consistent with the colour of the monoclinic BiVO₄ semiconductor [8,35]. We noticed that the thin film appearance was not homogeneous when the calcination temperature was too high, from 550 to 600°C, likely due to the thin film peeling off the electrode surface. We found that a calcination temperature of 450°C resulted in a highly efficient PEC activity for water oxidation and a good homogeneous thin film. (Figure 3(b)) shows the lowest charge transfer resistance (R_{ct}) at the electrode/electrolyte interface at a calcination temperature of 450°C, which is related to the highest photocurrent in (Figure 3(a)). The results demonstrate that a suitable calcination temperature affects the reduction of the charge transfer resistance at the BiVO₄ electrode/electrolyte interface, resulting in enhancing the PEC activities of the fabricated FTO/BiVO₄ electrode. Significantly, this calcination temperature directly affects the change in the crystal structure of the BiVO₄ semiconductor at the electrode surface. (Figure 3(c)) shows that the crystal structure of BiVO₄ changed to monoclinic when the calcination temperature increased over 300°C. These results were consistent with the yellow colour of monoclinic BiVO₄ after calcination at

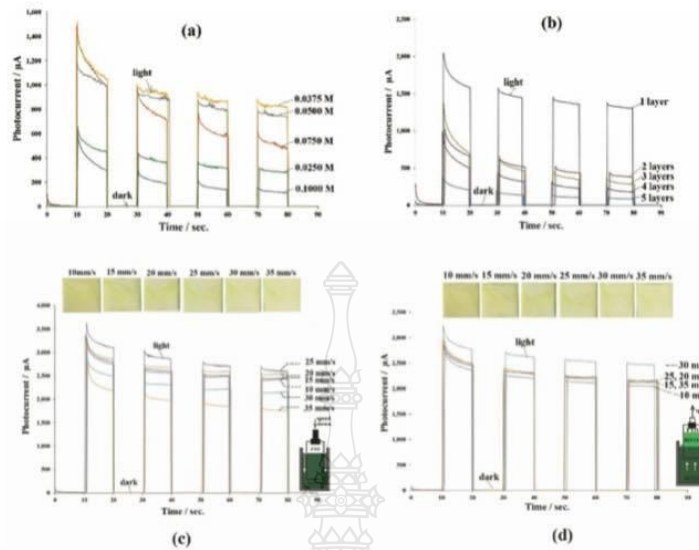


Figure 2. An optimisation study on the BiVO₄ thin film preparation process with an automatic dip-coating machine, varying the essential parameters and considering the PEC water oxidation and the characteristic properties of the fabricated BiVO₄ electrode: (a) effect of precursor solution concentration, (b) effect of number of BiVO₄ deposition layers, (c) effect of dipping speed of the FTO substrate into the precursor solution, and (d) effect of lifting speed of the substrate from the precursor solution.

a temperature over 300°C. The XRD pattern at 2θ of 28.9° and 30.6° is good, related to the high photocatalytic crystalline structure of the monoclinic BiVO₄ semiconductor (JCPDS no 14-0688) [36–38]. This became more

evident when the calcination temperature was raised above 400°C, consistent with good PEC activity results under 450°C conditions. We also confirmed the tetragonal SnO₂ crystal structure (JCPDS no. 041-1445) [39,40]

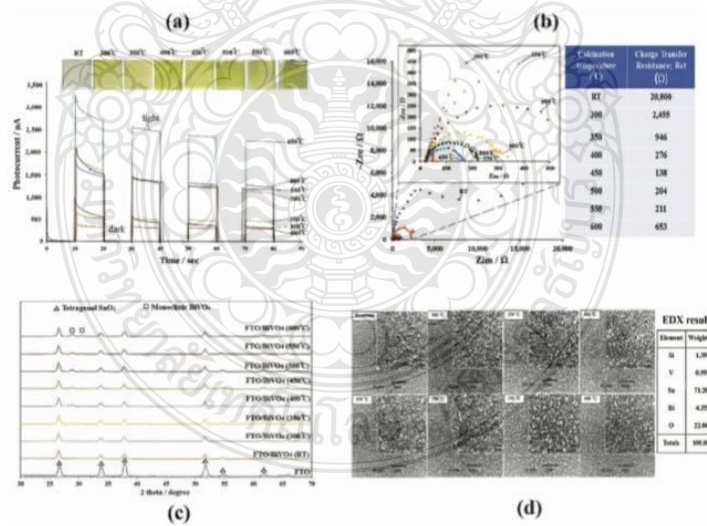


Figure 3. Effect of calcination temperature on the fabricated BiVO₄ electrode using an automatic dip-coating machine: (a) photocurrent response from water oxidation and the characteristics of the prepared BiVO₄ electrode, (b) Nyquist plot and charge transfer resistance (Rct) value under visible light irradiation and applied potential of 1.0 V, (c) XRD pattern of FTO and FTO/BiVO₄ electrode, and (d) SEM images and EDX results.

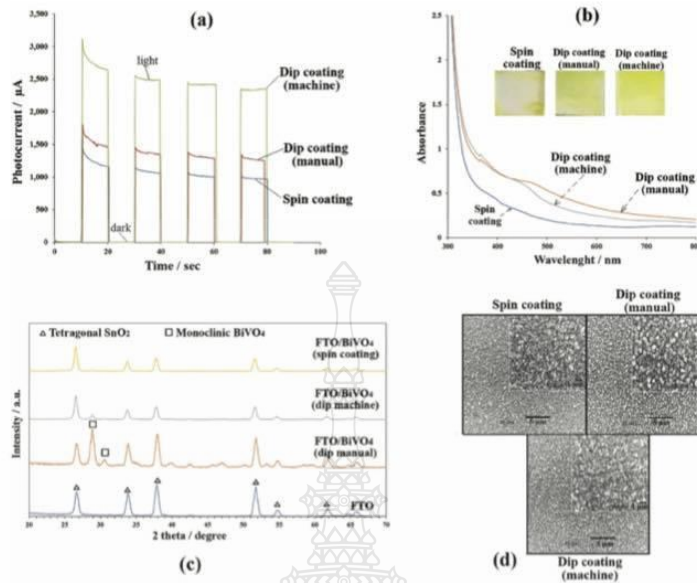


Figure 4. Comparison of the PEC activities and characteristic properties of BiVO_4 electrodes prepared by the developed automatic dip-coating machine and the traditional manual dip-coating and spin-coating methods: (a) photocurrent response from water oxidation under visible light irradiation and applied potential of 1.0 V, (b) absorbance and photograph, (c) XRD patterns, and (d) SEM images.

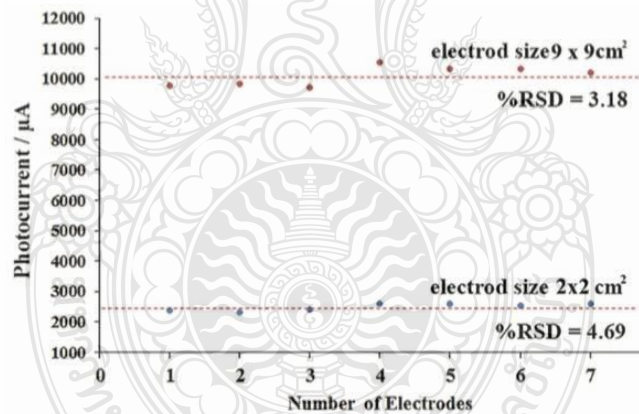


Figure 5. Photocurrent response from water oxidation results of different sizes and seven reproduced BiVO_4 electrodes using an automatic dip-coating machine.

on the FTO glass substrate at 2θ of 26.5° , 33.9° , 37.9° , and 51.6° . (Figure 3(d)) shows the surface morphology and chemical composition according to SEM and EDX studies at the top view of the fabricated BiVO_4 electrode. The SEM image shows that the surface morphology of BiVO_4 changed depending on the calcination temperature. Increasing the calcination temperature from room

temperature to 300°C increased the porosity of the surface, possibly due to the removal of organic matter contaminants, resulting in a clearer residual of the BiVO_4 at the electrode surface. Arrangement of BiVO_4 morphology density increased when the calcination temperature increased over 400°C , related to a change in the crystal structure with the XRD study results. The morphology of

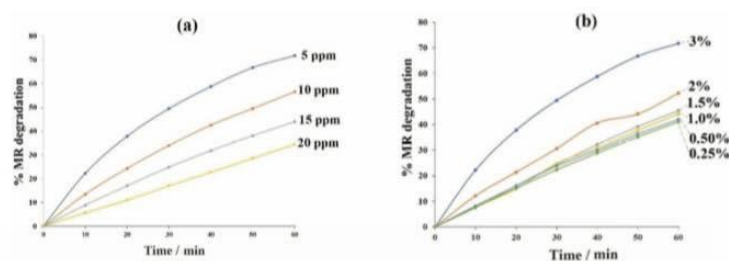


Figure 6. Percentage of MR degradation using the developed BiVO_4 electrode under the PEC process with the various effects of (a) initial MR concentration and (b) NaCl electrolyte solution concentration.

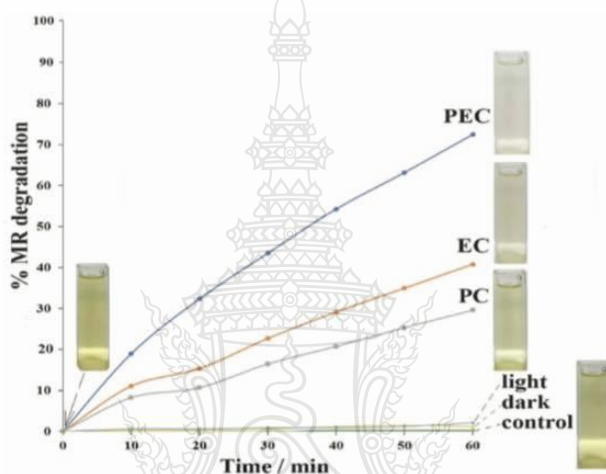


Figure 7. Percentage of MR degradation with the various catalytic mechanisms at the developed BiVO_4 electrode surface including PEC, EC, PC, light, dark, and control conditions; inset of a photograph of MR solution colour at the origin (0 min) and after the process (60 min).

BiVO_4 films begins to fuse largely when the calcination temperature is higher than 550°C , which is an effect of excessively high temperatures and could be another cause of film deposition under high-temperature conditions. Based on the results of character studies, we can be sure of BiVO_4 deposition at the FTO surface and understand the effect of the calcination temperature on the various properties of the prepared electrodes.

Reproducible and scaling-up performance study

We studied the seven reproduced BiVO_4 electrode preparations with the automatic dip-coating machine under optimum conditions and monitored the water oxidation photocurrent from each preparation, as shown in Figure 4. We also studied the efficiency of the large-scale repetitive BiVO_4 electrode preparation from an area of 4 to 81 cm^2 . We found that the photocurrent from water oxidation increased significantly with the larger size of the prepared BiVO_4 electrode, indicating the possibility of

increasing efficiency and capacity to further scale up application. Notably, both electrode sizes provided an acceptable oxidation current in the reproducibility efficiency of the low relative standard deviation (%RSD) value, indicating a high-precision process for BiVO_4 electrode preparation. We can confirm the strengths of the introduced automatic dip-coating method for BiVO_4 semiconductor thin film preparation that it is easy, convenient, highly reproducible, and suitable to further scale up application.

Methods comparison study

We compared the PEC efficiency and characteristics of the BiVO_4 electrodes prepared from the developed automatic dip-coating (machine) method with those prepared from the traditional dip-coating (manual) and spin-coating methods. (Figure 5(a)) shows that the BiVO_4 electrode prepared from the developed method was significantly more efficient in water oxidation than those

Table 1. Comparison BiVO₄ photoanode prepared in different methods for organic removal applications.

Photoanode (size, cm ²)	Preparation Method	Reactor cell component	Light source	Analyte concentration	%removal	Reactor capacity (cm ³)	Ref
FTO/BiVO ₄ (81 cm ²)	automatic dip-coating method	Two electrode system; stainless steel as counter electrode Bias potential: 2 V	White LED 1.24 W/cm ² ($\lambda \geq 420$ nm).	Methyl red (5 mgL ⁻¹)	70% after 1 h	(6,000 mL)	This work
FTO/BiVO ₄ (20 cm ²)	Solvothermal	Three electrode system; polydopamine modified carbon felt as counter electrode and Ag/AgCl as reference electrode. Bias potential: 1.5 V	300 W Xe lamp ($\lambda \geq 420$ nm).	Ofloxacin (8 mgL ⁻¹)	99.3% after 2 h	(160 mL)	[41]
FTO/BiVO ₄	Electrodeposition	Three electrode system; Pt wire and SCE as counter and reference electrode respectively. Bias potential: 0.25 V vs SCE	300 W Xe lamp ($\lambda \geq 420$ nm).	Bisphenol A (10 mgL ⁻¹)	100% after 2 h	(100 mL)	[18]
FTO/BiVO ₄	Spin coating and annealing	Three electrode system; Pt wire and Ag/AgCl as counter and reference electrodes respectively.	160 W Hg lamp (100mWcm ⁻²).	Methylene Blue (20 mgL ⁻¹)	96% after 5 h	(200 mL)	[42]
FTO/BiVO ₄ (15 cm ²)	Electrodeposition	Au decorated silicon photovoltaic cell	500 W xenon lamp (100mWcm ⁻²)	Rhodamine B Methyl orange Methylene blue (10mgL ⁻¹ each)	77.98% 89.15% 93.2% after 2 h.	-	[43]
FTO/BiVO ₄ (16 cm ²)	Spray pyrolysis	Three electrode system; Pt wire and Ag/AgCl as counter and reference electrodes respectively. Bias potential: 1.0 V vs Ag/AgCl	Xenon lamp with light intensity of 60Wm ⁻² .	Phenol (20 mgL ⁻¹)	70% after 4 h	(250 mL)	[44]
FTO/BiVO ₄	Drop coating and calcination	Three electrode system; Pt wire as counter electrode and Ag/AgCl as reference electrode Bias potential: 2 V vs Ag/AgCl	300 W Xe lamp (100mWcm ⁻²).	Methyl orange (10 mgL ⁻¹)	96.6% after 2 h	(40 mL)	[45]

prepared from the traditional methods. (Figure 5(b)) confirms the visible light absorption capacity of the BiVO₄ electrodes prepared from the dip-coating method, whereas the spin-coating method has slight absorbance properties, possibly due to the thinness of film deposition. The fact that the BiVO₄ film prepared by the automatic dip-coating machine is homogeneous and evenly smooth confirms the well-developed method of reproducing electrode properties. (Figures 5(c,d)) illustrate the crystal structure and morphology of the BiVO₄ electrodes prepared from different methods. We found that BiVO₄ prepared by the dip-coating method exhibited a clearer XRD peak characteristic of monoclinic BiVO₄ than that prepared by the spin-coating method, confirming the adherence ability of the BiVO₄ crystal structure prepared with the developed dip-coating method. SEM results can provide better understanding of the uniform and homogeneous characteristics of the BiVO₄ electrode prepared by an automatic dip-coating machine that can achieve electrodes with excellent PEC properties. Preparing BiVO₄ electrodes with an automatic dip-coating machine enables significant control of the substrate position, dipping speed, and lifting speed, resulting in a homogeneous thin film, better characteristics, and higher PEC activities than with manual dip-coating and spin-coating methods.

Organic dye degradation efficiency

We applied the BiVO₄ electrode prepared from the developed automatic dip-coating method as a working electrode to study the efficiency of organic dye removal by the PEC process. MR was used as an organic dye sample to test the performance of the developed BiVO₄ electrodes for organic dye degradation application. We studied the essential factors that significantly affect the MR dye degradation efficiency, such as the initial concentration of MR dye, NaCl electrolyte solution concentration, and catalytic mechanism for maximum efficiency in dye removal. (Figure 6(a)) shows the effect of the initial MR concentration on the degradation efficiency of the developed BiVO₄ electrode with the PEC process. We found that the removal efficiency increased with a lower initial dye solution concentration, which was consistent with the fact that low dye concentrations will promote the diffusion of all reactants in the degradation process. Therefore, in the treatment process, it is necessary to first analyse the concentration of the initial dye solution to estimate the time to achieve a complete degradation process. The concentration of the electrolyte solution is another factor affecting the efficiency of organic dye removal. (Figure 6(b)) shows the effect of the NaCl electrolyte solution concentration directly proportional to the dye removal efficiency.

Consistently, an increase in the concentration of the electrolyte solution results in a more significant charge transfer between the two electrodes, thus creating a greater reaction on the electrode surface. Figure 7 confirms the catalytic mechanism at the BiVO₄ electrode surface with light and applied potential or PEC process for organic dye degradation greater than the electrocatalytic (EC) and photocatalytic (PC) process, respectively. The PEC process can eliminate MR organic dyes by more than 70% in 1 hour with a noticeable colour change. These studies show that the developed BiVO₄ electrodes can be effectively applied to the degradation of organic dye under the PEC mechanism. Table 1 shows the BiVO₄ photoanode prepared with various methods, comparing this research and previous research for organic removal applications. A highlight of this research is the large electrode preparation process, which is easy, economical, and has the efficiency of removing organic matter that is no different from other research. More important points of this research are high reproducibility and the most significant scale-up compared to other research.

Conclusions

A proposed automatic dip-coating machine was successfully developed for BiVO₄ thin film preparation on a large scale. The optimum conditions for BiVO₄ electrode fabrication with the highest PEC activity were found as the initial precursor solution concentration of 0.0375 M, dipping speed of 25 mm/s, lifting speed of 30 mm/s, and 1-layer deposition condition. BiVO₄ electrode calcinating temperature is an essential factor affecting morphology, crystal structure, and PEC properties. The optimised dip-coating method provided high reproducibility for BiVO₄ electrode fabrication, both a small and large size. All BiVO₄ electrode characteristics were clarified related to the PEC activity improvement. The prepared BiVO₄ electrodes with an automatic dip-coating method significantly present better characteristics and higher PEC activities than the manual dip-coating and spin-coating methods. Notably, the developed BiVO₄ electrode can be applied to removing organic dye matter by the PEC mechanism by more than 70% in 1 hour. This research offers a new alternative approach to the simple, convenient, highly reproducible, and scalable preparation of semiconductor film, as well as to obtain an electrode that is effective in the PEC process suitable for energy and environmental applications.

Acknowledgments

This research project is supported by National Research Council of Thailand (NRCT): NRCT5-RR163007-M13, and Siam Aqua Tech Development System Co., Ltd.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

This research project is supported by National Research Council of Thailand (NRCT): NRCT5-RR163007-M13, and Siam Aqua Tech Development System Co., Ltd.

ORCID

Chowarit Mitsantisuk  <http://orcid.org/0000-0002-2731-1795>

Chatchai Ponchio  <http://orcid.org/0000-0001-6210-4794>

Compliance with Ethical Standards

Conflict of interest: This research project is supported by National Research Council of Thailand (NRCT): NRCT5-RR163007-M13, and Siam Aqua Tech Development System Co., Ltd. Co-Authors and the corresponding Author have received the same research grants. The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- [1] Amedlous A, Majdoub M, Amaterz E, et al. Synergistic effect of g-C₃N₄ nanosheets/Ag₃PO₄ microcubes as efficient n-p-type heterostructure based photoanode for photoelectrocatalytic dye degradation. *J Photochem Photobiol A*. 2021;409:113127.
- [2] Nareejun W, Ponchio C. Novel photoelectrocatalytic/solar cell improvement for organic dye degradation based on simple dip coating WO₃/BiVO₄ photoanode electrode. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2020;212:110556.
- [3] Prasad U, Prakash J, Kannan AM. Effects of yttrium, ytterbium with tungsten co-doping on the light absorption and charge transport properties of bismuth vanadate photoanodes to achieve superior photoelectrochemical water splitting. *Sustainable Energy Fuels*. 2020;4(3):1496–1506.
- [4] Srevarit W, Moonmangmee S, Phapugrangkul P, et al. Photoelectrocatalytic H₂ evolution enhancement over CuO-decorated TiO₂ nanocatalysts and promoting *E. coli* degradation. *J Alloys Compd*. 2021;859:157818.
- [5] Wu H, Zhang Z. Photoelectrochemical water splitting and simultaneous photoelectrocatalytic degradation of organic pollutant on highly smooth and ordered TiO₂ nanotube arrays. *J Solid State Chem*. 2011;184(12):3202–3207.
- [6] Wahyuningsih S, Purnawan C, Kartikasari PA, et al. Visible light photoelectrocatalytic degradation of rhodamine B using a dye-sensitised TiO₂ electrode. *Chem Papers*. 2014;68(9):1248–1256.
- [7] Zhao B, Guo X, Zheng M, Lin Z, Guo X, Pang H, and Shi Y. Direct preparation of hierarchical macroporous β-SiC using SiO₂ opal as both

- template and precursor and its application in water splitting, *Materials Technology*, 2016;31(9):526-531.
- [8] Kiama N, Ponchio C. Photoelectrocatalytic performance improvement of BiVO₄ thin film fabrication via effecting of calcination temperature strategy. *Surf Coat Technol.* 2020;383:125257.
- [9] Monfort O, Sfaelou S, Satrapinsky L, et al. Comparative study between pristine and Nb-modified BiVO₄ films employed for photoelectrocatalytic production of H₂ by water splitting and for photocatalytic degradation of organic pollutants under simulated solar light. *CatalToday*. 2017;280:51-57.
- [10] Prakash J, Prasad U, Alexander R, et al. Photoelectrochemical Solar Water Splitting: the Role of the Carbon Nanomaterials in Bismuth Vanadate Composite Photoanodes toward Efficient Charge Separation and Transport. *Langmuir*. 2019;35(45):14492-14504.
- [11] Thongthep P, Moonmangmee S, Ponchio C. Solar/photoelectrocatalytic cell development for H₂ production and simultaneous organic dye degradation. *Mater Sci Semicond Process*. 2021;124:105597.
- [12] Ulpe AC, Anke B, Berendts S, et al. O/F-substitution in BiVO₄: defect structures, phase stability and optical properties. *Solid State Sci*. 2018;75:39-44.
- [13] Huang J, Tian Y, Wang Y, et al. Load CoOx cocatalyst on photoanode by spin coating and calcination for enhanced photoelectrochemical water oxidation: a case study on BiVO₄. *J Solid State Chem*. 2021;299:122154.
- [14] Liu Y, Peng C, Cai Y, Liu Z, Shen Y, Li F. Hydrothermal preparation and photocatalytic properties of visible light driven AgBr/BiVO₄ nanocomposite. *Mater Technol*. 2020;1-8.
- [15] Saito R, Miseki Y, Sayama K. Photoanode characteristics of multi-layer composite BiVO₄ thin film in a concentrated carbonate electrolyte solution for water splitting. *J Photochem Photobiol A*. 2013;258:51-60.
- [16] Nasir SNS, Mohamed NA, Tukimon MA, et al. Direct extrapolation techniques on the energy band diagram of BiVO₄ thin films. *Phys B Condens Matter*. 2021;604:412719.
- [17] Venkatesan R, Velumani S, Ordon K, et al. Nanostructured bismuth vanadate (BiVO₄) thin films for efficient visible light photocatalysis. *Mater Chem Phys*. 2018;205:325-333.
- [18] Shao H, Wang Y, Zeng H, et al. Enhanced photoelectrocatalytic degradation of bisphenol a by BiVO₄ photoanode coupling with peroxymonosulfate. *J Hazard Mater*. 2020;394:121105.
- [19] Munawar K, Mansoor MA, McKee V, et al. Optical and photocatalytic properties of biomimetic cauliflower-like Ca₂Mn₃O₈-CaO composite thin films. *J Solid State Chem*. 2020;290:121552.
- [20] Tolod KR, Hernández S, Castellino M, et al. Optimization of BiVO₄ photoelectrodes made by electrodeposition for sun-driven water oxidation. *Int J Hydrogen Energy*. 2020;45(1):605-618.
- [21] Kangkun N, Ponchio C. Photoelectrodeposition of BiVO₄ layer on FTO/WO₃ photoanodes for highly efficient photoelectrocatalytic chemical oxygen demand sensor applications. *Appl Surf Sci*. 2020;526:146686.
- [22] Momeni MM, Tahmasebi Z. Effect of electrodeposition time on morphology and photoelectrochemical performance of bismuth vanadate films. *Inorg Chem Commun*. 2021;125:108445.
- [23] Zhao XN, Li HJ, Li KZ, et al. Electrodeposition of nanostructured calcium phosphate coating under magnetic field. *Mater Technol*. 2012;27(5):371-374.
- [24] Liu X, Liu Y, Su J, et al. Facile preparation of BiVO₄ nanoparticle film by electrostatic spray pyrolysis for photoelectrochemical water splitting. *Int J Hydrogen Energy*. 2015;40(38):12964-12972.
- [25] Paušová Š, Gray MU, Neumann-Spallart M, et al. Photoelectrochemical properties of BiVO₄ thin film photoanodes prepared by aerosol pyrolysis. *CatalToday*. 2019;326:30-35.
- [26] Hernández S, Gerardi G, Bejtka K, et al. Evaluation of the charge transfer kinetics of spin-coated BiVO₄ thin films for sun-driven water photoelectrolysis. *Appl Catal B Environ*. 2016;190:66-74.
- [27] Chatchai P, Murakami Y, Kishioka S-Y, et al. Efficient photocatalytic activity of water oxidation over WO₃/BiVO₄ composite under visible light irradiation. *Electrochim Acta*. 2009;54(3):1147-1152.
- [28] Wollmann P, Schumm B, Kaskel S. Transparent thin films of Bi₂WO₆, Bi₄Ti₃O₁₂ and Sr_{0.75}Ba_{0.25}Nb₂O₆. *Solid State Sci*. 2012;14(9):1378-1384.
- [29] Sarkar S, Das NS, Chattopadhyay KK. Optical constants, dispersion energy parameters and dielectric properties of ultra-smooth nanocrystalline BiVO₄ thin films prepared by rf-magnetron sputtering. *Solid State Sci*. 2014;33:58-66.
- [30] Du H, Pu W, Wang Y, et al. Synthesis of BiVO₄/WO₃ composite film for highly efficient visible light induced photoelectrocatalytic oxidation of norfloxacin. *J Alloys Compd*. 2019;787:284-294.
- [31] Hernández S, Thalluri SM, Sacco A, et al. Photocatalytic activity of BiVO₄ thin-film electrodes for solar-driven water splitting. *Appl Catal A Gen*. 2015;504:266-271.
- [32] Kumbhar VS, Lee H, Lee J, et al. Interfacial growth of the optimal BiVO₄ nanoparticles onto self-assembled WO₃ nanoplates for efficient photoelectrochemical water splitting. *J Colloid Interface Sci*. 2019;557:478-487.
- [33] AlArfaj E. Investigation of Ag-TiO₂ nanostructures photocatalytic properties prepared by modified dip coating method. *Philos. Mag*. 2016;96:1386-1398.
- [34] Lu Y, Xu L, Liu C, Zhang Z. Synthesis and photocatalytic activity of composite magnetic photocatalyst Mn_xZn_{1-x}Fe₂O₄/α-Bi₂O₃. *Materials Technology*, 2019;34:301-311.
- [35] Zhang X, Ai Z, Jia F, et al. Selective synthesis and visible-light photocatalytic activities of BiVO₄ with different crystalline phases. *Mater Chem Phys*. 2007;103(1):162-167.
- [36] Safaei J, Mohamed NA, Noh MFM, et al. Simultaneous enhancement in light absorption and charge transportation of bismuth vanadate (BiVO₄) photoanode via microwave annealing. *Mater Lett*. 2018;233:67-70.
- [37] Xu D, Xia T, Fan W, et al. MOF-derived Co₃O₄ thin film decorated BiVO₄ for enhancement of photoelectrochemical water splitting. *Appl Surf Sci*. 2019;491:497-504.

- [38] Orimolade BO, Koiki BA, Peleyeju GM, et al. Visible light driven photoelectrocatalysis on a FTO/BiVO₄/BiOI anode for water treatment involving emerging pharmaceutical pollutants. *Electrochim Acta*. 2019;307:285–292.
- [39] Zhang S-T, Vitrant G, Pernot E, et al. Hazy Al₂O₃-FTO Nanocomposites: a Comparative Study with FTO-Based Nanocomposites Integrating ZnO and S:TiO₂ Nanostructures. *Nanomaterials (Basel)*. 2018;8(6):440.
- [40] Asl HZ, Rozati SM. High-quality spray-deposited fluorine-doped tin oxide: effect of film thickness on structural, morphological, electrical, and optical properties. *Appl Phys A*. 2019;125(10):689.
- [41] Wang K, Liang G, Waqas M, et al. Peroxymonosulfate enhanced photoelectrocatalytic degradation of ofloxacin using an easily coated cathode. *Sep Purif Technol*. 2020;236:116301.
- [42] Deshpande NG, Ahn CH, Koli RR, et al. Controlled nanostructured morphology of BiVO₄ photoanodes for efficient on-demand catalysis in solar water-splitting and sustainable water-treatment. *Appl Surf Sci*. 2020;514:146075.
- [43] Xia L, Chen F, Li J, et al. Efficient organic pollutants conversion and electricity generation for carbonate-containing wastewater based on carbonate radical reactions initiated by BiVO₄-Au/PVC system. *J Hazard Mater*. 2020;389:122140.
- [44] Bennani Y, Perez-Rodriguez P, Alani M J, Smith W.A, Rietveld L C, Zeman M, Smets A H M. Photoelectrocatalytic oxidation of phenol for water treatment using a BiVO₄ thin-film photoanode *J Mater Res*. 2016; 31: 2627-2639.
- [45] Bacha A-U-R, Cheng H, Han J, et al. Significantly accelerated PEC degradation of organic pollutant with addition of sulfite and mechanism study. *Appl Catal B Environ*. 2019;248:441–449.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	แพรวนภา ต่อมคำ
วัน เดือน ปีเกิด	22 พฤษภาคม 2539
ที่อยู่	43 หมู่ 3 ต.น้ำคำ อ.ไทยเจริญ จ.ยโสธร 35120
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	082-1493620
อีเมล	Praewfee22@gmail.com

