



## รายงานการวิจัย

การศึกษาลักษณะสมบัติด้านพีเอชเซ็นเซอร์ของโลหะออกไซด์  
(Study on the pH sensing characteristic of metal oxide)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## รายงานการวิจัย

การศึกษาลักษณะสมบัติด้านพีเอชเซ็นเซอร์ของโลหะออกไซด์  
(Study on the pH sensing characteristic of metal oxide)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายณฤตล สายใจอุป

ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558-2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ คุณมานพ จรโคกกรวด คุณสินีนานู นอกกระโทก (เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ) คุณนารี กลิ่นกลาง (เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล และ คุณวัชรพล ภูมรา (นักวิทยาศาสตร์ประจำสถาบันแสงซินโครตรอน) ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2561



## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ (อลูมิเนียมออกไซด์, ทังสเตนไดรอกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์) ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชไอเล็กโทรด ด้วยวิธีแอโนดไดซ์เซชัน (anodization) และนำมาทดสอบการเป็นพีเอชไอเล็กโทรด ได้แก่ sensitivity และ hysteresis ของโลหะออกไซด์แต่ละชนิด ผลจากการวิเคราะห์ออลูมิเนียมออกไซด์พบว่า การแอโนดไดซ์ 40 โวลต์ เวลา 10 นาที ในสารละลาย 0.3 โมลาร์ กรดออกซาลิกแอซิด ทดสอบด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าพื้นผิวที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนที่ชัดเจน ไม่มีการเชื่อมกันของท่อเกิดขึ้น ทดสอบกับเทคนิค water contact angle พบว่า มีคุณสมบัติในการชอบน้ำ โดยมีมุมตกกระทบ 44.33 องศา และ การใช้เทคนิค XRD พบว่าเกิดเป็นลักษณะของ อนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์เกิดขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ ทังสเตนไดรอกไซด์พบว่า การแอโนดไดซ์ 45 โวลต์ เวลา 120 นาที ในสารละลาย 0.15 โมลาร์ โซเดียมฟลูออไรด์ ทดสอบด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าพื้นผิวที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนที่ชัดเจน ไม่มีการเชื่อมกันของท่อเกิดขึ้น ทดสอบกับเทคนิค water contact angle พบว่า มีคุณสมบัติในการชอบน้ำ โดยมีมุมตกกระทบ 61.2 องศา และ การใช้เทคนิค XRD พบว่าเกิดเป็นลักษณะของ รูปแบบบอดี-เซนเตอร์ คิวบิก ของทังสเตนไดรอกไซด์เกิดขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า การแอโนดไดซ์ 20 โวลต์ เวลา 180 นาที ในสารละลาย 0.15 โมลาร์ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ทดสอบด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าพื้นผิวที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนที่ชัดเจน ไม่มีการเชื่อมกันของท่อเกิดขึ้น พื้นผิวของท่อเรียบเสมอกัน ทดสอบกับเทคนิค water contact angle พบว่า มีคุณสมบัติในการชอบน้ำ โดยมีมุมตกกระทบ 34.4 องศา และ การใช้เทคนิค XRD พบว่าเกิดเป็นลักษณะของ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้น การศึกษาการเป็นพีเอชไอเล็กโทรดจะนำโลหะออกไซด์ที่ได้มาประยุกต์ใช้เป็นโพรบที่ต่อเข้ากับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยผลการทดสอบพบว่า ค่า sensitivity ของอลูมิเนียมออกไซด์เท่ากับ 16.90 มิลลิโวลต์ต่อพีเอช ค่า sensitivity ของทังสเตนไดรอกไซด์เท่ากับ 47.40 มิลลิโวลต์ต่อพีเอช และค่า sensitivity ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20.00 มิลลิโวลต์ต่อพีเอช จะเห็นว่าโลหะที่ให้ค่า sensitivity ดีที่สุดคือ ทังสเตนไดรอกไซด์ > อลูมิเนียมออกไซด์ > ไทเทเนียมไดออกไซด์ การทดสอบค่า hysteresis ของอลูมิเนียมออกไซด์พบว่าเท่ากับ 0.030 มิลลิโวลต์ ค่า hysteresis ของทังสเตนไดรอกไซด์พบว่าเท่ากับ 0.010 มิลลิโวลต์ ค่า hysteresis ของอลูมิเนียมออกไซด์พบว่าเท่ากับ 0.021 มิลลิโวลต์ จะเห็นว่าโลหะที่ให้ค่า hysteresis ดีที่สุดคือ ทังสเตนไดรอกไซด์ > ไทเทเนียมไดออกไซด์ > อลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งโลหะออกไซด์ที่ให้ลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชไอเล็กโทรดด้วยวิธีแอโนดไดซ์เซชันมากที่สุดคือทังสเตนไดรอกไซด์

## Abstract

The purpose of this research is to synthesize metal oxide (aluminum oxide, tungsten trioxide, titanium dioxide) by anodization process which is suitable for the application of pH electrode. The sensitivity and hysteresis effects of each type of metal oxide were tested. The preparation of the aluminum oxide by anodization technique was carried out in an electrolyte of 0.3 M oxalic acid with 40 V and 10 min at room temperature. The FE-SEM technique showed that the surface was porous on surface, clearing pore and no pore connection occurs. The water contact angle technique showed the angle of water on surface of 44.33 degrees. XRD analysis showed that the aluminum oxide was amorphous phase structure. The preparation of the tungsten trioxide by anodization technique was carried out in an electrolyte of 0.15 M sodium fluoride with 45 V and 120 min at room temperature. The FE-SEM technique showed that the surface was porous on surface and clearing pore. The water contact angle technique showed the angle of water on surface of 61.2 degrees. XRD analysis showed that tungsten trioxide was body-centered cubic phase structure of tungsten trioxide. The preparation of the titanium dioxide by anodization technique was carried out in an electrolyte of 0.15 M ammonium fluoride with 20 V and 180 min at room temperature. The FE-SEM technique showed that the smooth nanotubes were formed on surface of substrate. The water contact angle technique showed the angle of water on surface of 34.4 degrees. XRD analysis showed that titanium dioxide was anatase phase structure of titanium dioxide. The results of the test for the application of pH electrode showed that the sensitivity of aluminum oxide is 16.90 mV per pH. The sensitivity of tungsten oxide was 47.40 mV per pH and the sensitivity of titanium dioxide was 20.00 mV per pH. It is found that the metal that gives the best sensitivity is tungsten trioxide > aluminum oxide > titanium dioxide. The hysteresis of aluminum oxide is 0.030 mV. The hysteresis of tungsten trioxide is 0.010 mV. The hysteresis of titanium dioxide is 0.021 mV. The best hysteresis metal is tungsten trioxide > titanium dioxide > aluminum oxide. Consequently, the metal oxide gave the best characteristics for the application of pH electrode by anodization process is tungsten trioxide.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 สมมุติฐานของแผนงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
<b>บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและวิธีการศึกษา.....</b>	<b>4</b>
2.1 คำพื้เอช.....	4
2.1.1 หลักการของพีเอชมิเตอร์.....	5
2.1.2 หลักการวัดค่าพีเอช.....	6
2.2 การสังเคราะห์โลหะออกไซด์โดยใช้กระบวนการแอนโนไดเซชัน.....	7
2.3 การศึกษาการทดสอบคุณสมบัติการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ของโลหะออกไซด์.....	10
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....</b>	<b>12</b>
3.1 การสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	12
3.1.1 การสังเคราะห์ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	13
3.1.1.1 การแปรเปลี่ยนสถานะแรงดันไฟฟ้า หาแรงดันที่เหมาะสม.....	14
3.1.1.2 การแปรเปลี่ยนสถานะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม.....	14
3.1.2 การสังเคราะห์ WO <sub>3</sub> ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	15
3.1.2.1 การแปรเปลี่ยนสถานะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ WO <sub>3</sub> .....	15
3.1.3 การสังเคราะห์ TiO <sub>2</sub> ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	16
3.1.3.1 การแปรเปลี่ยนสถานะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ TiO <sub>2</sub> .....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของโลหะออกไซด์.....	17
3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	17
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโลหะออกไซด์.....	17
3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้าน hydrophilicity.....	17
3.3 การเตรียมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น.....	18
3.3.1 การเตรียมโลหะออกไซด์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอิเล็กโทรด.....	18
3.3.2 การต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับวงจรไฟฟ้าเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น.....	20
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์.....	21
3.4.1 การวัดค่า sensitivity.....	21
3.4.2 การวัดค่า hysteresis effect.....	22
3.5 สถานที่ทำการทดลอง.....	22
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....</b>	<b>23</b>
4.1 ผลการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	23
4.1.1 การสังเคราะห์ห่อลุ่มิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	23
4.1.1.1 ผลของการแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	23
4.1.1.2 ผลของการแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	27
4.1.1.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของ $Al_2O_3$ โดยการวัด water contact.....	31
4.1.1.4 ผลการวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD).....	32
4.1.2 ผลการทดลองสังเคราะห์ $WO_3$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	34
4.1.2.1 ผลการทดลองสังเคราะห์ $WO_3$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	35
4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity.....	35
4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD).....	36
4.1.3 ผลของการทดลองสังเคราะห์ $TiO_2$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	36

4.1.3.1	ผลของการทดลองสังเคราะห์ TiO <sub>2</sub> ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	37
4.1.3.2	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity.....	38
4.1.3.3	ผลการวิเคราะห์หาค่าประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD).....	39
4.2	ผลของการทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์.....	40
4.2.1	การคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า sensitivity.....	40
4.2.1.1	การวัด sensitivity ของ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	40
4.2.1.2	การวัด sensitivity ของ WO <sub>3</sub> .....	42
4.2.1.3	การวัด sensitivity ของ TiO <sub>2</sub> .....	43
4.2.2	การคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า Hysteresis effect.....	45
4.2.2.1	การวัดค่า Hysteresis effect ของ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	45
4.2.2.2	การวัดค่า Hysteresis effect ของ WO <sub>3</sub> .....	47
4.2.2.3	การวัดค่า Hysteresis effect ของ TiO <sub>2</sub> .....	49
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>51</b>
5.1	สรุปผลการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	51
5.1.1	สรุปผลการสังเคราะห์อลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	51
5.1.2	สรุปผลการสังเคราะห์ทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	52
5.1.3	สรุปผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....	52
5.2	สรุปผลของการทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์.....	53
5.2.1	สรุปผลคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า sensitivity.....	53
5.2.2	สรุปผลคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า Hysteresis effect.....	54
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	54
	รายการอ้างอิง.....	55
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดลอง.....	57
	ประวัตินักวิจัย.....	82



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ไดอะแกรมการพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อนขนาดนาโน.....	9
3.1 ลักษณะการทดลองกระบวนการแอนโนไดเซชัน .....	12
3.2 แผ่นอลูมิเนียมที่ตัดให้มีขนาดตามต้องการ.....	13
3.3 การล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก.....	13
3.4 แผ่น PCB สำหรับนำไปติดกับโลหะออกไซด์.....	19
3.5 โลหะออกไซด์ที่ติดกับแผ่น PCB และแปะเชื่อมด้วย silver paste .....	19
3.6 เตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 210 นาที.....	19
3.7 แผ่น PCB ที่ทาด้วย epoxy ปิดทับพื้นที่ไม่ได้ใช้งาน.....	20
3.8 ภาพถ่ายเล็กโทรนที่นำไปใช้ในการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้า.....	20
3.9 การต่อวงจรสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง.....	21
3.10 เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง .....	21
4.1 กระจาดทรายเบอร์ 1000.....	24
4.2 แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้น (รูปซ้ายขัด รูปขวาไม่ขัด).....	24
4.3 แผ่นอลูมิเนียมที่แอนโนไดเซชันเสร็จเรียบร้อยแล้วและเก็บไว้ในถุงซิปล็อค.....	25
4.4 XRD pattern of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ 30 โวลต์ 10 นาที.....	33
4.5 XRD pattern of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ 30 โวลต์ 3 ชั่วโมง.....	33
4.6 XRD pattern of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ 40 โวลต์ 10 นาที.....	34
4.7 XRD pattern of WO <sub>3</sub> ที่ 45 โวลต์ 120 นาที.....	36
4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนพื้นผิวไทเทเนียม.....	39
4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าของ TiO <sub>2</sub> ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10.....	41
4.10 ค่า sensitivity ของ TiO <sub>2</sub> ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10.....	41
4.11 ค่ากระแสไฟฟ้าของ WO <sub>3</sub> ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10.....	42
4.12 ค่า sensitivity ของ WO <sub>3</sub> ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10.....	43
4.13 ค่ากระแสไฟฟ้าของ TiO <sub>2</sub> ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10.....	44
4.14 ค่า sensitivity ของ TiO <sub>2</sub> ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10.....	44
4.15 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ขาขึ้น (7-4-7-10-7).....	45
4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ขาลง (7-10-7-4-7).....	46

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ค่า Hysteresis effect ของ $Al_2O_3$ ขาขึ้น (7-4-7-10-7).....	46
4.18 ค่า Hysteresis effect ของ $Al_2O_3$ ขาลง (7-10-7-4-7).....	47
4.19 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ $WO_3$ ขาขึ้น (7-4-7-10-7).....	47
4.20 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ $WO_3$ ขาลง (7-10-7-4-7).....	48
4.21 ค่า Hysteresis effect ของ $WO_3$ ขาขึ้น (7-4-7-10-7).....	48
4.22 ค่า Hysteresis effect ของ $WO_3$ ขาลง (7-10-7-4-7).....	49
4.23 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ $TiO_2$ ขาขึ้น (7-4-7-10-7).....	49
4.24 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ $TiO_2$ ขาลง (7-10-7-4-7).....	50
4.25 ค่า Hysteresis effect ของ $TiO_2$ ขาขึ้น (7-4-7-10-7).....	50
4.26 ค่า Hysteresis effect ของ $TiO_2$ ขาลง (7-10-7-4-7).....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของ $Al_2O_3$ .....	14
3.2 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ $Al_2O_3$ .....	15
3.3 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ $WO_3$ .....	16
3.4 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ $TiO_2$ .....	17
4.1 ภาพถ่าย FE-SEM ของ $Al_2O_3$ ของการทดลองที่ 1 การแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้า เพื่อที่จะหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	25
4.2 ภาพถ่าย FE-SEM ของ $Al_2O_3$ ของการทดลองที่ 2 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อที่จะหาเวลาที่เหมาะสมที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ ระยะเวลา 10 นาที.....	28
4.3 ภาพถ่าย water contact angle ของ $Al_2O_3$ .....	31
4.4 ภาพถ่าย FE-SEM ของ $WO_3$ .....	35
4.5 ภาพถ่าย water contact angle ของ $WO_3$ .....	35
4.6 ภาพถ่าย FE-SEM ของ $TiO_2$ .....	37
4.7 ภาพถ่าย water contact angle ของ $TiO_2$ .....	38

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในภาคอุตสาหกรรม และภาคสถาบันการศึกษาตั้งแต่ระดับประถมศึกษา มัธยมศึกษาและอุดมศึกษาทั่วประเทศไทย ทั้งที่เป็นสถาบันการศึกษาของรัฐบาลและเอกชน มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง เห็นได้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ขึ้นทะเบียนอย่างถูกต้องกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2555 จำนวน 134,830 โรงงาน และจำนวนโรงเรียนในสังกัด สพฐ. 35,118 โรงเรียน จำนวนสถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษาทั่วประเทศประมาณ 255 สถาบัน แต่ละองค์กรมีการศึกษาวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แน่แน่นอนว่าจะต้องมีการใช้อุปกรณ์พื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ ในการชั่งตวง วัด ในการศึกษาทดลองทางด้านเคมีพื้นฐาน ซึ่งเป็นรากฐานในการวิจัยตั้งแต่ระดับการวิจัยพื้นฐาน ไปจนถึงระดับการวิจัยประยุกต์จนกระทั่งเป็นการพัฒนาทดลอง ซึ่งอุปกรณ์พื้นฐานในการวัดที่จำเป็นจะต้องมีใช้ ได้แก่ พีเอชมิเตอร์ เนื่องจากค่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากที่สุดตัวหนึ่งในงานหลายๆ สาขา ได้แก่ ด้านอุตสาหกรรม ด้านการเกษตร ด้านชีววิทยา ด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ถ้าลองประมาณจำนวนเครื่อง พีเอชมิเตอร์ที่มีใช้กันอยู่ในแต่ละองค์กรจากจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษาข้างต้นจะเห็นว่า ในประเทศไทยมีการใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นต้องใช้เงินงบประมาณในการจัดหาเครื่องวัดพีเอชมิเตอร์มาใช้รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นจำนวนค่อนข้างสูงตามไปด้วย

วิธีการดั้งเดิมของหลักการวัดพีเอชจะใช้อิเล็กโทรดแบบแก้ว (glass electrode) ซึ่งมีข้อจำกัดหลายๆ ประเด็น เช่น ราคาแพง ความคลาดเคลื่อนในการวัดมีสูง มีอิมพีแดนซ์ (Impedance) สูง มีขนาดใหญ่ มีรูปร่างจำกัด และเปราะบางแตกเสียหายได้ง่าย

จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยพบว่า อิเล็กโทรดชนิดโลหะออกไซด์ให้การตอบสนองต่อค่าพีเอช และคุณสมบัติที่ดีของอิเล็กโทรดชนิดโลหะออกไซด์คือ เป็นของแข็งจึงมีความแข็งแรงไม่เสียหายง่ายเหมือนอิเล็กโทรดแก้ว ให้การตอบสนองที่เร็ว มีขนาดเล็กและไม่ไวต่อไอออนของ  $K^+$   $Na^+$  และ  $F^-$  ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงคุณสมบัติของอิเล็กโทรดชนิดโลหะออกไซด์ในการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ เช่น  $Al_2O_3$   $PtO_2$   $IrO_2$   $WO_3$   $TiO_2$   $ErO_2$   $RuO_2$   $SnO_2$  เป็นต้น (Pan and Lin., 2009 และ Eftekhari., 2003) ซึ่งในการเตรียมโลหะออกไซด์ข้างต้นนี้จะใช้วิธีการ vapor deposition และวิธีการ sol-gel ซึ่งวิธีการ vapor deposition เป็นเทคนิคที่ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูงเป็นเทคนิคที่ซับซ้อนค่อนข้างยาก และมี

ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ส่วนวิธีการ sol-gel มีขั้นตอนการเตรียมหลายขั้นตอน และโลหะออกไซด์ที่ได้จะไม่ค่อยสม่ำเสมอมากนัก

วิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ที่ง่ายอีกวิธีหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันได้แก่ การ anodization ซึ่งวิธีนี้สามารถเตรียมโลหะออกไซด์ได้ด้วยขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง โดยอาศัยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายนำไฟฟ้า ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าขั้วโลหะ ซึ่งผู้วิจัยมีพื้นฐานของการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีการ anodization อยู่แล้ว เช่น  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นท่อนาโนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกับไฮโดรเจนไอออนในสารละลายซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญของพีเอชเซ็นเซอร์

อย่างไรก็ตามความถูกต้องของค่าพีเอชที่อ่านได้จากอิเล็กโทรดชนิดโลหะออกไซด์จะถูกจำกัดด้วย Sensitivity และ hysteresis effect ส่งผลทำให้พีเอชเซ็นเซอร์แสดงผลตอบสนองที่ไม่คงที่ ซึ่งค่า Sensitivity สามารถหาได้จากการใช้อิเล็กโทรดวัดค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน เพื่อดูค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อพีเอช มีหน่วยเป็น mV/pH ส่วนค่า hysteresis คือ ผลต่างสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดจากค่าที่แท้จริงระหว่างการอ่านขาขึ้นกับการอ่านขาลงที่จุดเดียวกันมีหน่วยเป็น mV ตัวอย่างเช่นเมื่อวัดสารละลายที่พีเอช 7 ตามด้วยการวัดสารละลายที่พีเอช 4 ตามด้วยวัดสารละลายที่พีเอช 7 (ขาลง) หรือเมื่อวัดสารละลายที่พีเอช 7 ตามด้วยการวัดสารละลายที่พีเอช 10 ตามด้วยวัดสารละลายที่พีเอช 7 (ขาขึ้น) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่จุดเดียวกัน (ที่พีเอช 7) ควรเป็นค่าเดียวกัน แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก hysteresis effect

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้โลหะออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดสอบคุณสมบัติการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ในประเด็นข้างต้น เพื่อให้ได้องค์ความรู้ในการประยุกต์ใช้โลหะออกไซด์ในการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

1 เพื่อต้องการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอิเล็กโทรด

2 เพื่อทราบถึงคุณสมบัติการเป็นพีเอชอิเล็กโทรด ได้แก่ sensitivity และ hysteresis ของโลหะออกไซด์แต่ละชนิด

### 1.3 ขอบเขตการศึกษาของแผนงานวิจัย

- 1 การสังเคราะห์โลหะออกไซด์เพื่องานวิจัยนี้จะใช้วิธีแอโนไดเซชัน (anodization) เท่านั้น
- 2 การศึกษาค่า sensitivity และค่า Hysteresis ของอิเล็กโทรดโลหะออกไซด์จะทำการศึกษากับสารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอชในช่วง 4 ถึง 10 เท่านั้น

### 1.4 สมมุติฐานของแผนงานวิจัย

- 1 โลหะออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีแอโนไดเซชันมีคุณสมบัติในด้าน sensitivity ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอิเล็กโทรด
- 2 โลหะออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีแอโนไดเซชันมีคุณสมบัติในด้าน hysteresis ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอิเล็กโทรด

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1 ได้รับความรู้ในการสังเคราะห์โลหะออกไซด์และคุณลักษณะสมบัติของโลหะออกไซด์  $\text{TiO}_2$   $\text{WO}_3$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  จากกระบวนการแอโนไดเซชัน
- 2 ทราบถึงคุณลักษณะสมบัติของโลหะออกไซด์  $\text{TiO}_2$   $\text{WO}_3$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในด้านคุณสมบัติการเป็นพีเอชอิเล็กโทรด ได้แก่ sensitivity และ hysteresis

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ค่าพีเอช

การวัดค่าพีเอชหลักๆ แล้วสามารถวัดได้จากความหนาแน่นของไอออนไฮโดรเจนหรือไฮโดรเนียมไอออน,  $H^+$  หรือ  $H_3O^+$  (ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวก) หรือในทางตรงกันข้ามสามารถวัดได้จากความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน,  $OH^-$  (ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าลบ)

$H^+$  ในสารละลายคือ ไฮโดรเจนไอออนเอกทิวติ์ หรือไฮโดรเนียมไอออน,  $H_3O^+$  ซึ่งก็คือ “ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน” ซึ่งหมายถึงจำนวนกรัมไอออนของไอออนไฮโดรเจนที่มีอยู่ในสารละลาย 1 ลิตร (โมล/ลิตร)

การวัดค่าพีเอชเป็นการวัดการทำงานของไฮโดรเจนไอออนในสาร ค่าพีเอชของสารละลายใด ๆ กำหนดได้จากลอการิทึมลบ (ฐาน 10) ของความเข้มข้นไฮโดรเนียมไอออน นั่นคือ

$$pH = -\log_{10} \left[ \frac{1}{[H^+]} \right] = -\log_{10} [H^+] \quad (1)$$

หากสารละลายมีค่าพีเอชมากกว่า จะมีค่า  $H_3O^+$  (หรือ  $H^+$ ) ในสารละลายมากกว่า

สารประกอบทั่วไปมีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ถ้านำมาผสมลงในน้ำสารประกอบเหล่านี้จะแตกตัวเป็นไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและลบ ปริมาณการแตกตัวเป็นไอออนนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและอุณหภูมิของสารละลายที่จุดอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง อัตราส่วนของไอออนที่แตกตัวออกมาต่อจำนวนของสารประกอบซึ่งยังไม่แตกตัวจะมีค่าคงที่ เราเรียกอัตราส่วนนี้ว่า “ค่าคงที่ของการไอออนไนซ์” (ionization constant) ดังนั้นหากพิจารณาผลของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ก็เป็นการกำหนดความเป็นกรดต่างในรูปของ pOH scale ซึ่งกำหนดได้จากลอการิทึมลบของความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน นั่นคือ

$$pOH = -\log [OH^-] \quad (2)$$

ทั้งค่า pH และ pOH ของสารละลายที่กำหนดมานั้นจะสัมพันธ์กับผลคูณไอออนของน้ำบริสุทธิ์ นั่นคือ

$$K_w = (H_3O^+)(OH^-) = 1.0 \times 10^{-14} \quad (3)$$

(ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25°C)

หรือเมื่อมีการทำปฏิกิริยากันแล้วก็ได้เป็น



หรือ

$$K = \frac{(M^+)(A^-)}{(MA)} \quad (4)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าคงที่ของการไอออนไนซ์ (moles/l)

$M^+$  = ความเข้มข้นของไอออนบวก (moles/l)

$A^-$  = ความเข้มข้นของไอออนลบ (moles/l)

$(MA)$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่ยังไม่แตกตัว (moles/l)

จากสมการที่ (4)  $M^+$  คูณกับ  $A^-$  ซึ่งแทนด้วยค่าของ  $(H_3O^+)$   $(OH^-)$  ได้เป็น  $K_w$  ซึ่ง  $K_w = (H_3O^+) (OH^-) = 1.0 \times 10^{-14}$  หากเทคล็อกทั้งสองด้านจะได้ความสัมพันธ์สุดท้ายออกมาเป็น  $pH + pOH = 14$  หรือหากน้ำมี  $pH = 2.00$  ค่า  $pOH$  ก็จะมีค่า

$$pOH = 14 - pH = 14.00 - 2.00 = 12.00$$

ดังนั้นที่ค่าพีเอชเป็นกลาง ทั้ง  $pH$  และ  $pOH$  ต่างก็มีค่าเท่ากับ 7

### 2.1.1 หลักการของพีเอชมิเตอร์

การวัดพีเอช คือ การวัดสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่างของสารละลาย ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Solution) โดยใช้หลักการ Electrochemistry โดยวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (Potential) ระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่ได้เกิดจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออน (Ionic Potential) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electronic Potential) แล้วขยายให้มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยเครื่อง pH Meter (Potentiometer)

pH Meter คือเครื่องมือทางไฟฟ้าที่ใช้วัดพีเอชของสารละลาย โดยหลักการวัดความต่างศักย์ (Potentiometer) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ที่ทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ครบวงจร ส่วนประกอบทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรด และตัวเครื่อง

1) อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นภาคตรวจรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายที่พีเอช 7 (Standard pH Buffer) ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 คืออิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตรวจวัดจะมีค่าความต่างศักย์เท่ากับศูนย์มิลลิโวลต์ (0 MV) ถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจน



อ็อนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความต่างศักย์ก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อนในสารละลายนั้น โดยมีอิเล็กโทรดเป็นตัวทำหน้าที่รับสัญญาณ

2) ตัวเครื่อง pH Meter ก็คือ Potentiometer หรือ Volt Meter ทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ ทำหน้าที่ปรับความต่างศักย์ให้กับอิเล็กโทรดอ้างอิง ให้มีค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์และคงที่ ทำหน้าที่ แปลงสัญญาณจากความต่างศักย์ของอ็อนของอิเล็กโทรดให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และสุดท้ายคือทำหน้าที่ขยายสัญญาณค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าให้เพิ่มมากขึ้นอย่างเพียงพอให้แสดงผลที่มิเตอร์แบบเข็มหรือตัวเลข

อิเล็กโทรดปัจจุบันส่วนใหญ่เป็น Combination pH Electrode ซึ่งออกแบบไว้ให้สะดวกในการใช้งาน โดยรวมส่วนของ Reference Electrode และ Sensing Electrode มาอยู่ด้วยกัน Sensing Electrode หรืออิเล็กโทรดตรวจวัด ทำด้วยแก้วชนิดพิเศษที่ยอมให้เฉพาะไฮโดรเจนอ็อน ( $H^+$ ) ผ่าน ส่วนใหญ่ออกแบบเป็นรูปกระเปาะ ภายในบรรจุสารละลายบัฟเฟอร์เอาไว้ แต่มีบางประเภทเป็นรูปอื่น เช่น รูปเข็ม เป็นต้น ทุกชนิดจะเหมือนกันตรงบริเวณที่ไฮโดรเจนอ็อนผ่านผิวแก้วจะบางมาก ซึ่งเป็นข้อเสียของอิเล็กโทรดชนิดแก้ว ส่วน Reference Electrode หรืออิเล็กโทรดอ้างอิง ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วตรวจวัดเดินครบวงจร โดยมีโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ชนิดอิ่มตัวที่อยู่ในอิเล็กโทรดอ้างอิงซึมผ่านออกมาเป็น Salt Bridge เชื่อม Sensing Electrode

### 2.1.2 หลักการวัดค่าพีเอช

การวัดค่าพีเอชจะอาศัยพื้นฐานมาจากอิเล็กโทรดไฮโดรเจน ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เข้าสู่สมดุลระหว่างโปรตอนและก๊าซไฮโดรเจน



ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้นี้เกิดจากความดันบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนที่ 1 atm partial pressure ซึ่งสามารถแสดงได้โดยสมการของ Nernst ดังนี้

$$E = E^0 + (RT/nF) \ln [H^+] \quad (6)$$

เมื่อ  $E^0$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐาน

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ =  $8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

n คือ จำนวนอิเล็กตรอน

F คือ ค่าคงที่ของ Faraday =  $96,485 \text{ C mol}^{-1}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

T คือ อุณหภูมิเป็น K  
 [H<sup>+</sup>] คือ แอกติวิตีของไฮโดรเจนไอออน

สำหรับอิเล็กโทรดไฮโดรเจน มี  $E^0 = 0$  และ  $n = 1$  สามารถเขียนสมการที่ (6) ได้เป็น

$$E = (-RT/F)(-\ln [H^+]) \quad (7)$$

เปลี่ยนสมการที่ (7) ให้เป็นลอการิทึมฐาน 10 ได้เป็น

$$E = (-2.303RT/F)(-\log_{10} [H^+]) \quad (8)$$

ค่า R และ F เป็นค่าคงที่ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 25 °C

$$T = 298 \text{ K}$$

$$2.303RT/F = 0.0592 \text{ V}$$

ดังนั้น จากสมการที่ (1) และ (8) จะได้

$$E = -0.0592 \text{ V} + \text{pH} \quad (9)$$

หรือ

$$\text{pH} = E + 0.0592 \text{ V} \quad (10)$$

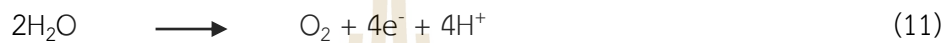
สมการที่ (10) แสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของค่าพีเอชและค่าศักย์ไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงพีเอชที่เพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยจะเทียบเท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป 0.0592 V ที่อุณหภูมิ 25 °C

## 2.2 การสังเคราะห์โลหะออกไซด์โดยใช้กระบวนการแอโนไดเซชัน (Anodization)

กระบวนการแอโนไดเซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะโดยใช้การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ (Working Electrode) ที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ (Electrolyte) กระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick *et al.* 1987) เริ่มแรกได้ทดลองใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูก (Substrate) ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนแรกคือ ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่า ชั้น Barrier

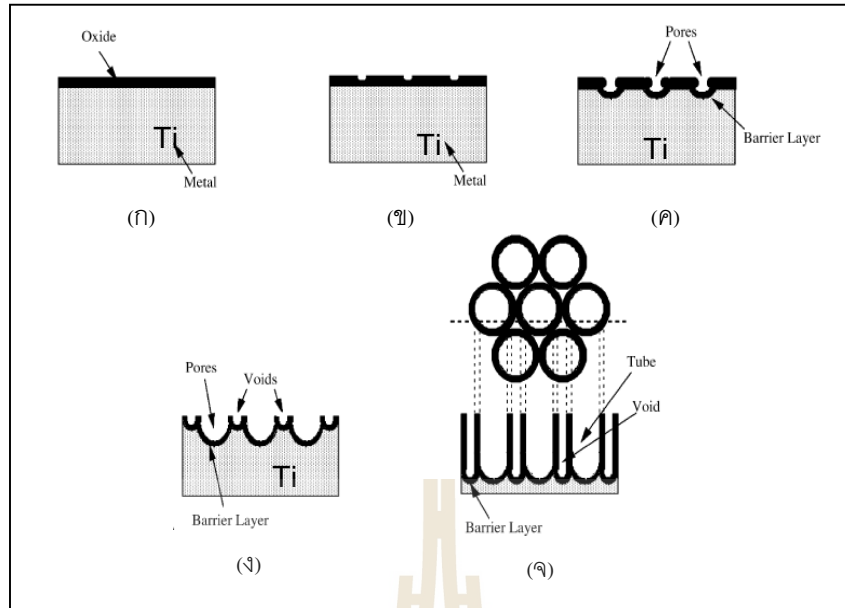
ซึ่งชั้น Barrier มีความหนาประมาณ 0.1-2.0 % ของความหนาทั้งหมดของชั้นออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และส่วนที่สอง ได้แก่ ชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะเห็นได้ว่าการก่อตัวเป็นท่อซึ่งมีผนังท่อ (Cell wall) ให้เห็นได้

Mor et al. (2006) ได้เสนอว่าการก่อตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีรูพรุนนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันและเป็นพื้นฐานของการก่อตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน ( $\text{TiO}_2$  nanotubes) กระบวนการแอโนไดเซชันเริ่มด้วยการเริ่มก่อตัวของชั้นออกไซด์บนผิวโลหะไทเทเนียม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างไทเทเนียมไอออน ( $\text{Ti}^{4+}$ ) กับออกซิเจนไอออน ( $\text{O}^{2-}$ ) ในสารละลาย ซึ่งปฏิกิริยาโดยรวมสามารถแสดงในสมการที่ 11 และ 12



ในช่วงแรกของกระบวนการแอโนไดเซชัน แรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้ามีมากกว่าการกัดกร่อนด้วยสารละลายเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นออกไซด์และต่อมารูเล็ก ๆ ค่อย ๆ เกิดขึ้นบนชั้นออกไซด์เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลาย (สารละลายที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน) ทำให้เกิดการก่อตัวของรูพรุนดังสมการที่ 13 และรูเล็ก ๆ เหล่านี้ก็ค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้นเป็นรูขนาดใหญ่และความหนาแน่นของรูพรุนเหล่านี้ก็เพิ่มขึ้นจนทั่วพื้นผิวโลหะ ไดอะแกรมการพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อนาโน ( $\text{TiO}_2$  nanotubes) แสดงดังรูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 ไตอะแกรมการพัฒนาของไทเทเนียมรูปท่อขนาดนาโน ( $\text{TiO}_2$  nanotubes) (Mor *et al.* 2006)

(ก) การก่อตัวของชั้นออกไซด์ (ข) การเริ่มเกิดรูพรุนเล็กๆ บนชั้นออกไซด์ (ค) การเกิดชั้น Barrier (ง) การขยายขนาดของรูพรุนและเกิดเป็นผนังท่อ (จ) การพัฒนาอย่างสมบูรณ์ของไทเทเนียมรูปท่อขนาดนาโน ( $\text{TiO}_2$  nanotubes)

นอกจากโลหะออกไซด์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันแล้ว โลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ เช่น  $\text{WO}_3$   $\text{ZnO}$  เป็นต้น ก็ยังสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการเดียวกันนี้ แต่ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุแต่ละชนิด และสภาวะที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดเซชันด้วย เช่น pH ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และความเข้มข้นของสาร เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน (anodization) มีการศึกษาอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน และมีกลุ่มวิจัยจากนานาประเทศให้ความสนใจศึกษาวิธีการนี้ ยกตัวอย่างโลหะออกไซด์ที่นิยมสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อขนาดนาโน ( $\text{TiO}_2$  nanotubes) ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานด้านต่างๆ ขอยกตัวอย่างกลุ่มวิจัยของ Grimes ซึ่งเป็นนักวิจัยจาก Pennsylvania State University สหรัฐอเมริกา และกลุ่มวิจัยของ Schmuki ซึ่งเป็นนักวิจัยจาก University of Erlangen-Nuremberg เยอรมัน ทั้งสองกลุ่มวิจัยนี้ได้แข่งขันกันพัฒนา  $\text{TiO}_2$  nanotube จนมีผลงานตีพิมพ์เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างงานวิจัย เช่น Ghicov

*et al.* 2005 ซึ่งเป็นกลุ่มวิจัยของ Schmuki ได้ศึกษาการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างท่อขนาดนาโน ( $\text{TiO}_2$  nanotubes) ด้วยการเตรียมในสารละลายฟอสเฟตที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์ไอออนอยู่ด้วย โดยใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตรเป็น working electrode ใช้แพลทินัม (Pt) เป็น counter electrode และใช้  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  (1 M KCl) เป็น reference electrode มีการควบคุมให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า พีเอช และระยะเวลา จนทำให้ได้  $\text{TiO}_2$  nanotubes ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ กัน ในช่วง 40 – 100 นาโนเมตรและมีความยาวในช่วง 100 นาโนเมตร ถึง 4 ไมโครเมตร และ *Albu et al.* 2007 นักวิจัยในกลุ่มของ Schmuki ได้ตีพิมพ์การพัฒนา  $\text{TiO}_2$  nanotubes ที่มีความยาวถึง 250 ไมโครเมตร ส่วน *Shankar et al.* 2007 ซึ่งเป็นกลุ่มวิจัยของ Grimes ได้พัฒนา  $\text{TiO}_2$  nanotubes จนมีความยาวถึง 220 ไมโครเมตร นอกจากกลุ่มวิจัยทั้งสองกลุ่มนี้จะแข่งขันกันพัฒนาในเรื่องของความยาวของ  $\text{TiO}_2$  nanotubes แล้ว ทั้งสองกลุ่มวิจัยยังแข่งขันกันพัฒนาในเรื่องการทำ  $\text{TiO}_2$  nanotubes ให้เป็นเมมเบรนอีกด้วย ซึ่งเห็นได้จากงานวิจัยของ *Albu et al.* 2007 (กลุ่มวิจัยของ Schmuki) ได้ตีพิมพ์การทำ  $\text{TiO}_2$  nanotubes เมมเบรนได้สำเร็จ ส่วน *Paulose et al.* 2008 (กลุ่มวิจัยของ Grimes) ได้ตีพิมพ์การทำ  $\text{TiO}_2$  nanotubes เมมเบรนที่มีความหนาในช่วง 4.4 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตรในวารสาร *Journal of Membrane Science*

ซึ่งจากทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการพัฒนา  $\text{TiO}_2$  nanotubes และอีกทั้งผู้วิจัยได้ทำงานวิจัยด้านการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ เช่น  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{WO}_3$  ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทราบถึงเทคนิคและสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ให้ได้เป็นโครงสร้าง  $\text{TiO}_2$  nanotubes และ  $\text{WO}_3$  nanoporous ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเป็นโครงสร้างนาโนของโลหะออกไซด์มีหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย พีเอช ปริมาณน้ำที่เป็นส่วนประกอบในสารละลาย สารเติมเต็ม ความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่ให้ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงและต้องควบคุมในการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ให้ได้ตามที่ต้องการ

### 2.3 การศึกษาการทดสอบคุณสมบัติการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ของโลหะออกไซด์

ในปี 2010 Zhao และคณะ ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ของ  $\text{TiO}_2$  nanotube ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอโนไดเซชัน โดยได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง pH sensitivity และ hydrophilicity และลักษณะพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  nanotube พบว่า amorphous  $\text{TiO}_2$  nanotube ให้การตอบสนองค่าพีเอชได้ดีกว่า anatase  $\text{TiO}_2$  nanotube

Pan และ Liao ในปี 2008 ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ของ  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  และ  $\text{PrTiO}_3$  ซึ่งปะติดบนซิลิคอนด้วยวิธี sputtering พบว่า  $\text{PrTiO}_3$  ให้การ

ตอบสนองค่าพีเอชดีว่า  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  โดยให้ค่า sensitivity สูงถึง 56.8 mV/pH ในสารละลายพีเอช 2 ถึง 12 และมีค่า hysteresis ต่ำเท่ากับ 2.84 mV ในการวัดพีเอช 7-4-7-10-7 นอกจากนั้นในปี 2007 Pan และ Liao ยังได้ศึกษาถึง  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมโดยใช้อัตราการไหลของอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 25/2 ในการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ พบว่าให้ค่า sensitivity สูงถึง 54.5 mV/pH ในสารละลายพีเอช 2 ถึง 12 และมีค่า hysteresis ต่ำเท่ากับ 4.78 mV และ 6.39 mV ในการวัดพีเอช 7-4-7-10-7 และ 7-10-7-4-7 ตามลำดับ

โลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ ถูกนำมาศึกษาถึงคุณสมบัติการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์ ได้แก่  $\text{SnO}_2$  (Tsai และคณะ 2005)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Chou และ Weng 2001) amorphous  $\text{WO}_3$  (Chiang และคณะ 2001) เป็นต้น



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอนโอดเซชัน

โลหะออกไซด์ที่จะนำมาใช้ในการวิจัยนี้ ได้แก่  $\text{TiO}_2$   $\text{WO}_3$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยในขั้นตอนการสังเคราะห์นี้จะใช้วิธีการแอนโอดเซชันทั้งหมด

การสังเคราะห์โลหะออกไซด์โดยวิธีแอนโอดเซชัน เป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียมมีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Nanotubes) เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่อิเล็กโทรไลต์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell) ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ใช้แผ่นไทเทเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และแพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองลงในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) ซึ่งแสดงลักษณะการทดลองได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะการทดลองกระบวนการแอนโอดเซชัน (ศรีัญญา, 2554)

### 3.1.1 การสังเคราะห์ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

ขั้นตอนการสังเคราะห์อลูมิเนียมออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันนั้น จะใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยกรรไกรให้ได้ขนาดที่ต้องการคือ  $3 \times 2$  เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แล้วนำแผ่นอลูมิเนียมที่มีขนาดตามต้องการ ไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับ เป้าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการแอโนไดเซชัน โดยกระบวนการแอโนไดเซชันจะประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะใช้แผ่นอลูมิเนียมมาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte)



รูปที่ 3.2 แผ่นอลูมิเนียมที่ตัดให้มีขนาดตามต้องการ



รูปที่ 3.3 การล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก



ในการทดลองการสังเคราะห์  $Al_2O_3$  ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอช อิเล็กโทรดโดยวิธีแอนโอดิเซชันจะกำหนดพื้นที่ผิวของอลูมิเนียมที่จะได้รับการแอนโอดิเซชันที่  $3 \text{ cm}^2$  โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

### 3.1.1.1 การแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม

การสังเคราะห์  $Al_2O_3$  โดยใช้กระบวนการแอนโอดิเซชันบนแผ่นอะลูมิเนียมโดยการแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้าจะทำการทดลองแอนโอดิเซชัน โดยใช้ 0.3 M ของกรดออกซาลิกเป็นสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) โดยควบคุมสภาวะในการแอนโอดิเซชันไว้ที่ 1 ชั่วโมง และแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่ 10, 20, 30 และ 40 โวลต์ ซึ่งในการแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่ 40 โวลต์ จะใช้แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุตั้งต้นต่างกันคือ (1) แผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย และ (2) แผ่นอลูมิเนียมที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย โดยการขัดแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นนั้น จะทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 เป็นเวลา 5 นาที หลังจากทำการทดลองโดยวิธีแอนโอดิเซชัน ขั้นตอนต่อไปตัวอย่างจะถูกนำไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนและตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อค ซึ่งในแต่ละสภาวะจะทำการศึกษา 2 ซ้ำเพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมของ  $Al_2O_3$

สภาวะแรงดัน (โวลต์)	พื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม	เวลา (นาที)
10	ไม่มีการขัด	60
20	ไม่มีการขัด	
30	ไม่มีการขัด	
40	ไม่มีการขัด	
	มีการขัด	

### 3.1.1.2 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

การสังเคราะห์  $Al_2O_3$  โดยใช้กระบวนการแอนโอดิเซชันบนแผ่นอะลูมิเนียมโดยการแปรเปลี่ยนสภาวะสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ 0.3 M ของกรดออกซาลิกเป็นสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) โดยควบคุมสภาวะในการแอนโอดิเซชันไว้ที่ แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 คือ 30 V โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 10, 30, 60, 120 และ 180 นาทีและ 40 V โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 10, 30, 60 นาที หลังจากทำการทดลองโดยวิธีแอนโอดิเซชัน ขั้นตอน

ต่อไปตัวอย่างจะถูกนำไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนและตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อค ซึ่งในแต่ละสภาวะจะทำการศึกษา 2 ชั่วโมงเพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.2

**ตาราง 3.2** การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ  $Al_2O_3$

สภาวะแรงดัน (โวลต์)	พื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม	เวลา (นาที)
40	ไม่มีการขัด	10
	ไม่มีการขัด	30
	ไม่มีการขัด	60
	ไม่มีการขัด	120
	ไม่มีการขัด	180

### 3.1.2 การสังเคราะห์ $WO_3$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

ขั้นตอนการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันนั้น จะใช้แผ่นทั้งสแตนที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยกรรไกรให้ได้ขนาดที่ต้องการคือ  $3 \times 2$  เซนติเมตร แล้วนำแผ่นทั้งสแตน ที่มีขนาดตามต้องการ ไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับ เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยกระบวนการแอนโนไดเซชันจะประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะใช้แผ่นทั้งสแตนมาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) ในการทดลองการสังเคราะห์  $WO_3$  ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชโอเล็กโทรดโดยวิธีแอนโนไดเซชัน จะกำหนดพื้นที่ผิวของอลูมิเนียมที่จะได้รับการแอนโนไดเซชันที่  $3 \text{ cm}^2$  โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

#### 3.1.2.1 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ $WO_3$

การสังเคราะห์  $WO_3$  โดยใช้กระบวนการแอนโนไดเซชันบนแผ่นทั้งสแตนโดยการแปรเปลี่ยนสภาวะสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ 0.15 M NaF ใน เป็นสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) และควบคุมความต่างศักย์ 45 โวลต์ (Arnanpapha และ Apichon, 2012) โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 60, 120, 240 และ 360 นาที หลังจากทำการทดลองโดยวิธีแอนโนได

เซชันเสร็จ ตัวอย่างจะถูกนำไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนและตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อค ซึ่งในแต่ละสภาวะจะทำการศึกษา 2 ซ้ำเพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ  $WO_3$

สภาวะแรงดัน (โวลต์)	พื้นผิวของแผ่นทังสเตน	เวลา (นาที)
40	ไม่มีการขัด	10
	ไม่มีการขัด	30
	ไม่มีการขัด	60
	ไม่มีการขัด	120
	ไม่มีการขัด	180

### 3.1.3 การสังเคราะห์ $TiO_2$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันนั้น จะใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยกรรไกรให้ได้ขนาดที่ต้องการคือ  $3 \times 2$  เซนติเมตร แล้วนำไทเทเนียม ที่มีขนาดตามต้องการ ไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับ เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยกระบวนการแอนโนไดเซชันจะประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะใช้แผ่นไทเทเนียมมาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) ในการทดลองการสังเคราะห์  $TiO_2$  ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอซีเล็กโทรดโดยวิธีแอนโนไดเซชัน จะกำหนดพื้นที่ผิวของ  $TiO_2$  ที่จะได้รับการแอนโนไดเซชันที่  $3 \text{ cm}^2$  โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

#### 3.1.3.1 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ $TiO_2$

การสังเคราะห์  $TiO_2$  โดยใช้กระบวนการแอนโนไดเซชันบนแผ่นไทเทเนียมโดยการแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมโดยใช้  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ , Glycerol:  $H_2O$  (60:40) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) และควบคุมความต่างศักย์ 20 โวลต์ (Sarunya และ Apichon, 2012) โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 60, 180 และ 300 หลังจากที่ทำการศึกษาทดลองโดยวิธี

แอโนไดเซชันเสร็จ ตัวอย่างจะถูกนำไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนและตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อค ซึ่งในแต่ละสภาวะจะทำการศึกษา 2 ชั่วโมง เพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.4

**ตารางที่ 3.4** การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของ  $\text{TiO}_2$

สภาวะแรงดัน (โวลต์)	พื้นผิวของแผ่นไทเทเนียม	เวลา (นาที)
20	ไม่มีการขีด	60
	ไม่มีการขีด	180
	ไม่มีการขีด	300

### 3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของโลหะออกไซด์

หลังจากทำการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะของโลหะออกไซด์ ดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว (Morphology) ของตัวเร่งโลหะออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นโดยเครื่องมือจะบันทึกอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้และแปลงสัญญาณอิเล็กโทรมิกส์แสดงเป็นภาพบนหน้าจอ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเป็น 3 มิติ

3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโลหะออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นให้ไปกระทบกับโลหะออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่ถูกยิงออกไปยังมุมที่ต่างกัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ต่างกัน ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการตรวจสอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้

3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของโลหะออกไซด์โดยการวัด contact angle

การศึกษาคุณสมบัติด้านของความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของวัสดุ (Hydrophilicity and Hydrophobicity) ซึ่งใช้แสดงการยึดเกาะของหยดน้ำบนพื้นผิว อธิบายโดยอาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิวของวัสดุและการทำมุมของหยดน้ำ (contact angle) มุมสัมผัสของน้ำที่น้อยกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และ ของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสของน้ำที่มากกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และ ของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง สำหรับพื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า hydrophobic

### 3.3 การเตรียมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์อ่านวัดศักย์ไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยใช้โลหะออกไซด์ที่เลือกมาจากการทดลองข้างต้นเป็นพีเอชอีเล็กโทรดและใช้ Ag/AgCl (sat KCl) เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง ซึ่งในการเตรียมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความต่างศักย์นั้นจะทำการเตรียมโลหะออกไซด์สำหรับการนำไปประยุกต์เป็นพีเอชอีเล็กโทรดและการต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับวงจรไฟฟ้าเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.3.1 การเตรียมโลหะออกไซด์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอีเล็กโทรด

ในขั้นตอนการเตรียมการเตรียมโลหะออกไซด์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอีเล็กโทรด จะเป็นการนำโลหะออกไซด์แต่ละชนิดคือ  $Al_2O_3$   $TiO_2$  และ  $WO_3$  ที่ได้จากการเตรียมขึ้นด้วยวิธีแอโนไดเซชัน โดยจะนำมาติดกับแผ่น PCB (printed circuit board) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอีเล็กโทรดมีขั้นตอนดังนี้

(1) ตัดแผ่น PCB ด้วยเครื่องจักรกลให้มีขนาด  $1.4 * 15$  ตารางเซนติเมตร หลังจากนั้น นำแผ่น PCB ไปล้าง โดยทำการแช่ใน Acetone และ น้ำ DI ขึ้นตอนละ 5 นาที และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

(2) แผ่นโลหะออกไซด์  $Al_2O_3$   $TiO_2$  และ  $WO_3$  นำไปตัดด้วยเครื่องจักรกลให้มีขนาด  $1*1$  ตารางเซนติเมตร

(3) ติดแผ่นโลหะออกไซด์กับแผ่น PCB ด้วยเทปกาวสองหน้าและใช้ silver paste แปะเชื่อมระหว่างโลหะออกไซด์กับแผ่น PCB และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 210 นาที

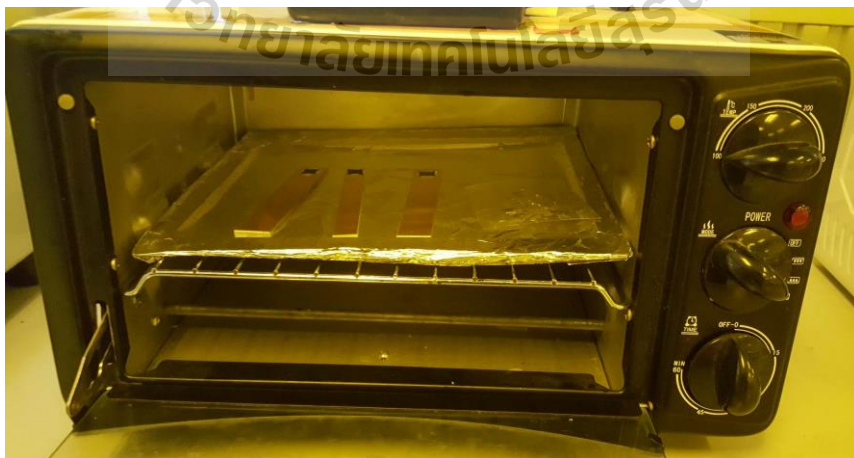
(4) ใช้กาว epoxy ปิดทับพื้นที่ของแผ่น PCB ที่ไม่ได้ใช้งานทั้งหมด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



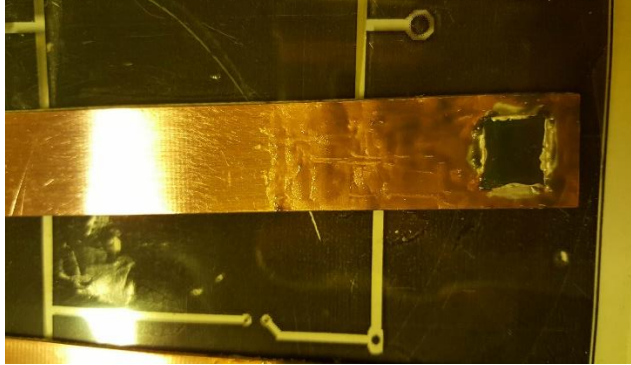
รูปที่ 3.4 แผ่น PCB สำหรับนำไปติดกับโลหะออกไซด์



รูปที่ 3.5 โลหะออกไซด์ที่ติดกับแผ่น PCB และแปะเชื่อมด้วย silver paste



รูปที่ 3.6 เตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 210 นาที



รูปที่ 3.7 แผ่น PCB ที่ทากาว epoxy ปิดทับพื้นที่ไม่ได้ใช้งาน

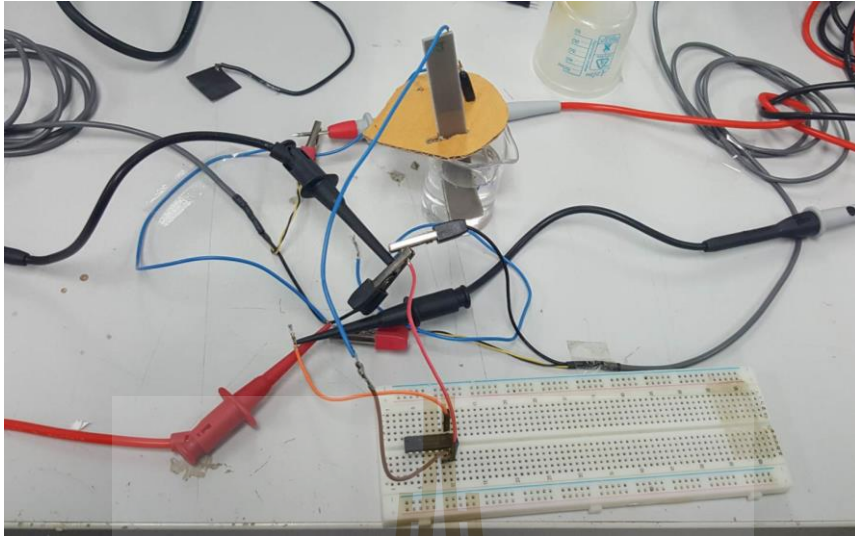


รูปที่ 3.8 พีเอซีเล็กโทรดที่นำไปใช้ในการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้า

### 3.3.2 การต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับวงจรไฟฟ้าเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

การต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับวงจรไฟฟ้าเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยมีการเตรียมอุปกรณ์ดังนี้

- (1) พีเอซีเล็กโทรดที่เตรียมได้จากการทดลองขั้นตอนแรกจะนำไปเชื่อมกับสายไฟ โดยใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน สำหรับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะใช้ Ag/AgCl ซึ่งทั้ง 2 ชั้นส่วนนี้จะถูกติดตั้งอยู่บนกระดาษแข็งที่เจาะเป็นช่องสำหรับใส่ชิ้นงาน
- (2) ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ MOSFET model CD4007UBE จะต่อเข้ากับโปรโตบอร์ด
- (3) power supply สำหรับจ่ายความต่างศักย์ให้วงจรไฟฟ้า
- (4) วงจรทั้งหมดจะถูกต่อสายไฟโดยจะต่อเข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง



รูปที่ 3.9 การต่อวงจรสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์

#### 3.4.1 การวัดค่า sensitivity

ค่า Sensitivity สามารถหาได้จากการใช้อิเล็กโทรดวัดค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน โดยจะใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอช 4 7 9 และ 10 เพื่อดูค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อพีเอช มีหน่วยเป็น mV/pH ลักษณะของผลการวัดค่า sensitivity



### 3.4.2 การวัดค่า hysteresis effect

ค่า hysteresis effect คือ ผลต่างสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดจากค่าที่แท้จริงระหว่างการอ่านขาขึ้นกับการอ่านขาลงที่จุดเดียวกันมีหน่วยเป็น mV ตัวอย่างเช่นเมื่อวัดสารละลายที่พีเอช 7 ตามด้วยการวัดสารละลายที่พีเอช 4 ตามด้วยวัดสารละลายที่พีเอช 7 (ขาลง) หรือเมื่อวัดสารละลายที่พีเอช 7 ตามด้วยการวัดสารละลายที่พีเอช 10 ตามด้วยวัดสารละลายที่พีเอช 7 (ขาขึ้น) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่จุดเดียวกัน (ที่พีเอช 7) ควรเป็นค่าเดียวกัน แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก hysteresis effect

ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้อิเล็กโทรดโลหะออกไซด์แต่ละชนิดที่เลือกมาทำการทดสอบโดยใช้แบบแผนการทดลองคล้ายกับ Tsai และคณะ ในปี 2005 คือ จะทำการทดสอบเป็นรอบการวัดใน 2 กรณี คือ

- วัดกรดก่อน โดยวัดที่พีเอช 7 - 4 - 7 - 10 - 7
- วัดเบสก่อน โดยวัดที่พีเอช 7 - 10 - 7 - 4 - 7

### 3.5 สถานที่ทำการทดลอง

อาคารเครื่องมือ 4, 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) : Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

##### 4.1.1 การสังเคราะห์อลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

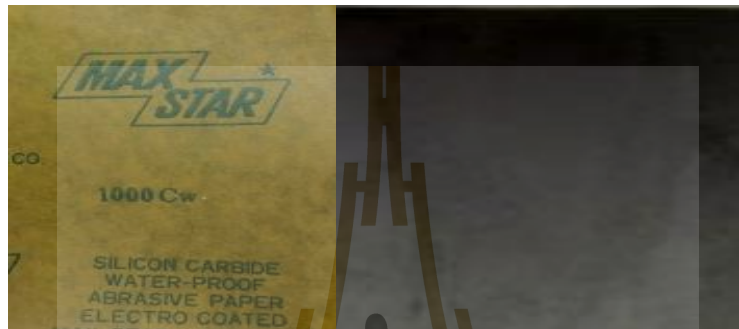
ในสำหรับการสังเคราะห์  $Al_2O_3$  ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอีเล็กโทรด โดยใช้กระบวนการแอนโนไดเซชัน มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า, โวลต์มิเตอร์, สายไฟ, อลูมิเนียม (Al), แพลตตินัม (Pt), สารเคมี ได้แก่ กรดออกซาลิก ในขั้นตอนเตรียมวัสดุตั้งต้นนั้นจะใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยด้วยเครื่องจักรกลให้ได้ขนาดที่กำหนดคือ  $3 \times 2$  เซนติเมตร แล้วนำแผ่นอลูมิเนียมที่มีขนาดตามต้องการ นำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับ เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยกระบวนการแอนโนไดเซชันจะประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะใช้แผ่นอลูมิเนียมมาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลตตินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เมื่อสังเคราะห์  $Al_2O_3$  ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันแล้วจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของ  $Al_2O_3$  ที่เตรียมได้ คือ วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของโลหะออกไซด์ โดยการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM, คุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $Al_2O_3$  โดยการวัด water contact angle และศึกษาองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD) ดังมีผลการทดลองดังนี้

4.1.1.1 ผลของการแปรเปลี่ยนสถานะแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FE-SEM

ทำการทดลองแอนโนไดเซชัน โดยใช้ 0.3 M ของกรดออกซาลิกเป็นสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) โดยควบคุมสถานะในการแอนโนไดเซชันไว้ที่ 1 ชั่วโมง โดยแปรเปลี่ยนสถานะแรงดันไฟฟ้าที่ 10, 20, 30 และ 40 โวลต์ ในการแปรเปลี่ยนสถานะแรงดันไฟฟ้าที่ 40 โวลต์จะใช้แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุตั้งต้นต่างกันคือ แผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย และแผ่นอลูมิเนียมที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย โดยการขัดแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นนั้น จะทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 เป็นเวลา 5 นาที

ในแต่สภาวะจะทำการศึกษา 2 ชั่วโมงเพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยหลังจากที่ทำการทดลองโดยวิธีแอนโอดิเซชันเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อคเพื่อรอสำหรับการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM

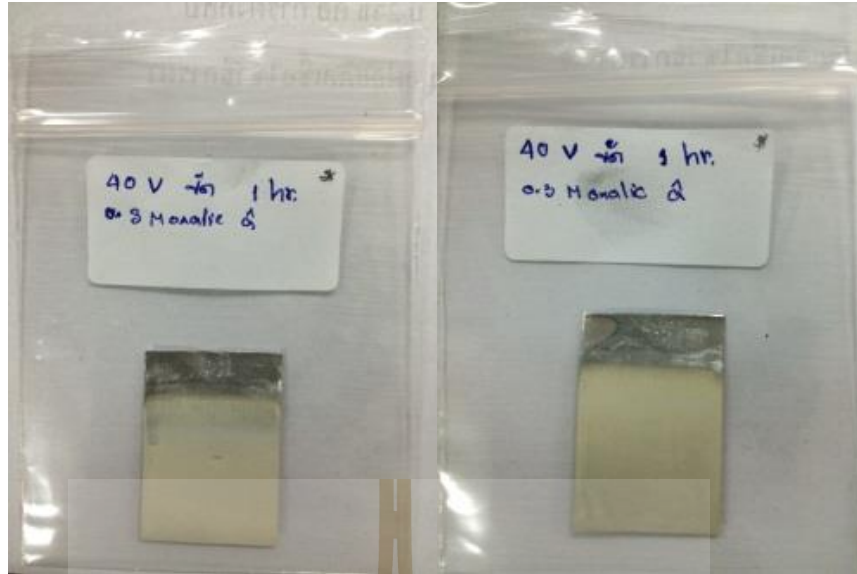
หลังจากการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ก็จะสามารถเลือกสภาวะแรงดันไฟฟ้าของ  $Al_2O_3$  ที่มีคุณมีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอซีอิเล็กทรอนิกส์ไปทำการทดลองที่ 2 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม



รูปที่ 4.1 กระดาษทรายเบอร์ 1000



รูปที่ 4.2 แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้น (รูปซ้ายขัด รูปขวาไม่ขัด)

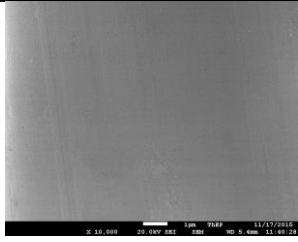
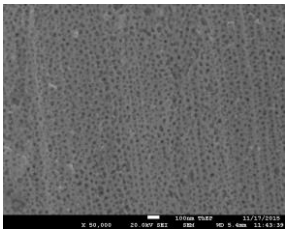
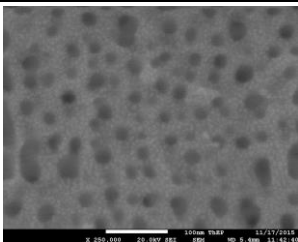
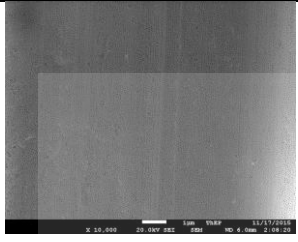
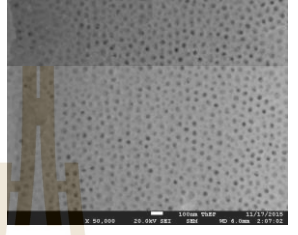
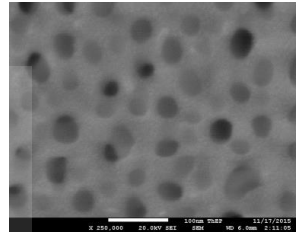
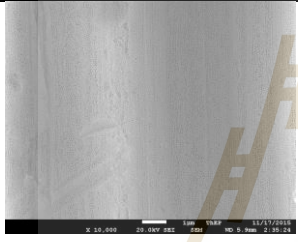
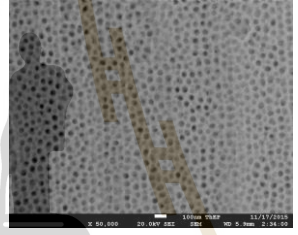
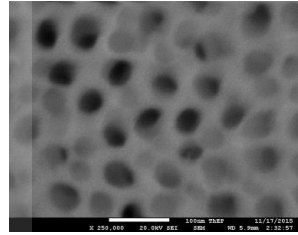
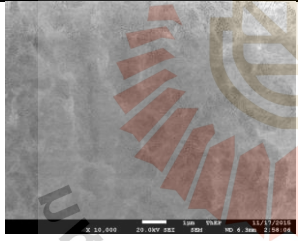
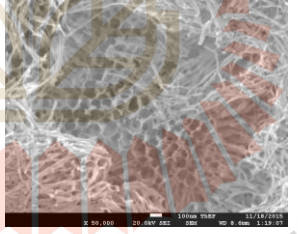
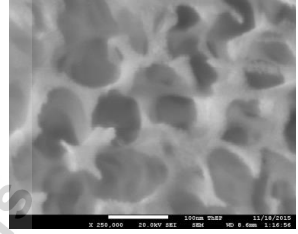
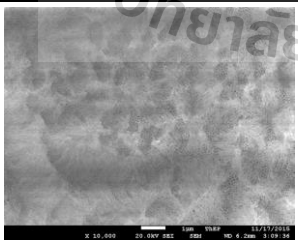
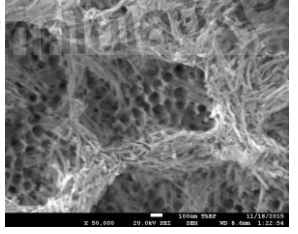
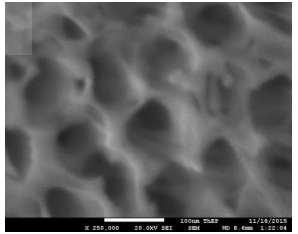
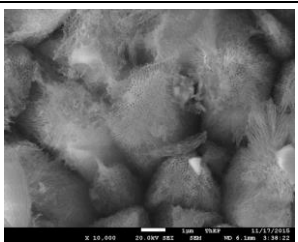
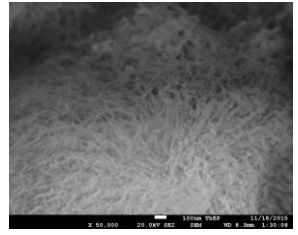
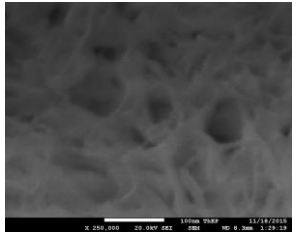


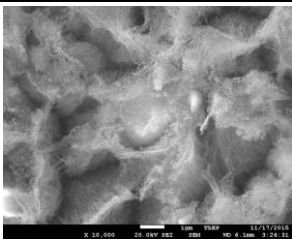
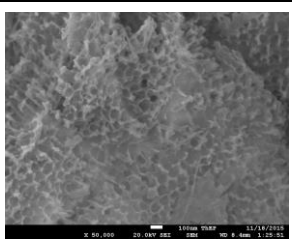
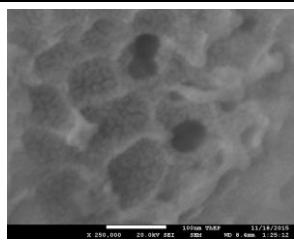
รูปที่ 4.3 แผ่นอลูมิเนียมที่แอนโอดเซชันเสร็จเรียบร้อยแล้วและเก็บไว้ในถุงซิปล็อค

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้านพื้นผิวของโลหะออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (FE-SEM) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 การแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย FE-SEM ของ  $Al_2O_3$  ของการทดลองที่ 1 การแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม

Potential	กำลังขยาย		
	X10000	X50000	X250000
10 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 1			
10 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 2			

Potential	กำลังขยาย		
	X10000	X50000	X250000
20 โวลต์ (ไม่ขัด วัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 1			
30 โวลต์ (ไม่ขัด วัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 1			
30 โวลต์ (ไม่ขัด วัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 2			
40 โวลต์ (ไม่ขัด วัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 1			
40 โวลต์ (ไม่ขัด วัสดุตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 2			
40 โวลต์ (ขัดวัสดุ ตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 1			

Potential	กำลังขยาย		
	X10000	X50000	X250000
40 โวลต์ (ซั้ววัสดุ ตั้งต้น) เวลา 1 ชั่วโมง 0.3 M Oxalic Acid Sample 2			

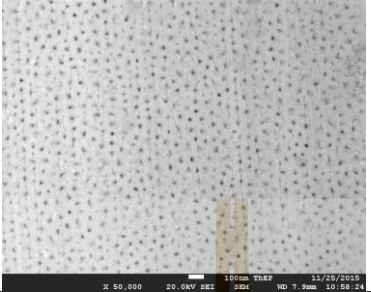
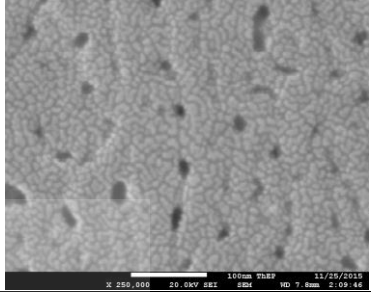
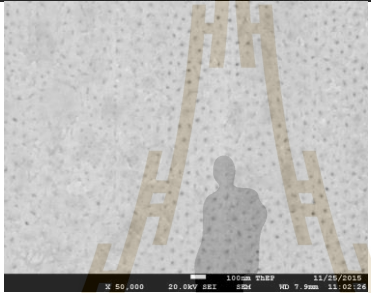
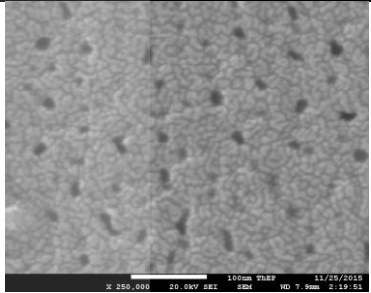
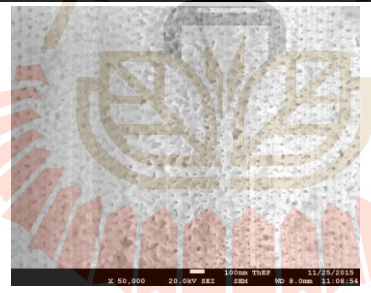
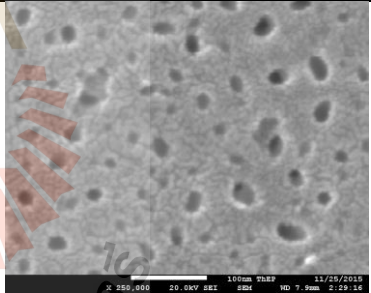
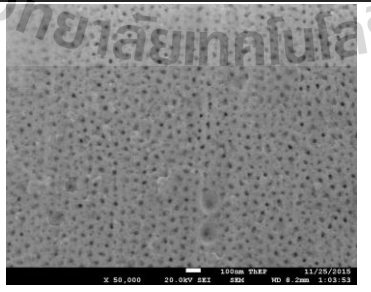
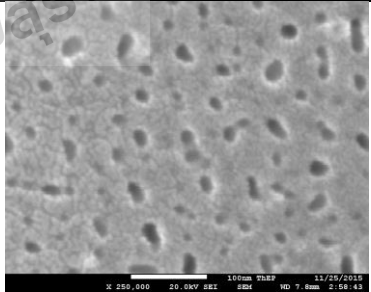
4.1.1.2 ผลของการแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FE-SEM

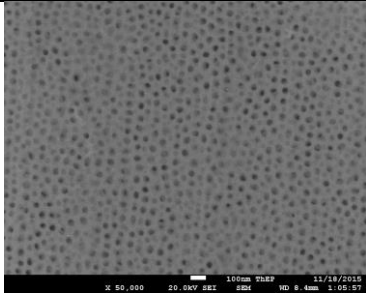
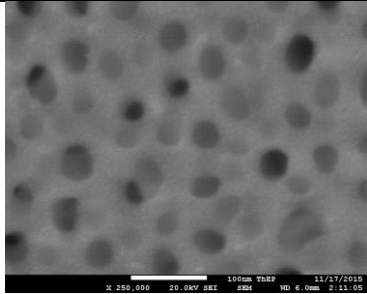
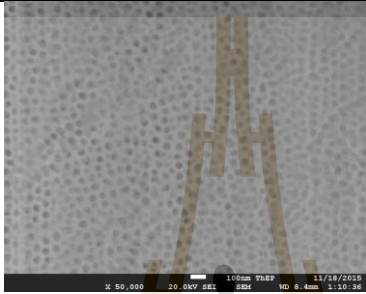
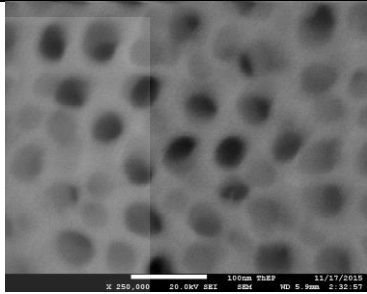
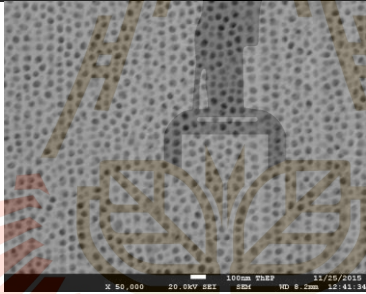
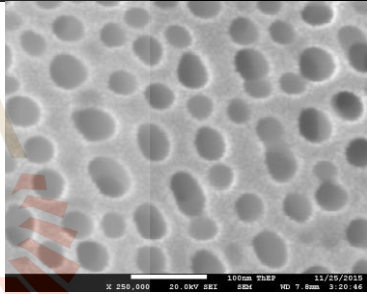
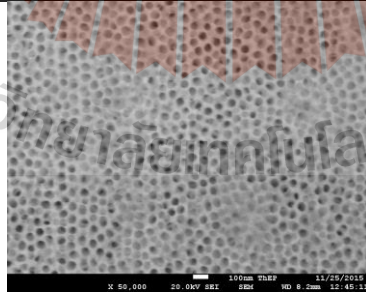
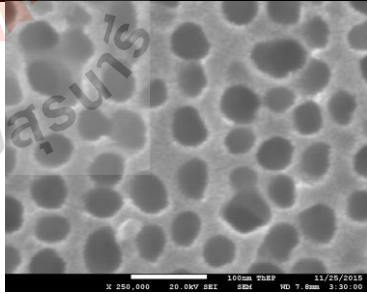
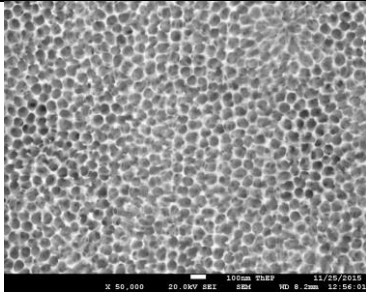
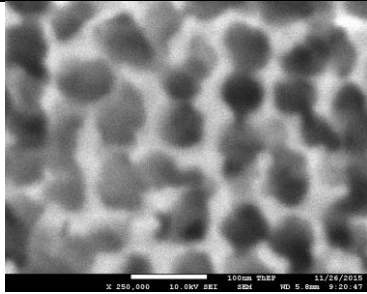
ทำการทดลองแอโนไดเซชัน โดยใช้ 0.3 M ของกรดออกซาลิกเป็นสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) โดยควบคุมสภาวะในการแอโนไดเซชันไว้ที่ แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 คือ 30 V โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 10, 30, 60, 120 และ 180 นาทีและ 40 V โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 10, 30, 60 นาที ในแต่ละสภาวะจะทำการศึกษา 2 ชั่วโมงเพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยหลังจากทำการทดลองโดยวิธีแอโนไดเซชันเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนและตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อคเพื่อรอสำหรับการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM

หลังจากการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ก็จะสามารถเลือกสภาวะเวลา ของ  $Al_2O_3$  ที่มีคุณมีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอซีอิเล็กโทรดไปทำการทดลองการแปรเปลี่ยนสภาวะความเข้มข้นของกรดออกซาลิก เพื่อหาความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่เหมาะสม

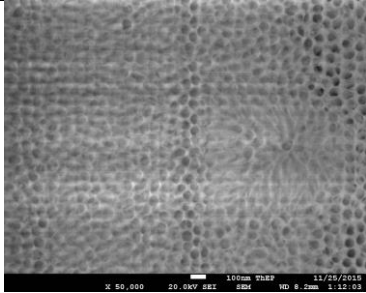
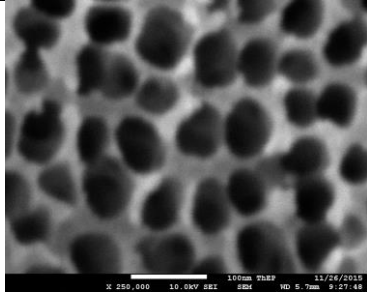
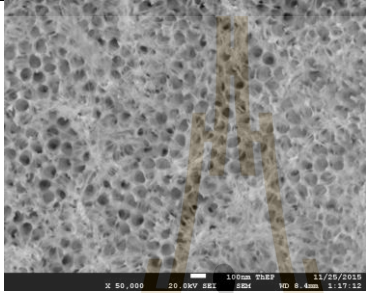
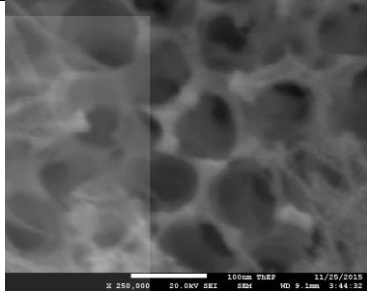
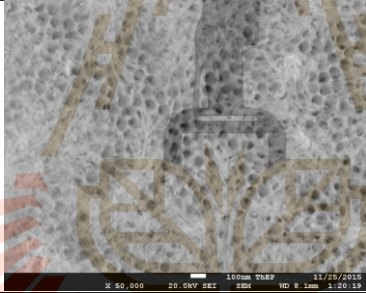
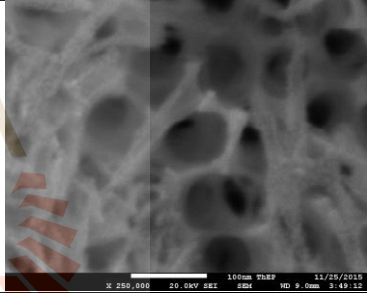
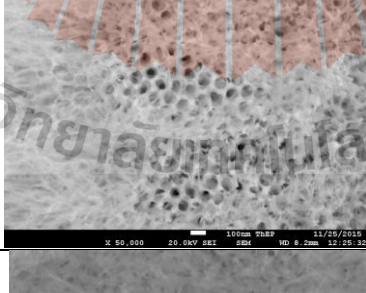
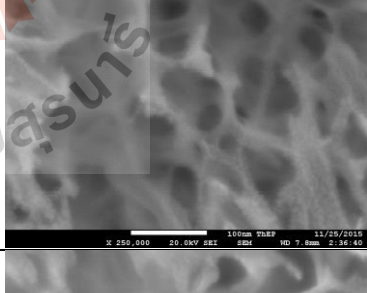
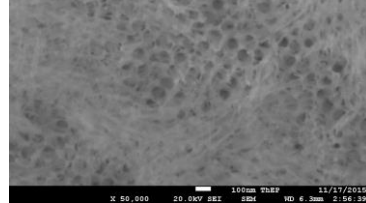
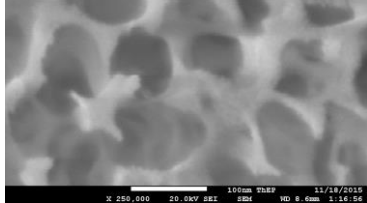
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้านพื้นผิวของโลหะออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ไมโครสโคปแบบส่องกราด (FE-SEM) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

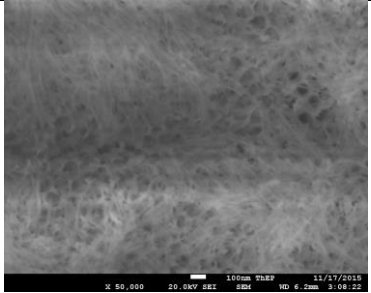
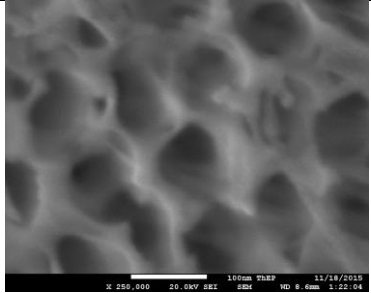
ตารางที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย FE-SEM ของ  $Al_2O_3$  ของการทดลองที่ 2 การแปรเปลี่ยนสภาวะเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ ระยะเวลา 10 นาที

Potential	กำลังขยาย	
	X50000	X250000
30 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 10 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		
30 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 10 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		
30 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 30 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		
30 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 30 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		

Potential	กำลังขยาย	
	X50000	X250000
30 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 60 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		
30 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 60 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		
30 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 120 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		
30 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 120 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		
30 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 180 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		



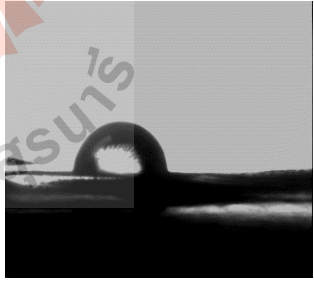
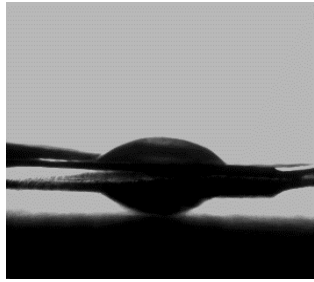
Potential	กำลังขยาย	
	X50000	X250000
30 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 180 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		
40 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 10 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		
40 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 10 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		
40 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 30 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		
40 โวลต์ (ไม้ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 60 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 1		

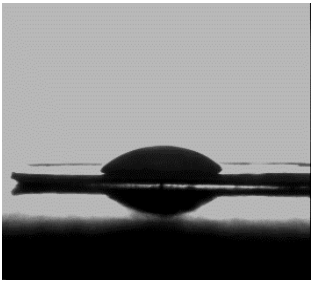
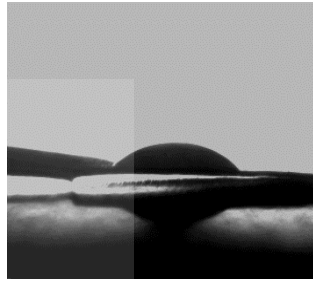
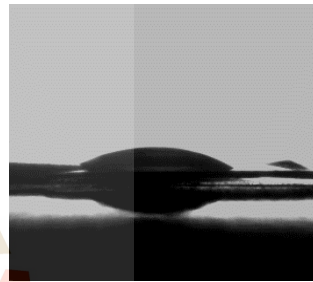
Potential	กำลังขยาย	
	X50000	X250000
40 โวลต์ (ไม่ขัดวัสดุตั้งต้น) เวลา 60 นาที 0.3 M Oxalic Acid Sample 2		

#### 4.1.1.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของ $Al_2O_3$ โดยการวัด water contact

เมื่อสังเคราะห์  $Al_2O_3$  ด้วยวิธี แอนโนไดเซชันแล้วจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของ  $Al_2O_3$  ที่เตรียมได้ คือ วิเคราะห์คุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $Al_2O_3$  โดยการวัด water contact angle ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $Al_2O_3$  โดยการวัด water contact angle ดังแสดงในตารางที่ 4.3

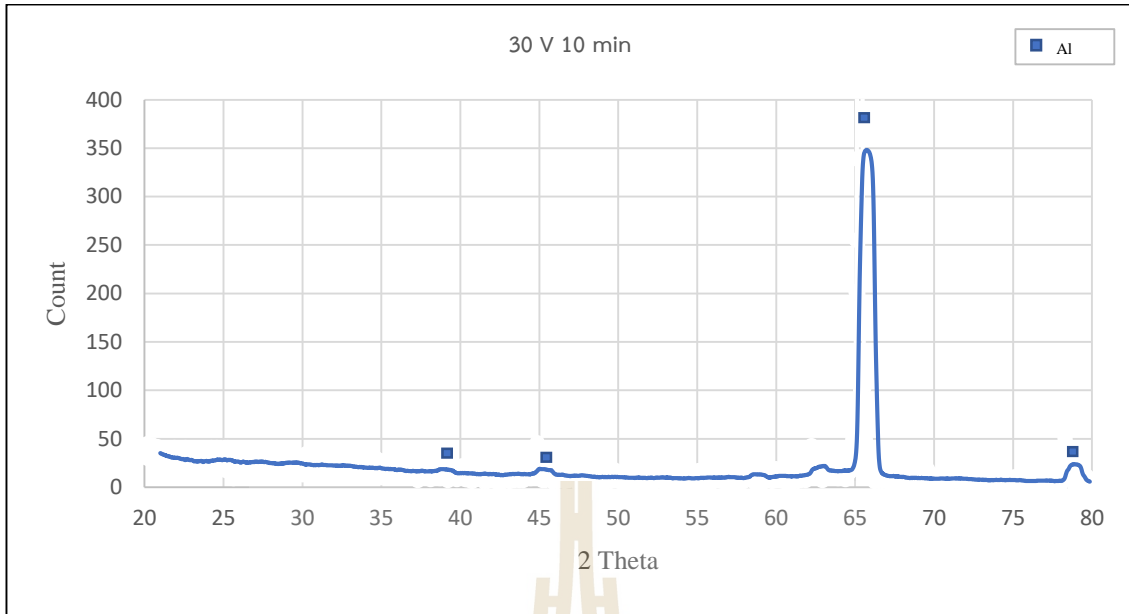
ตารางที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย water contact angle ของ  $Al_2O_3$

Potential	time	degree	picture
30 V	10 min	90.55	
	30 min	50.98	

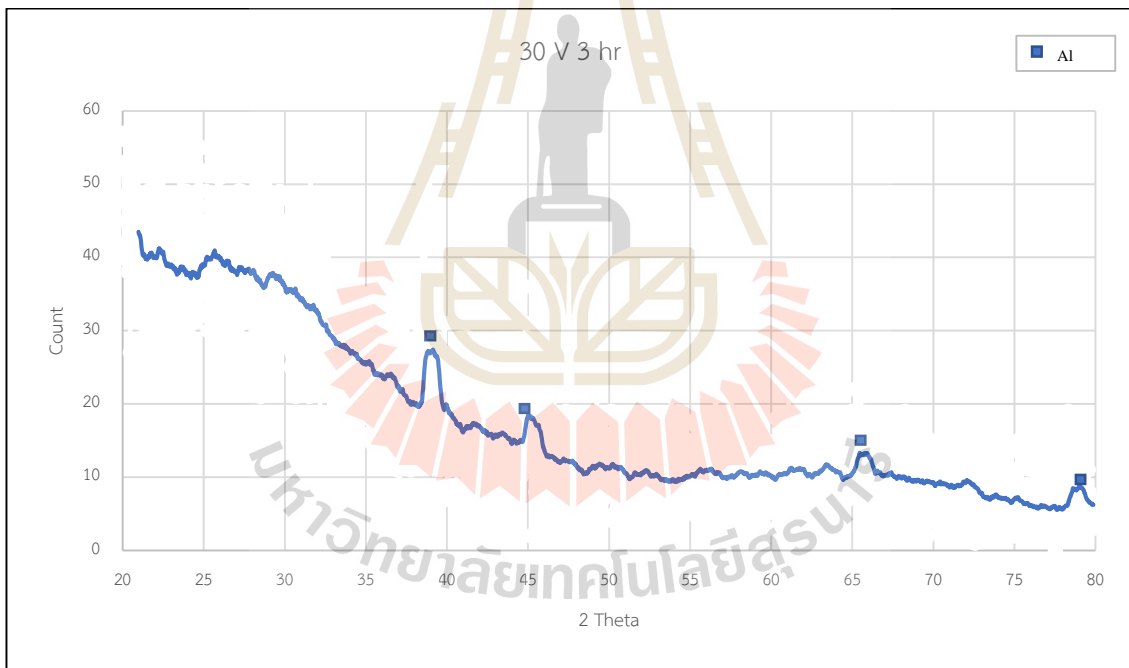
Potential	time	degree	picture
	1hr	46.28	
	2 hr	43.35	
40 V	10 min	44.33	

4.1.1.4 ผลการวิเคราะห์หาลองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD)

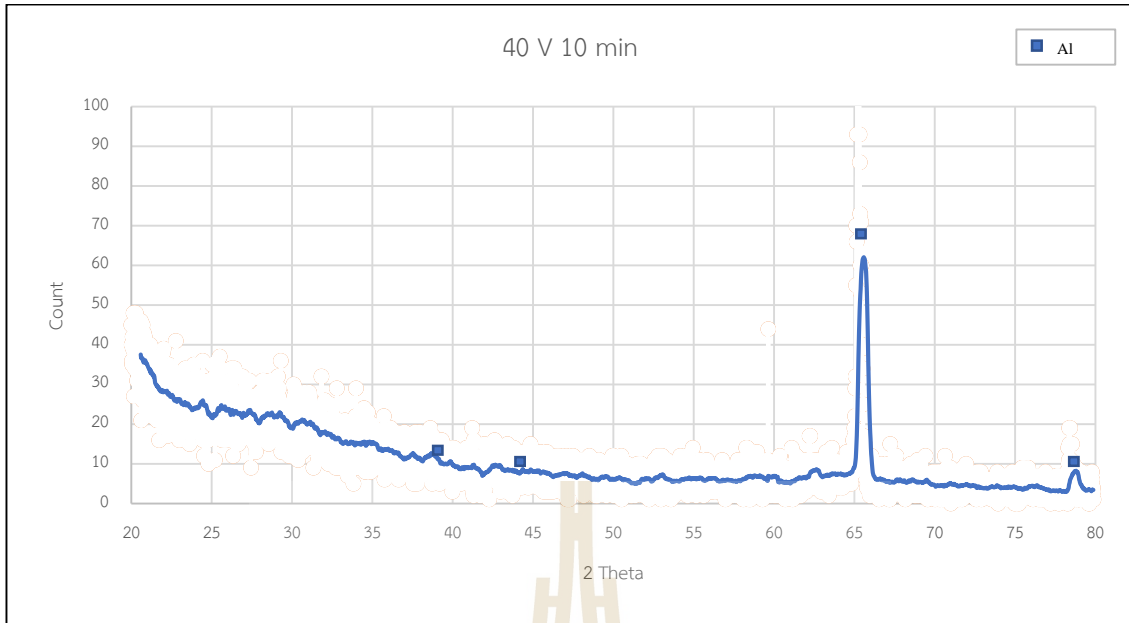
ในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อตรวจสอบว่า ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นออกไซด์ของอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่า พบแต่ XRD pattern ของอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ซึ่งจากทั้ง 3 กราฟสามารถบ่งชี้ได้ว่าอลูมิเนียมออกไซด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยวิธีแอโนดไตเซชันฟอร์มตัวเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous)



รูปที่ 4.4 XRD pattern of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ 30 โวลต์ 10 นาที



รูปที่ 4.5 XRD pattern of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ 30 โวลต์ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 XRD pattern of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 40 โวลต์ 10 นาที

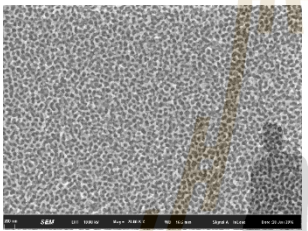
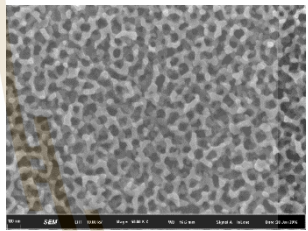
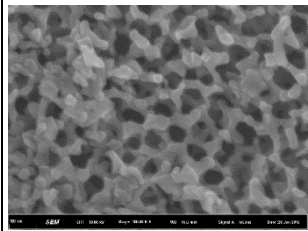
#### 4.1.2 ผลการทดลองสังเคราะห์ $\text{WO}_3$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

ในสำหรับการสังเคราะห์  $\text{WO}_3$  ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอชอีเล็กโทรด โดยใช้กระบวนการแอนโนไดเซชัน มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า, โวลต์มิเตอร์, สายไฟ, ทังสเตน, แพลตตินัม (Pt), สารเคมี ได้แก่ โซเดียมฟลูออไรด์ ในขั้นตอนเตรียมวัสดุตั้งต้นนั้นจะใช้แผ่นทังสเตนที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยด้วยเครื่องจักรกลให้ได้ขนาดที่กำหนดคือ  $3 \times 2$  เซนติเมตร แล้วนำแผ่นทังสเตนที่มีขนาดตามต้องการ นำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับ เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยกระบวนการแอนโนไดเซชันจะประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะใช้แผ่นทังสเตนมาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลตตินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เมื่อสังเคราะห์  $\text{WO}_3$  ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันแล้วจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของ  $\text{WO}_3$  ที่เตรียมได้ คือ วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของโลหะออกไซด์ โดยการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM และคุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $\text{WO}_3$  โดยการวัด water contact angle ซึ่งและศึกษาองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD) ดังมีผลการทดลองดังนี้

4.1.2.1 ผลการทดลองสังเคราะห์  $WO_3$  ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FE-SEM

จากการทดลองแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ โดยศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทดลองที่ 2 แสดงภาพพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่ามีลักษณะเป็น Nanoporous ทั่วทั้งแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 4.4

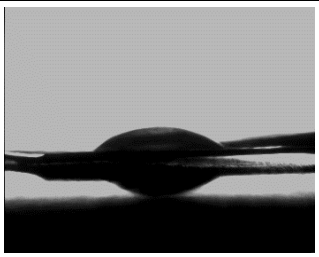
ตารางที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย FE-SEM ของ  $WO_3$

Magnification Condition	20000X	50000X	100000X
45 Volt, time 2 hr NaF 0.15 M			

4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $WO_3$  โดยการวัด water contact angle

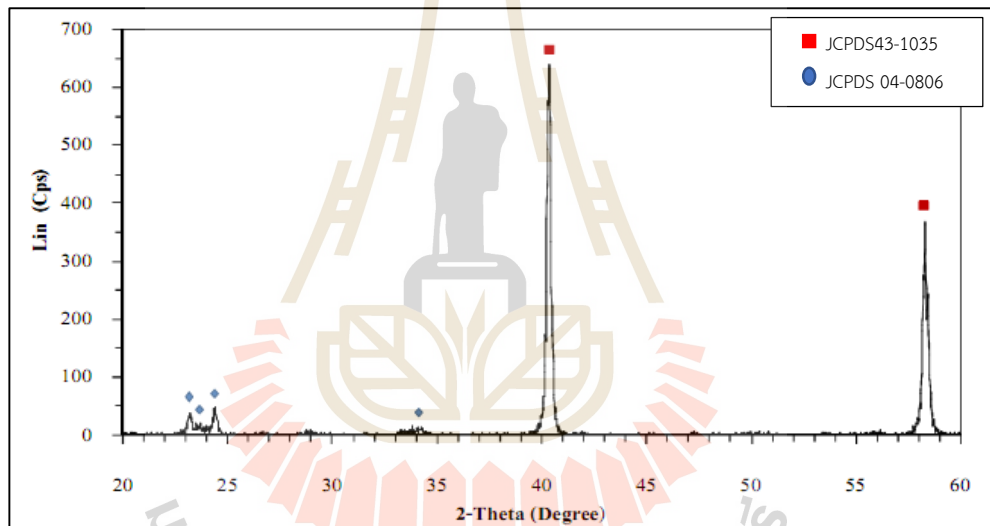
เมื่อสังเคราะห์  $WO_3$  ด้วยวิธี แอนโนไดเซชันแล้วจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของ  $WO_3$  ที่เตรียมได้ คือ วิเคราะห์คุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $WO_3$  โดยการวัด water contact angle ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ภาพถ่าย water contact angle ของ  $WO_3$

Condition	degree	picture
45 Volt, time 2 hr NaF 0.15 M	61.2	

#### 4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์จากตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเกิดโครงสร้างของทังสเทนในรูปแบบบอดี-เซนเตอร์คิวบิก (Body-centered cubic) ที่ 2 Theta เท่ากับ 40.34 องศา และ 58.31 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 04-0806 และเกิดเป็นโครงสร้างของทังสเทนไตรออกไซด์ในรูปแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 23.19 องศา 23.59 องศา 24.39 องศา และ 34.19 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 43-1035



รูปที่ 4.7 XRD pattern of  $WO_3$  ที่ 45 โวลต์ 120 นาที

#### 4.1.3 ผลของการทดลองสังเคราะห์ $TiO_2$ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

ในสำหรับการสังเคราะห์  $TiO_2$  ที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นพีเอช อิเล็กโทรด โดยใช้กระบวนการแอนโนไดเซชัน มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า, โวลต์มิเตอร์, สายไฟ, ไทเทเนียม, แพลตตินัม (Pt), สารเคมี ได้แก่ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ในขั้นตอนเตรียมวัสดุตั้งต้นนั้นจะใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยด้วยเครื่องจักรกลให้ได้ขนาดที่กำหนดคือ 3 x 2 เซนติเมตร แล้วนำแผ่นไทเทเนียมที่มีขนาดตามต้องการ นำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-

propanol และน้ำ DI ตามลำดับ เป้าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยกระบวนการแอนโนไดเซชันจะประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะใช้แผ่นไทเทเนียมมาเป็นต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เมื่อสังเคราะห์  $\text{TiO}_2$  ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันแล้วจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของ  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมได้ คือ วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของโลหะออกไซด์ โดยการนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM และคุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ  $\text{TiO}_2$  โดยการวัด water contact angle ซึ่งและศึกษาองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD) ดังมีผลการทดลองดังนี้

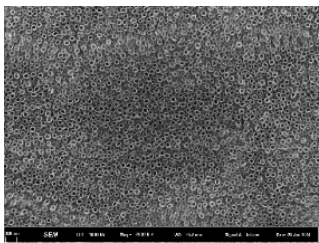
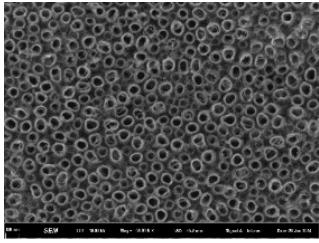
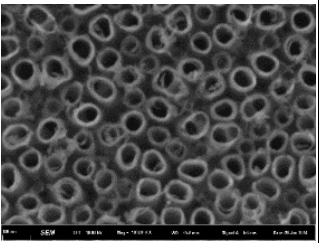
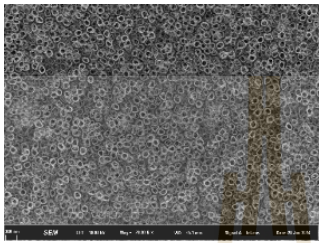
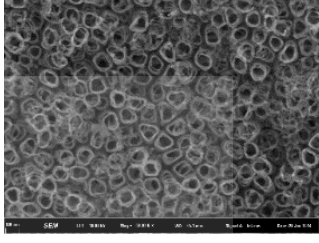
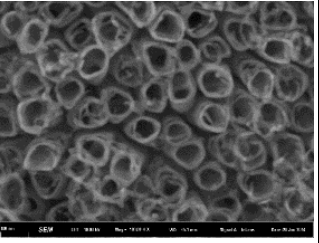
4.1.3.1 ผลของการทดลองสังเคราะห์  $\text{TiO}_2$  ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FE-SEM

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกันคือ Gly:water (90:10) (60:40) และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างต่างกันคือ 0.15 โมลาร์และ 0.30 โมลาร์ดังมีผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย FE-SEM ของ  $\text{TiO}_2$

Magnification Condition	20000X	50000X	100000X
1.) 20 Volt, time 3 hr $\text{NH}_4\text{F}$ 0.15 M Gly:water (90:10)			
2.) 20 Volt, time 3 hr $\text{NH}_4\text{F}$ 0.15 M Gly:water (60:40)			

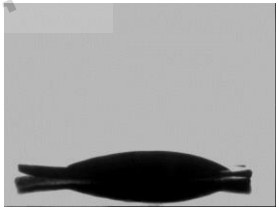
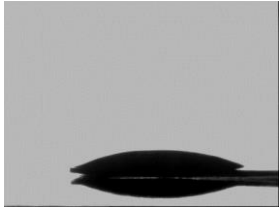


Magnification Condition	20000X	50000X	100000X
3.) 20 Volt, time 3 hr NH <sub>4</sub> F 0.3 M Gly:water (90:10)			
4.) 20 Volt, time 3 hr NH <sub>4</sub> F 0.3 M Gly:water (60:40)			

4.1.3.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของ TiO<sub>2</sub> โดยการวัด water contact angle

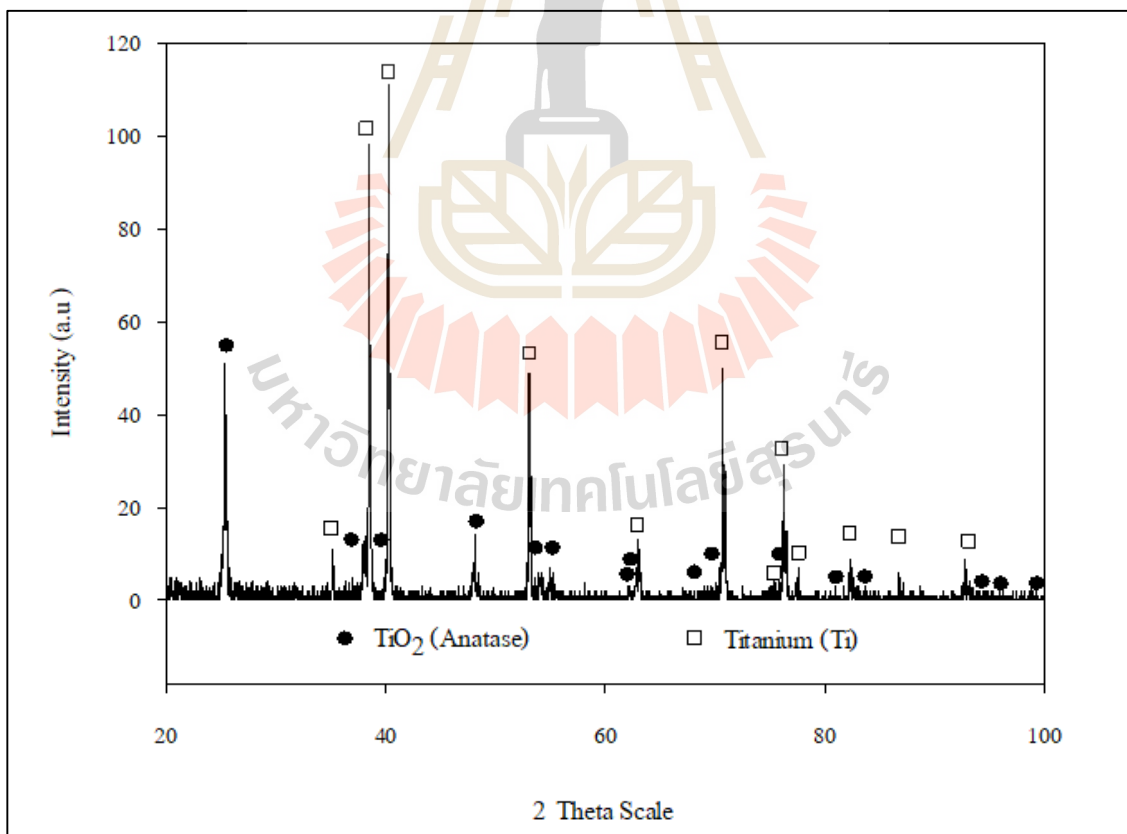
เมื่อสังเคราะห์ TiO<sub>2</sub> ด้วยวิธี แอนโอดเซชันแล้วจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของ TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ คือ วิเคราะห์คุณสมบัติด้าน hydrophilicity ของ TiO<sub>2</sub> โดยการวัด water contact angle ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย water contact angle ของ TiO<sub>2</sub>

Condition	degree	picture
1.) 20 Volt, time 3 hr NH <sub>4</sub> F 0.15 M Gly:water (60:40)	34.4	
3.) 20 Volt, time 3 hr NH <sub>4</sub> F 0.3 M Gly:water (60:40)	45.7	

#### 4.1.3.3 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อตรวจสอบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจากการทดสอบพบ XRD pattern ดังรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะผลึกไทเทเนียม (JPCDS NO. 44-1294) และผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส (JPCDS NO. 21-1272) โดยจุดสีเหลี่ยมสีขาว คือ มุม 2 theta ของไทเทเนียม ปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ  $35.16^\circ$   $38.49^\circ$   $40.00^\circ$   $53.06^\circ$   $63.03^\circ$   $70.68^\circ$  และ  $76.23^\circ$  เป็นต้น โดยพบมากที่สุดที่ 2 theta เท่ากับ  $40.00^\circ$  และจุดสีดำคือมุม 2 theta ของ ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ  $25.15^\circ$   $37.88^\circ$   $38.70^\circ$   $48.12^\circ$   $53.90^\circ$  และ  $70.44^\circ$  เป็นต้น โดยพบมากที่สุดที่ 2 theta เท่ากับ  $25.15^\circ$  ซึ่งจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมที่เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวไทเทเนียม ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

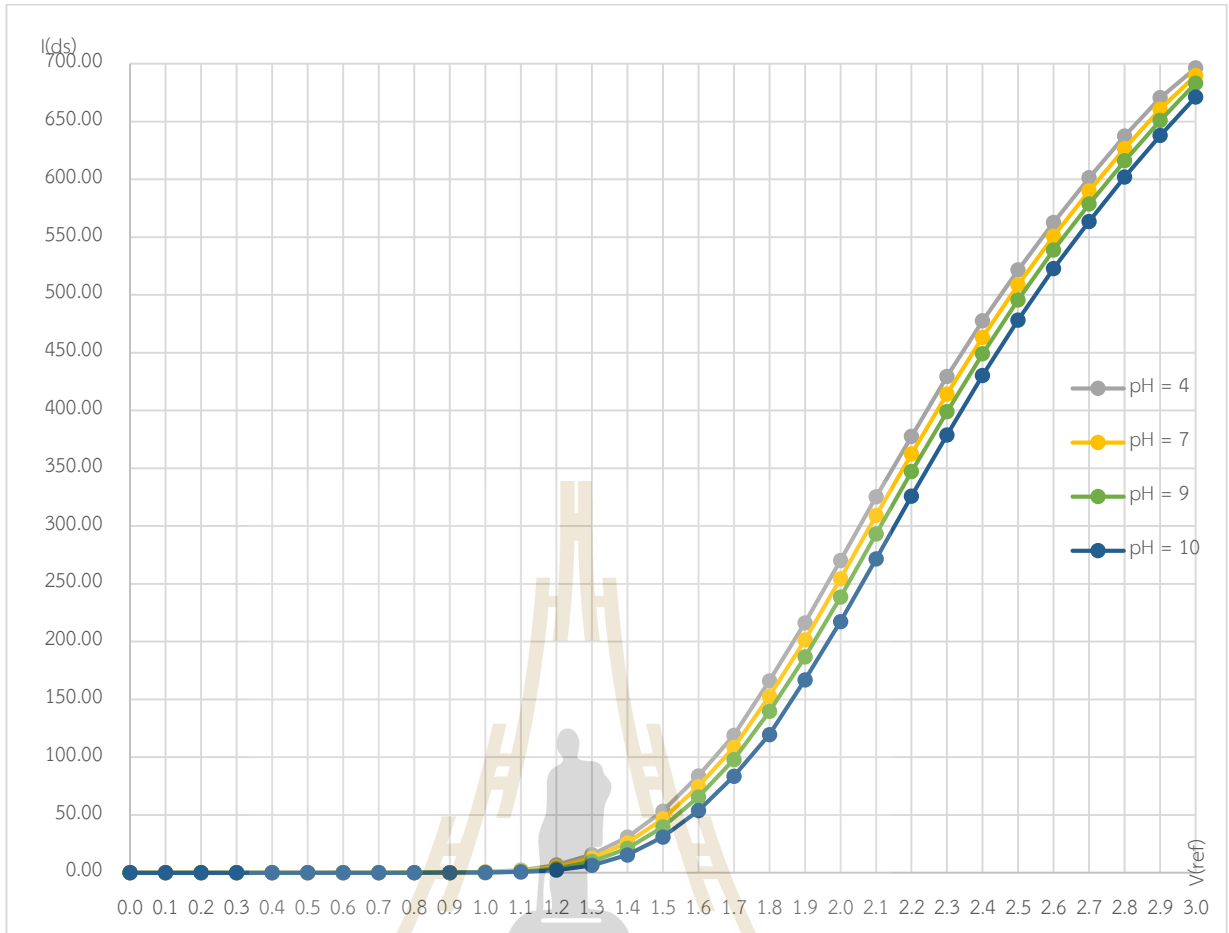
## 4.2 ผลของการทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์

### 4.2.1 การคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า sensitivity

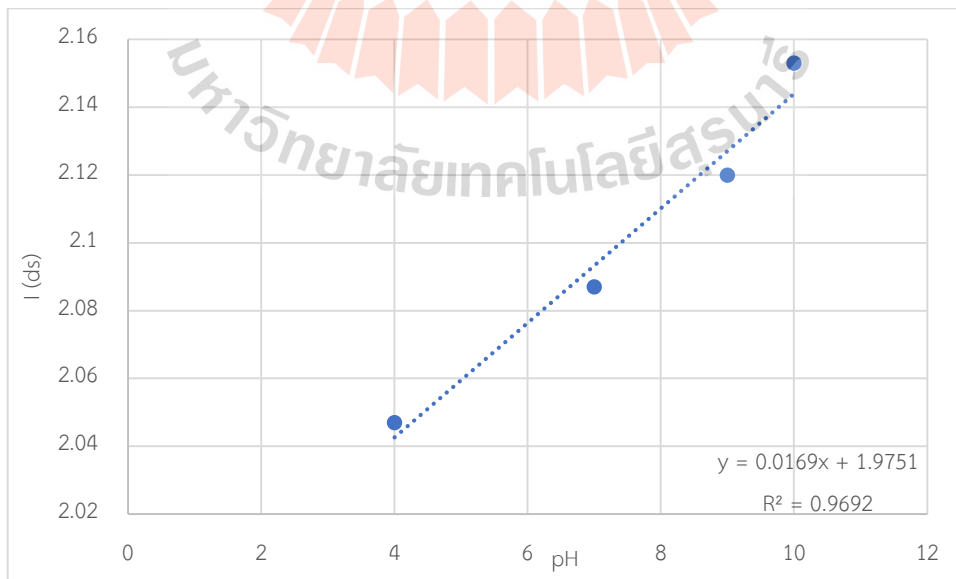
ในการวัดค่า sensitivity ของออกไซด์ที่จะใช้เป็นอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นนั้น จะใช้ออกไซด์ที่เราทำการเตรียมขึ้นเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานและใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงโดยจุ่มในสารละลายพีเอชมาตรฐานคือ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10 โดยจะใช้ power supply เป็นตัวจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0.0 ถึง 3.0 โวลต์ โดยปรับขึ้นครั้งละ 0.1 โวลต์ และอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยแสดงผลการทดลองดังนี้

#### 4.2.1.1 การวัด sensitivity ของ $\text{Al}_2\text{O}_3$

ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า จะนำมาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.9 หลังจากพล็อตกราฟได้แล้วจะพบว่า ความกว้างของกราฟตั้งแต่ pH 4 – pH10 จะเริ่มขยายขึ้นตั้งแต่กระแส 100 แอมแปร์ซึ่งในการคำนวณค่า sensitivity จะเลือกช่วงที่กว้างที่สุดของกราฟจึงเลือกที่  $I(ds) = 300$  แอมแปร์ ไปพล็อตกราฟสมการเส้นตรงดังรูปที่ 4.10 จะได้ค่า sensitivity ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 16.90 mV/pH



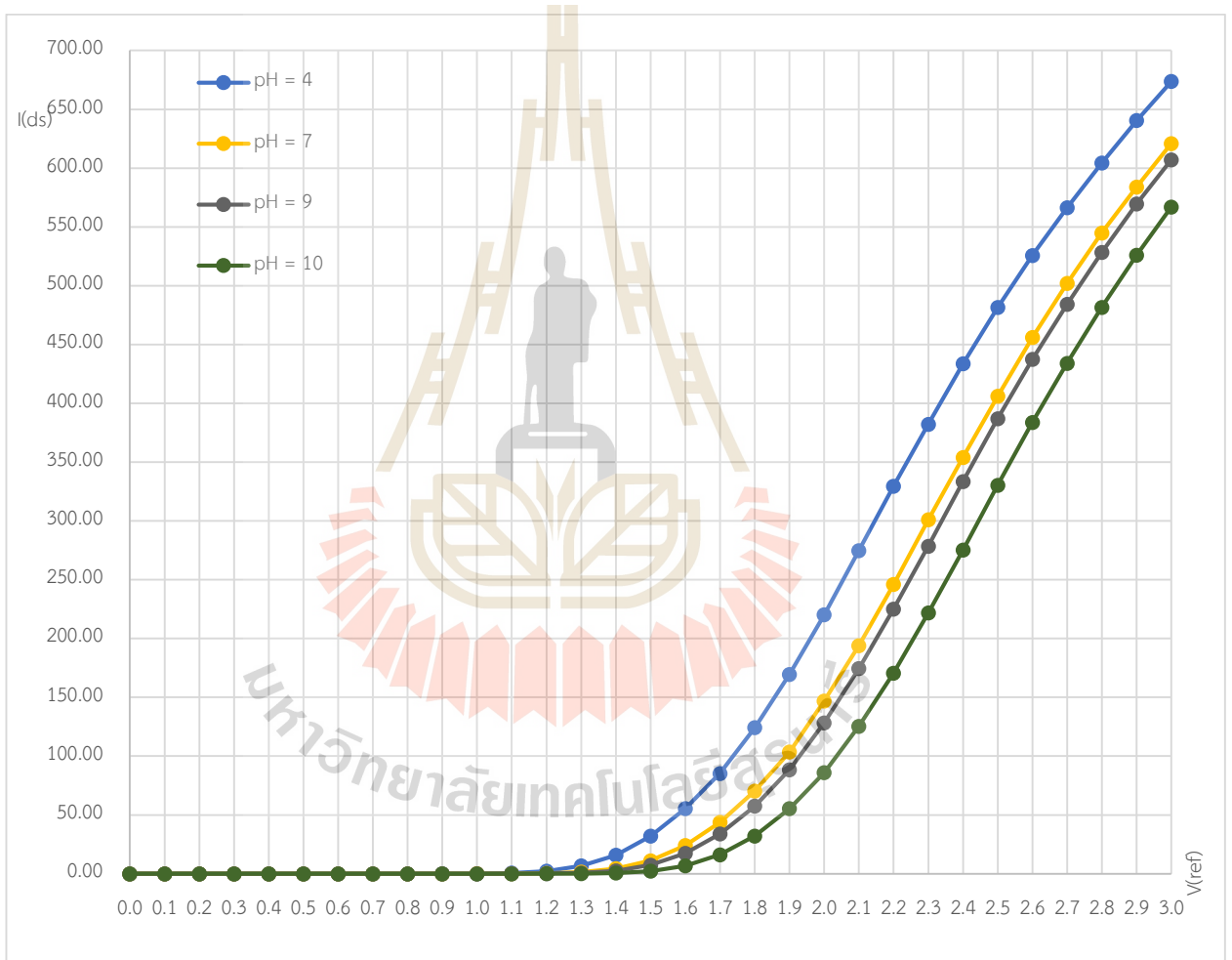
รูปที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าของ  $\text{TiO}_2$  ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10



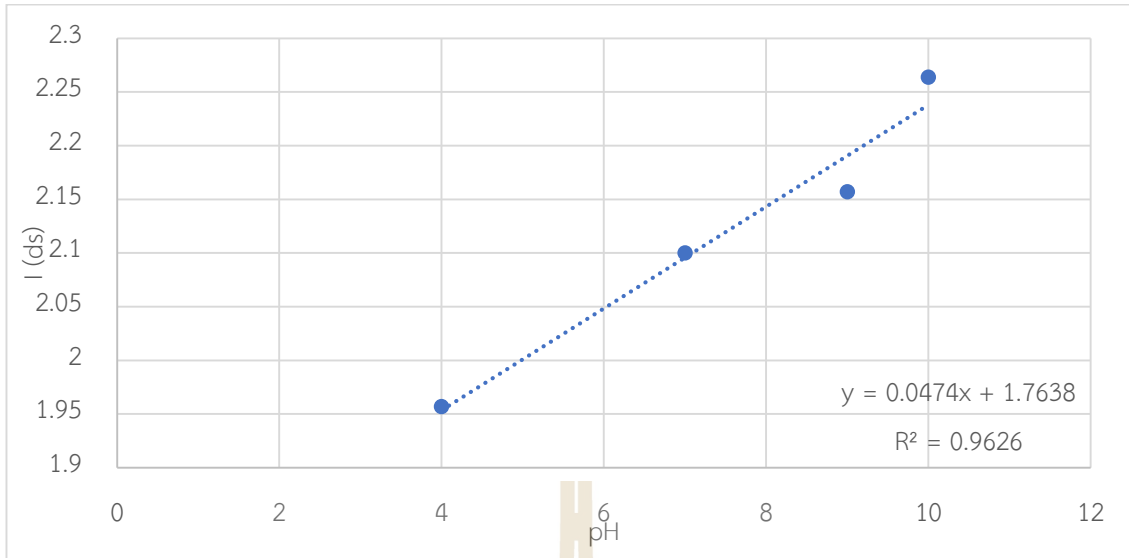
รูปที่ 4.10 ค่า sensitivity ของ  $\text{TiO}_2$  ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10

#### 4.2.1.2 การวัด sensitivity ของ $\text{WO}_3$

ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า จะนำมาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 หลังจากพล็อตกราฟได้แล้วจะพบว่า ความกว้างของกราฟตั้งแต่ pH 4 – pH10 จะเริ่มขยายขึ้นตั้งแต่กระแส 100 แอมแปร์ซึ่งในการคำนวณค่า sensitivity จะเลือกช่วงที่กว้างที่สุดของกราฟจึงเลือกที่  $I(\text{ds}) = 200$  แอมแปร์ ไปพล็อตกราฟสมการเส้นตรงดังรูปที่ 4.12 จะได้ค่า sensitivity ของ  $\text{WO}_3$  เท่ากับ  $47.40 \text{ mV/pH}$



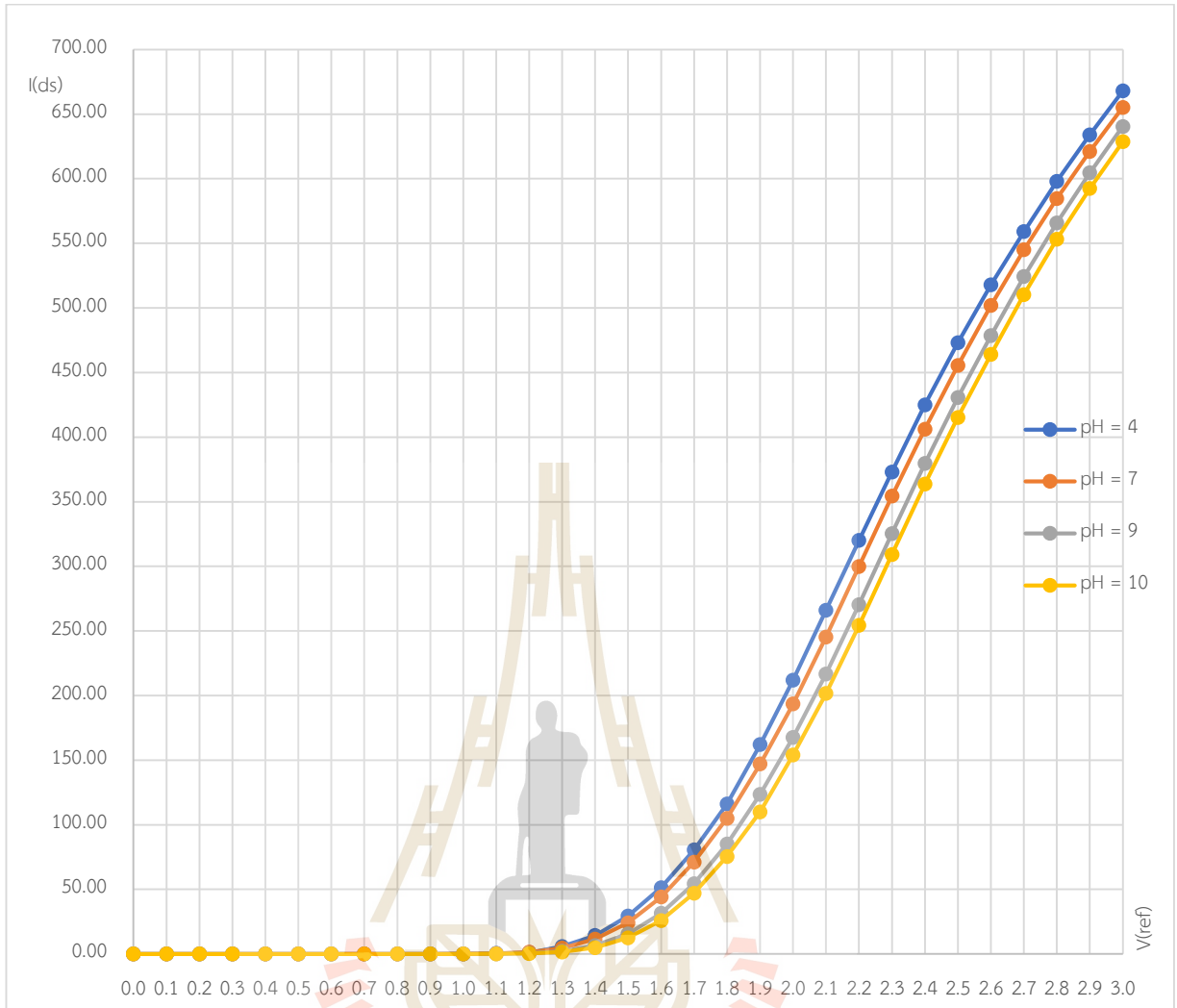
รูปที่ 4.11 ค่ากระแสไฟฟ้าของ  $\text{WO}_3$  ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10



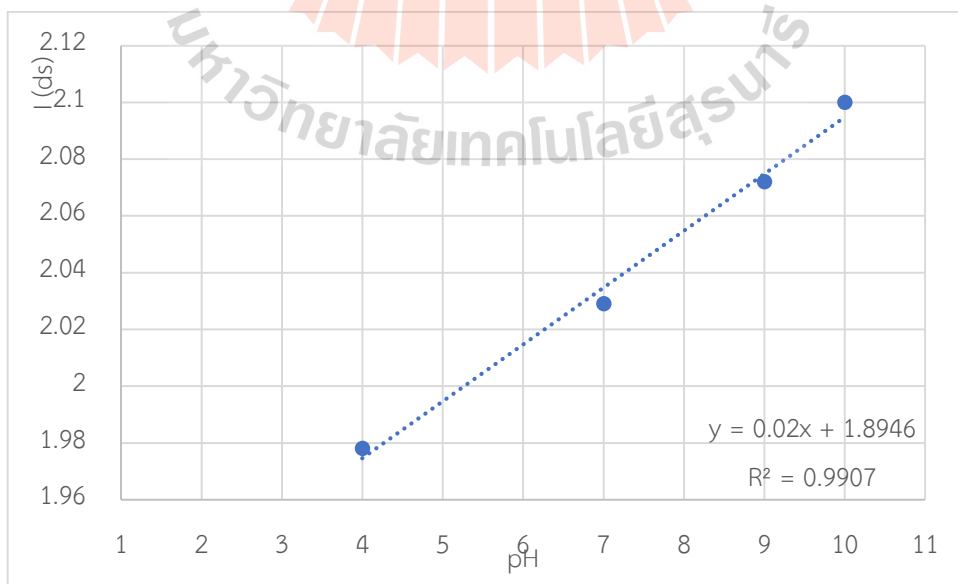
รูปที่ 4.12 ค่า sensitivity ของ  $WO_3$  ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10

#### 4.2.1.3 การวัด sensitivity ของ $TiO_2$

ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า จะนำมาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.13 หลังจากพล็อตกราฟได้แล้วจะพบว่า ความกว้างของกราฟตั้งแต่ pH 4 – pH10 จะเริ่มขยายขึ้นตั้งแต่กระแส 100 แอมแปร์ซึ่งในการคำนวณค่า sensitivity จะเลือกช่วงที่กว้างที่สุดของกราฟจึงเลือกที่  $I(ds) = 200$  แอมแปร์ ไปพล็อตกราฟสมการเส้นตรงดังรูปที่ 4.14 จะได้ค่า sensitivity ของ  $TiO_2$  เท่ากับ 20.00 mV/pH



รูปที่ 4.13 ค่ากระแสไฟฟ้าของ  $\text{TiO}_2$  ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10



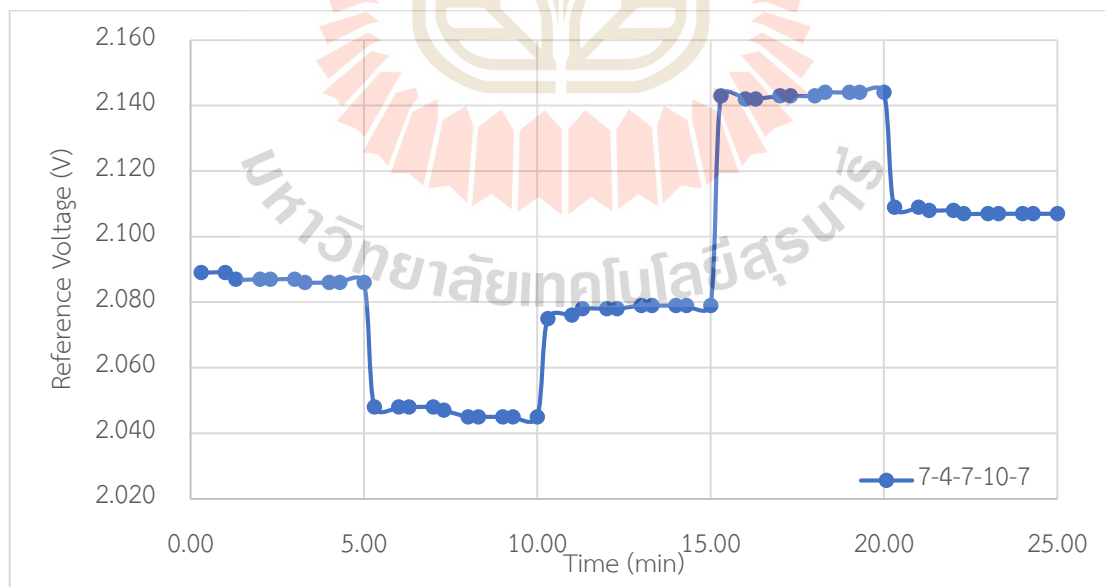
รูปที่ 4.14 ค่า sensitivity ของ  $\text{TiO}_2$  ที่ pH 4 pH 7 pH 9 และ pH 10

#### 4.2.2 การคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า Hysteresis effect ของโลหะออกไซด์

การวัดค่า hysteresis effect คือ ผลต่างสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดจากค่าที่แท้จริง ระหว่างการอ่านค่าขึ้นกับการอ่านค่าลงที่จุดเดียวกัน ซึ่งในการวัดค่า hysteresis effect ของออกไซด์ที่จะใช้เป็นอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นนั้น จะใช้ออกไซด์ที่เราทำการเตรียมขึ้นเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานและใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง มาทำการทดสอบเป็นรอบการวัดใน 2 กรณี คือ (1) ขาขึ้น (วัดกรดก่อนโดยวัดที่พีเอช 7 - 4 - 7 - 10 - 7) และ (2) ขาลง (วัดเบสก่อนโดยวัดที่พีเอช 7 - 10 - 7 - 4 - 7) มีผลการทดลองดังนี้

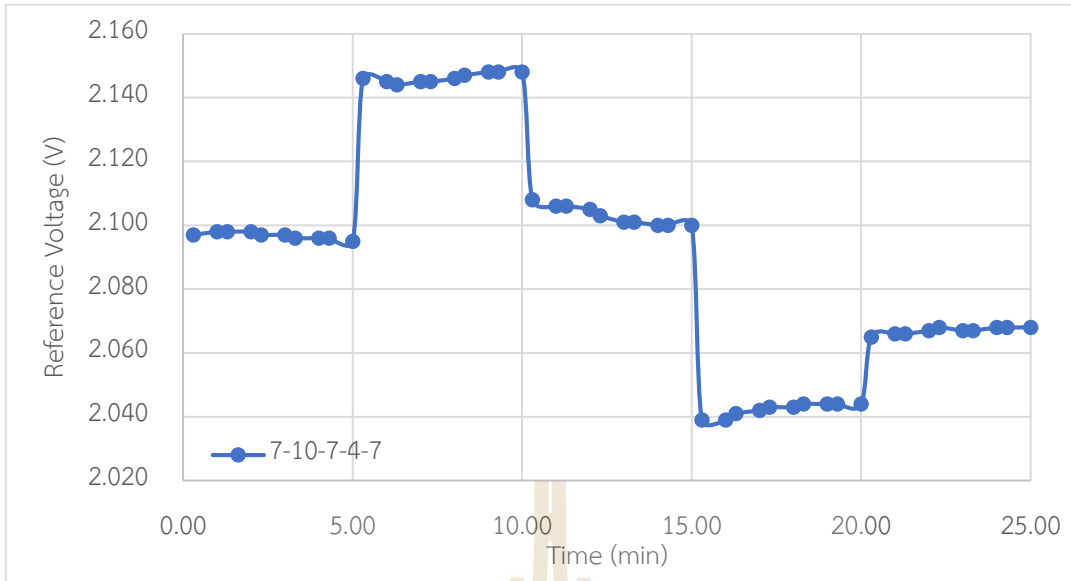
##### 4.2.2.1 การวัดค่า Hysteresis effect ของ $Al_2O_3$

ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจาก pH ที่แตกต่างกันกับระยะเวลา จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟขาขึ้นและกราฟขาลงดังแสดงในรูปที่ 4.15 4.16 หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพีเอชนั้น ๆ (loop) ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นความต่างของ Hysteresis effect ในอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นได้จาก รูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่า ค่า Hysteresis effect ขาขึ้น (7-4-7-10-7) ของ  $Al_2O_3$  มีค่าเท่ากับ 0.021 mV และ ค่า Hysteresis effect ขาลง (7-10-7-4-7) ของ  $Al_2O_3$  มีค่าเท่ากับ 0.030 mV

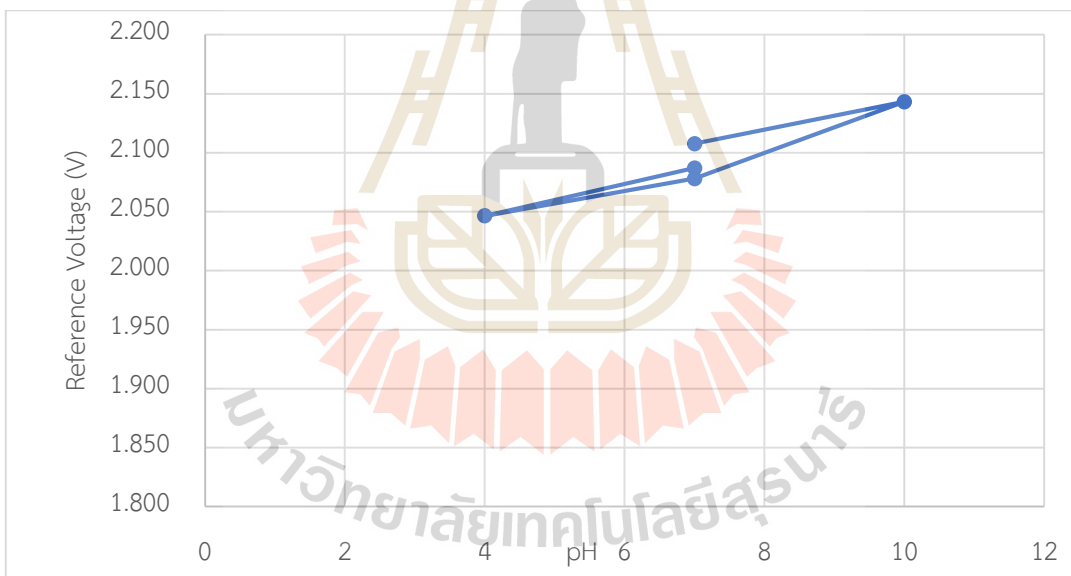


รูปที่ 4.15 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ  $Al_2O_3$  ขาขึ้น (7-4-7-10-7)

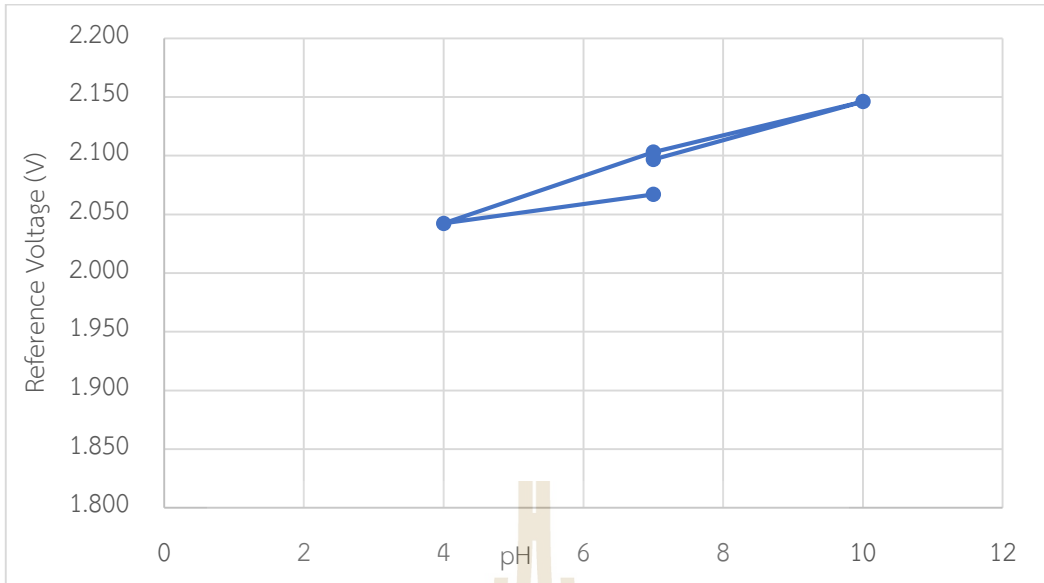




รูปที่ 4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ขาลง (7-10-7-4-7)



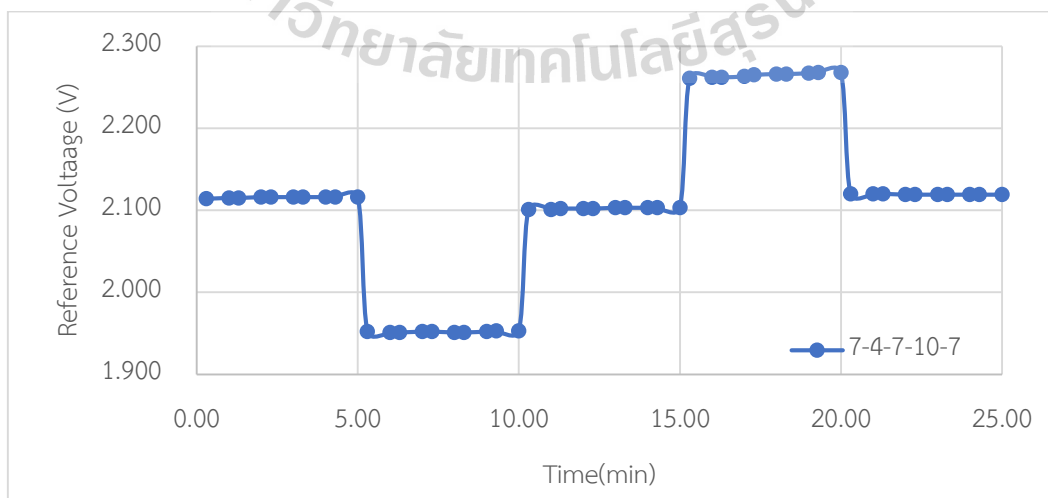
รูปที่ 4.17 ค่า Hysteresis effect ของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ขาขึ้น (7-4-7-10-7)



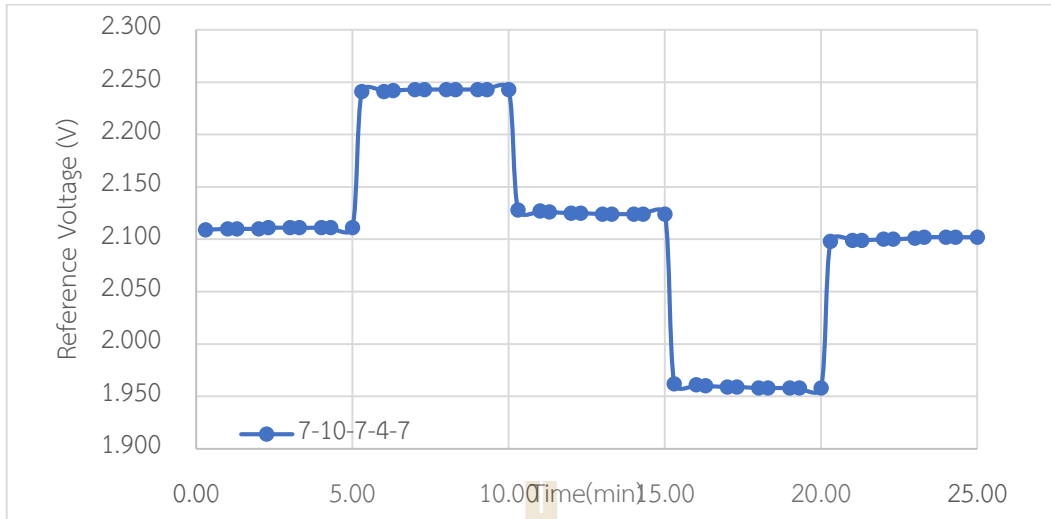
รูปที่ 4.18 ค่า Hysteresis effect ของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ขาลง (7-10-7-4-7)

#### 4.2.2.2 การวัดค่า Hysteresis effect ของ WO<sub>3</sub>

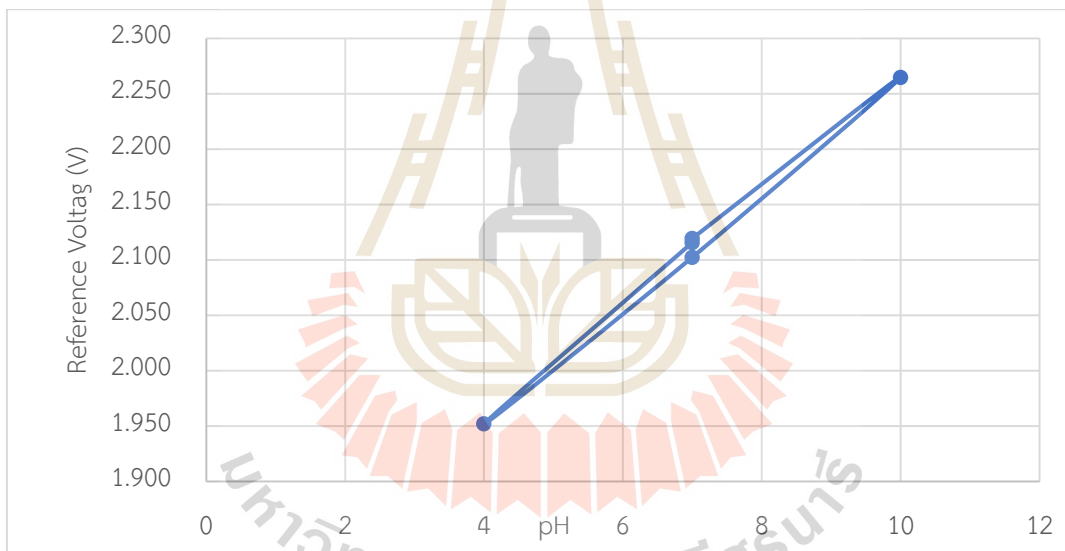
ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจาก pH ที่แตกต่างกันกับระยะเวลา จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟขาขึ้นและกราฟขาลงดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพีเอชนั้น ๆ (loop) ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นความต่างของ Hysteresis effect ในอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นได้จาก รูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่า ค่า Hysteresis effect ขาขึ้น (7-4-7-10-7) ของ WO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 0.004 mV และ ค่า Hysteresis effect ขาลง (7-10-7-4-7) ของ WO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 0.010 mV



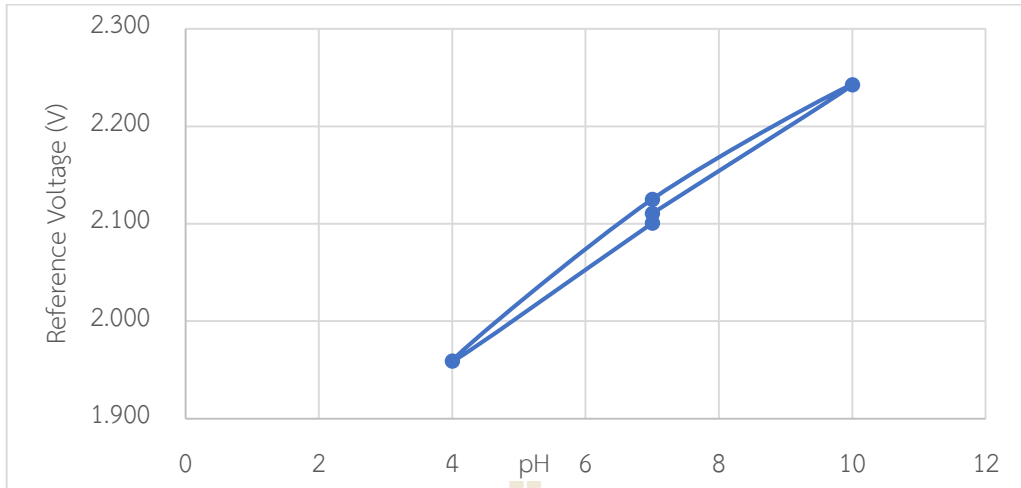
รูปที่ 4.19 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ WO<sub>3</sub> ขาขึ้น (7-4-7-10-7)



รูปที่ 4.20 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ  $WO_3$  ขาลง (7-10-7-4-7)



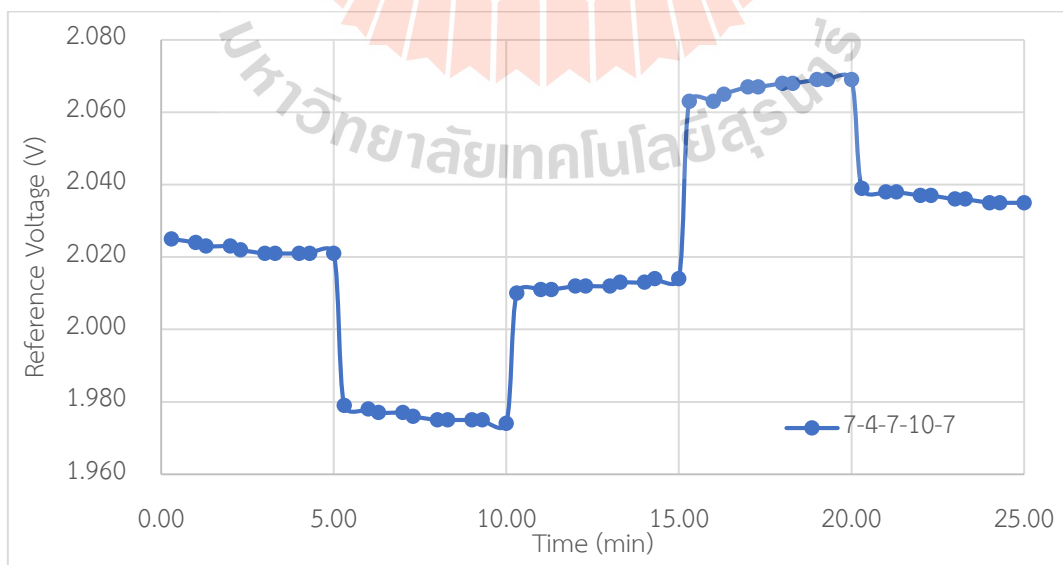
รูปที่ 4.21 ค่า Hysteresis effect ของ  $WO_3$  ขาขึ้น (7-4-7-10-7)



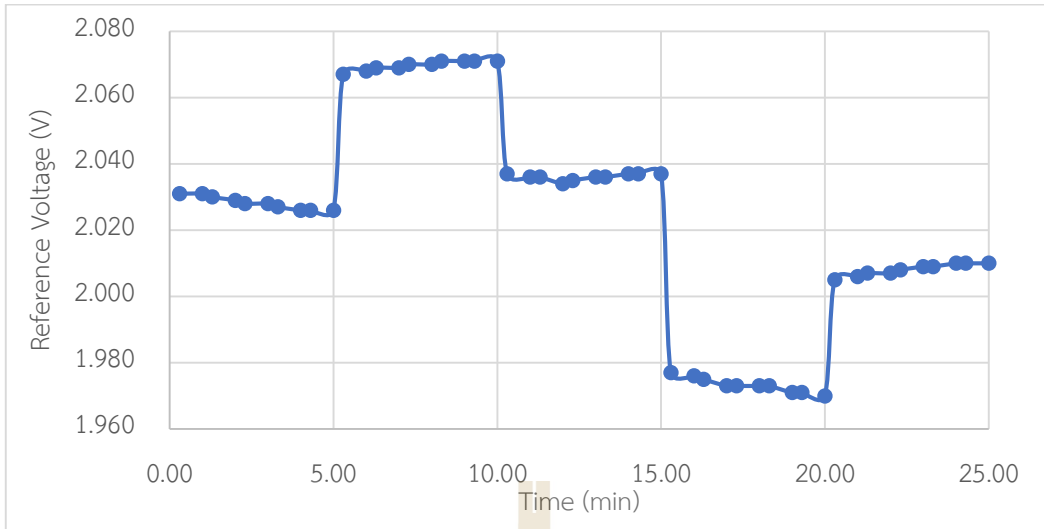
รูปที่ 4.22 ค่า Hysteresis effect ของ  $\text{WO}_3$  ขาลง (7-10-7-4-7)

#### 4.2.2.3 การวัดค่า Hysteresis effect ของ $\text{TiO}_2$

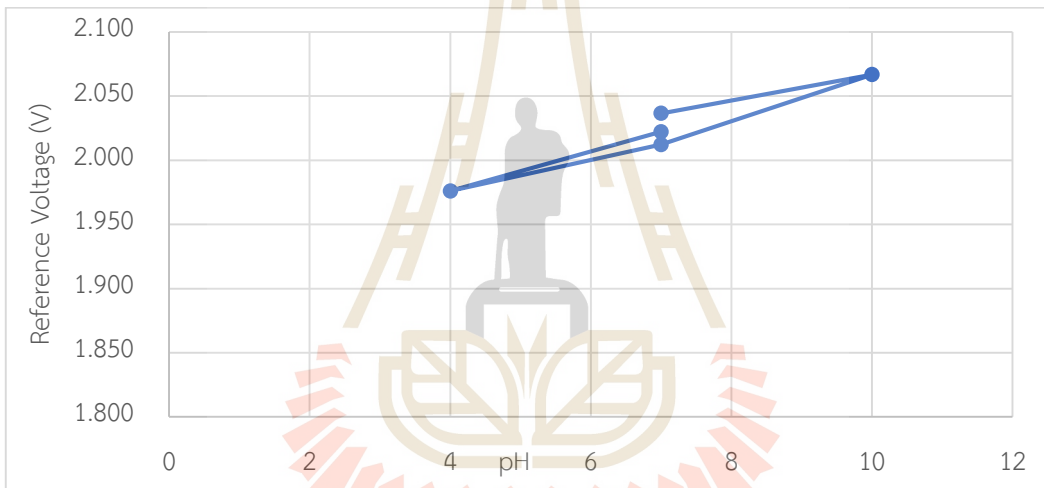
ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจาก pH ที่แตกต่างกันกับระยะเวลา จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟขาขึ้นและกราฟขาลงดังแสดงในรูปที่ 4.23 4.24 หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพีเอชนั้น ๆ (loop) ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นความต่างของ Hysteresis effect ในอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นได้จาก รูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่า ค่า Hysteresis effect ขาขึ้น (7-4-7-10-7) ของ  $\text{TiO}_2$  มีค่าเท่ากับ 0.014 mV และ ค่า Hysteresis effect ขาลง (7-10-7-4-7) ของ  $\text{TiO}_2$  มีค่าเท่ากับ 0.021 mV



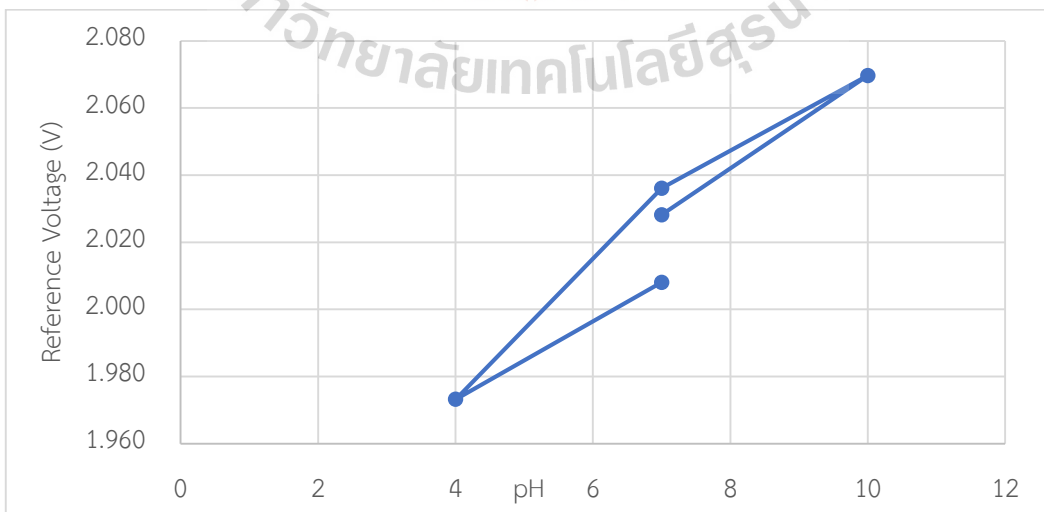
รูปที่ 4.23 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ  $\text{TiO}_2$  ขาขึ้น (7-4-7-10-7)



รูปที่ 4.24 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ  $\text{TiO}_2$  ขาลง (7-10-7-4-7)



รูปที่ 4.25 ค่า Hysteresis effect ของ  $\text{TiO}_2$  ขาขึ้น (7-4-7-10-7)



รูปที่ 4.26 ค่า Hysteresis effect ของ  $\text{TiO}_2$  ขาลง (7-10-7-4-7)

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

##### 5.1.1 สรุปผลการสังเคราะห์อนุภาคนิยามออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

1) ในการศึกษาการแปรเปลี่ยนสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่ 10, 20, 30 และ 40 โวลต์ ด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าจะเกิดขนาดรูพรุนของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นอนุภาคนิยามตั้งแต่ 10 โวลต์ขึ้นไป โดยมีขนาด 12-23 นาโนเมตร และรูพรุนจะมีขนาดที่ขยายใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มสภาวะแรงดันจนถึง 30 โวลต์ โดยมีขนาดรูพรุน 33-81 นาโนเมตร แต่ที่ 40 โวลต์รูพรุนเริ่มมีการเชื่อมขนของผนังท่อเกิดขึ้น และในการศึกษาสภาวะแรงดันที่ 40 โวลต์ได้เปรียบเทียบระหว่างการขัดซึบสเตรทด้วยกระดาษทรายละเอียดไม่ขัดด้วยกระดาษทรายเมื่อสังเคราะห์อนุภาคนิยามออกไซด์บนพื้นผิวก็พบว่า ไม่พบความแตกต่างของออกไซด์บนพื้นผิวอนุภาคนิยามที่เกิดขึ้น

2) ในการศึกษาการแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาด้วยเทคนิค FE-SEM ที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ ระยะเวลา 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที และ แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 10, 30, 60 นาที พบว่า สภาวะ 30 โวลต์ ระยะเวลา 10 จะเริ่มเกิดชั้นออกไซด์ของอนุภาคนิยามออกไซด์ และขนาดรูพรุนจะขยายใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาไปจนถึง 120 นาที ที่ 180 นาที พบว่าผนังของท่อเกิดการเชื่อมติดกันและที่ แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ โดยแปรเปลี่ยนสภาวะเวลาที่ 10, 30, 60 นาที พบว่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน โดยที่ 10 นาทีก็พบว่าผนังของท่อที่เกิดขึ้นบนซึบสเตรทนั้น มีการเชื่อมติดกัน

3) ในการศึกษาการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของอนุภาคนิยามออกไซด์ พบว่าความชอบน้ำของอนุภาคนิยามออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการแอโนไดเซชัน โดยที่แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ 10 นาที มีมุมของน้ำเท่ากับ 90.55 องศา และความชอบน้ำจะเพิ่มขึ้น 44.35 องศา ที่ระยะเวลา 120 นาที และที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ 10 นาที จะให้มุมของน้ำที่คล้ายกับแรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ 120 นาที คือ 44.33 องศา

4) ในการศึกษาการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometer (XRD) พบว่าลักษณะออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีแอโนไดเซชันเป็นรูปแบบออสถิฐาน

5) ในการศึกษาทั้งหมดจะเลือกสภาวะที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ 10 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์เป็นพีเอซีเอเล็กโทรด

### 5.1.2 สรุปผลการสังเคราะห์ทั้งสแตนต์รอกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

1) จากการทดลองแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ โดยศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทดลองที่ 2 แสดงภาพพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่ามีลักษณะเป็น Nanoporous ทั่วทั้งแผ่น

2) ในการศึกษาการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของทั้งสแตนต์รอกไซด์ พบว่าความชอบน้ำของทั้งสแตนต์รอกไซด์เท่ากับ 61.2 องศา

3) ในการศึกษาการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ จากตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าเกิดโครงสร้างของทั้งสแตนต์ในรูปแบบบอดี-เซนเตอร์คิวบิก (Body-centered cubic) และเกิดเป็นโครงสร้างของทั้งสแตนต์รอกไซด์ในรูปแบบโมโนคลินิก (Monoclinic)

4) ในการศึกษาข้างต้นจะใช้สภาวะการแอนโนไดเซชันที่แรงดันไฟฟ้า 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง สังเคราะห์ทั้งสแตนต์รอกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์เป็นพีเอซีเอเล็กโทรด

### 5.1.3 สรุปผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

1) ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์  $\text{NH}_4\text{F}$  0.15 M Gly:water (90:10),  $\text{NH}_4\text{F}$  0.15 M Gly:water (60:40),  $\text{NH}_4\text{F}$  0.30 M Gly:water (90:10) และ  $\text{NH}_4\text{F}$  0.30 M Gly:water (60:40) โดยใช้เทคนิค FE-SEM พบว่าทุกสภาวะจะเกิดขึ้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมดแต่ที่สภาวะ  $\text{NH}_4\text{F}$  0.15 M Gly:water (60:40) จะให้ลักษณะออกไซด์ที่มีขนาดของท่อที่เรียบและไม่มีการเชื่อมของผนังท่อ โดยมีขนาดของท่อเท่ากับ 20-120 นาโนเมตร

2) ในการศึกษาการวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติด้าน hydrophilicity ของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าความชอบน้ำของไทเทเนียมไดออกไซด์จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น โดยที่ 0.15 โมลาร์ มีมุมของน้ำเท่ากับ 34.4 องศาและที่ 0.30 โมลาร์มีมุมของน้ำเท่ากับ 45.5 องศา

3) ในการศึกษาการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างเป็นผลึกแบบอนาเทส ปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ

25.15° 37.88° 38.70° 48.12° 53.90° และ 70.44° ซึ่งจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทซขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมที่เป็นสารตั้งต้น

4) ในการศึกษาข้างต้นจะใช้สภาวะการแอโนดไดเซชันที่แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์  $\text{NH}_4\text{F}$  0.15 M Gly : water (60:40) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์เป็นพีเอชเซ็นเซอร์

## 5.2 สรุปผลของการทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์

### 5.2.1 สรุปผลคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า sensitivity

1) จากการศึกษาการวัด sensitivity ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะพบว่า ความกว้างของกราฟตั้งแต่ pH 4 – pH10 จะเริ่มขยายขึ้นตั้งแต่กระแส 100 แอมแปร์ซึ่งในการคำนวณค่า sensitivity จะเลือกช่วงที่กว้างที่สุดของกราฟจึงเลือกที่  $I(\text{ds}) = 300$  แอมแปร์ ไปพล็อตกราฟสมการเส้นตรงซึ่งจะได้ค่า sensitivity ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 16.90 mV/pH

2) จากการศึกษาการวัด sensitivity ของ  $\text{WO}_3$  การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะพบว่า ความกว้างของกราฟตั้งแต่ pH 4 – pH10 จะเริ่มขยายขึ้นตั้งแต่กระแส 100 แอมแปร์ซึ่งในการคำนวณค่า sensitivity จะเลือกช่วงที่กว้างที่สุดของกราฟจึงเลือกที่  $I(\text{ds}) = 200$  แอมแปร์ ไปพล็อตกราฟสมการเส้นตรงซึ่งจะได้ค่า sensitivity ของ  $\text{WO}_3$  เท่ากับ 47.40 mV/pH

3) จากการศึกษาการวัด sensitivity ของ  $\text{TiO}_2$  การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะพบว่า ความกว้างของกราฟตั้งแต่ pH 4 – pH10 จะเริ่มขยายขึ้นตั้งแต่กระแส 100 แอมแปร์ซึ่งในการคำนวณค่า sensitivity จะเลือกช่วงที่กว้างที่สุดของกราฟจึงเลือกที่  $I(\text{ds}) = 200$  แอมแปร์ ไปพล็อตกราฟสมการเส้นตรงซึ่งจะได้ค่า sensitivity ของ  $\text{TiO}_2$  เท่ากับ 20.00 mV/pH

4) จากการศึกษาคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า sensitivity พบว่า อิเล็กโทรดแบบโลหะออกไซด์ของ  $\text{WO}_3$  จะให้ความไวในการตอบสนองของพีเอชในน้ำมากที่สุดรองลงมาเป็น  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$



### 5.2.2 สรุปผลคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า Hysteresis effect ของโลหะออกไซด์

1) จากการศึกษาการวัดค่า Hysteresis effect ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจาก pH ที่แตกต่างกันกับระยะเวลา จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟขาขึ้นและกราฟขาลง หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพีเอชนั้น ๆ ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นความต่างของ Hysteresis effect ในอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นได้ โดยค่า Hysteresis effect ขาขึ้น (7-4-7-10-7) ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่าเท่ากับ 0.021 mV และ ค่า Hysteresis effect ขาลง (7-10-7-4-7) ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่าเท่ากับ 0.030 mV

2) จากการศึกษาการวัดค่า Hysteresis effect ของ  $\text{WO}_3$  ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจาก pH ที่แตกต่างกันกับระยะเวลา จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟขาขึ้นและกราฟขาลง หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพีเอชนั้น ๆ ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นความต่างของ Hysteresis effect ในอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นได้ โดยค่า Hysteresis effect ขาขึ้น (7-4-7-10-7) ของ  $\text{WO}_3$  มีค่าเท่ากับ 0.004 mV และ ค่า Hysteresis effect ขาลง (7-10-7-4-7) ของ  $\text{WO}_3$  มีค่าเท่ากับ 0.010 mV

3) จากการศึกษาการวัดค่า Hysteresis effect ของ  $\text{TiO}_2$  ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจาก pH ที่แตกต่างกันกับระยะเวลา จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟขาขึ้นและกราฟขาลง หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพีเอชนั้น ๆ ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นความต่างของ Hysteresis effect ในอิเล็กโทรดที่ทำการเตรียมขึ้นได้ โดยค่า Hysteresis effect ขาขึ้น (7-4-7-10-7) ของ  $\text{TiO}_2$  มีค่าเท่ากับ 0.014 mV และ ค่า Hysteresis effect ขาลง (7-10-7-4-7) ของ  $\text{TiO}_2$  มีค่าเท่ากับ 0.021 mV

4) จากการทดสอบคุณสมบัติของการเป็นพีเอชเซ็นเซอร์วัดค่า Hysteresis effect พบว่าอิเล็กโทรดแบบโลหะออกไซด์ของ  $\text{WO}_3$  จะให้ความแม่นยำในการตอบสนองของพีเอชในน้ำมากที่สุด รองลงมาเป็น  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) อาจจะมีการศึกษากับปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดพีเอชในน้ำเช่น อุณหภูมิ ความกระด้าง ค่าคลอไรด์ เป็นต้น

2) อาจมีการปรับปรุงคุณสมบัติของออกไซด์แต่ละชนิดด้วยการปะติดโลหะชนิดอื่นๆ เข้าไป เช่น Cd S Pt Sb เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

กลุ่มสถิติและเผยแพร่สารสนเทศอุตสาหกรรม ศูนย์สารสนเทศโรงงานอุตสาหกรรม ข้อมูลสิ้นปี พ.ศ.  
2555

Albu, S.P., Ghicov, A., Macak, J.M. and Schmuki, P. (2007). “**250  $\mu\text{m}$  long anodic  $\text{TiO}_2$  nanotubes with hexagonal self-ordering**”. *Phys. Stat. Sol. (RRL)*, 1: R65-R67.

Albu, S.P., Ghicov, A., Macak, J.M., Hahn, R. and Schmuki, P. (2007). “**Self-organized, Free-Standing  $\text{TiO}_2$  Nanotube Membrane for Flow-through Photocatalytic Applications**”. *Nano Letters*, 7: 1286-1289.

Arnanpapha Chuensab and Apichon Watcharenwong “**Photocatalytic Performance of Nanoporous  $\text{WO}_3$  for Carbon Monoxide Removal**” Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012) Penang, Malaysia, February 11-12, 2012

Chiang, J.L., Jan, S.S. Chou, J.C., and Chen, Y.C. (2001) “**Study on the temperature effect, hysteresis and drift of pH-ISFET devices based on amorphous tungsten oxide**”. *Sensors and actuators B*, 76: 624-628.

Chou, J.C. and Weng, C.Y. (2001). “**Sensitivity and hysteresis effect in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gate pH-ISFET**”. *Materials Chemistry and Physics*, 71:120-124.

Eftekhari, A. (2003). “**pH sensor based on deposited film of lead oxide on aluminum substrate electrode**”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 88, Issue 3, : 234-238.

Fan, F., Zhang, Q., Xu, J., Ye, Q., Kameyama, H., and Zhu, Z. (2013) “**Catalytic behavior investigation of a novel anodized  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  monolith in hydrolysis of dimethyl ether**”. *Catalysis Today*, 216: 194-199

Ghicov, A., Tsuchiya, H., Macak, J.M. and Schmuki, P. (2005). “**Titanium oxide nanotubes prepared in phosphate electrolytes**”. *Electrochemistry Communications*, 7: 505-509.

Kim, S.J., and Choi, J. (2008) “**Self-assembled arrays of ZnO stripes by anodization**”. *Electrochemistry Communications*, 10: 175-179.

Mor, G. K., Varghese, O. K., Paulose, M., Shankar, K. and Grimes, C. A. (2006). “**A review on highly ordered, vertically oriented  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays: Fabrication, material properties, and solar energy applications**”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90: 2011-2075.

- Pan, T.M. and Liao, K.M. (2007). "Influence of oxygen content on the structural and sensing characteristics of  $Y_2O_3$  sensing membrane for pH-ISFET". *Sensors and actuators B*, 128: 245-251.
- Pan, T.M. and Liao, K.M. (2008). "Comparison of structural and sensing characteristics of  $Pr_2O_3$  and  $PrTiO_3$  sensing membrane for pH-ISFET application". *Sensors and actuators B*, 133: 97-104.
- Pan, T.M. and Lin, J.C. (2009) "A  $TiO_2/Er_2O_3$  stacked electrolyte/insulator/semiconductor film pH-sensor for the detection of urea". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 138, Issue 2: 474-479.
- Paulosea, M., Pengc, L., Popatb, K.C., Varghesed, O.K., LaTempaa, T.J., Baoa, N., Desaic, T.A. and Craig A. Grimes, C.A. (2008). "Fabrication of mechanically robust, large area, polycrystalline nanotubular/porous  $TiO_2$  membranes". *Journal of Membrane Science*, 319: 199-205.
- Sarunya Tong-un and Apichon Watcharenwong "Preparation of  $TiO_2$  Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal" Proceedings of International conference on Nanothailand 2012: Nanotechnology for the benefits of mankind, Khon Kaen, Thailand, April 9-11, 2012
- Shankar, K., Mor, G. K., Prakasam, H. E., Yoriya, S., Paulose, M., Varghese, O. K., and Grimes, C. A. (2007) "Highly-ordered  $TiO_2$  nanotube arrays up to 220  $\mu m$  in length: use in water photoelectrolysis and dye-sensitized solar cells". *Nanotechnology*, 18: 065707
- Tsai, C.N., Chou, J.C., Sun, T.P., and Hsiung, S.K., (2005). "Study on the sensing characteristics and hysteresis effect of the tin oxide pH electrode". *Sensors and actuators B*, 108: 877-882.
- Wernick, S., Pinner, R. and Sheasby, P.G. (1987). "The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloy". Finishing Publications, Middlesex, England.
- Zhao, R., Xu, M., Wang, J. and Chen, G., (2010) "A pH sensor based on the  $TiO_2$  nanotube array modified Ti electrode". *Electrochimica Acta*, 55: 5647-5651.



ก.1 ค่า sensitivity ของ  $\text{TiO}_2$  ของ pH 7

V(REF) (V)	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
0.9	0.02	0.02	0.02	0.19	0.19
1.0	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08
1.1	0.36	0.29	0.30	0.33	0.34
1.2	1.38	1.12	1.17	1.27	1.32
1.3	4.52	3.72	3.87	4.20	4.28
1.4	11.51	9.93	10.22	10.99	11.11
1.5	24.22	21.53	22.03	23.34	23.51
1.6	44.06	40.40	40.89	42.86	43.11
1.7	71.10	66.45	67.00	69.80	70.02
1.8	105.00	98.75	99.80	103.28	103.51
1.9	147.00	140.39	141.26	145.60	43.11
2.0	193.47	185.81	187.25	192.10	70.02
2.1	245.33	237.26	238.70	244.00	103.55
2.2	299.86	291.75	293.22	298.60	145.70
2.3	354.33	346.51	347.91	353.23	192.22

V(REF) (V)					
	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.4	406.20	398.82	400.21	405.17	244.15
2.5	455.38	449.09	450.00	454.55	298.86
2.6	501.93	495.50	497.06	500.90	353.52
2.7	545.00	539.30	541.56	544.26	405.66
2.8	584.72	579.36	580.96	583.86	455.02
2.9	621.18	616.03	617.90	620.42	501.56
3.0	655.23	650.61	652.49	654.72	544.72

ก.2 ค่า sensitivity ของ TiO<sub>2</sub> ของ pH 4

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.9	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
1.0	0.12	0.14	0.12	0.13	0.13
1.1	0.51	0.57	0.51	0.53	0.53
1.2	0.92	2.09	1.91	1.65	1.64

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
1.3	5.84	6.25	5.80	5.95	5.96
1.4	14.27	15.01	14.18	14.46	14.48
1.5	29.40	30.69	29.07	29.66	29.71
1.6	51.40	53.02	51.184	51.80	51.85
1.7	80.55	82.60	80.38	81.09	81.15
1.8	116.00	118.34	115.89	116.65	116.72
1.9	162.00	165.00	162.00	162.88	162.97
2.0	212.00	215.00	212.00	212.88	212.97
2.1	266.00	269.00	266.00	266.88	266.97
2.2	320.00	324.00	320.00	321.19	321.30
2.3	373.00	376.00	373.00	373.88	373.97
2.4	425.00	428.00	425.00	425.88	425.97
2.5	473.00	476.00	474.00	474.25	474.31
2.6	518.00	521.00	518.00	518.94	518.98
2.7	559.00	562.00	560.00	560.25	560.31
2.8	598.00	600.00	598.00	598.63	598.66
2.9	634.00	636.00	635.00	634.94	634.98
3.0	668.00	670.00	668.00	668.63	668.66

ก.3 ค่า sensitivity ของ  $\text{TiO}_2$  ของ pH 9

V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.00	0.12	0.01	0.01	0.12
0.9	0.01	0.05	0.05	0.04	0.05
1.0	0.03	0.20	0.21	0.156	0.21
1.1	0.15	0.77	0.84	0.635	0.84
1.2	0.59	2.71	2.87	2.277	2.89
1.3	2.18	7.73	8.09	6.783	8.19
1.4	6.60	17.72	18.26	16.09	19.28
1.5	15.61	34.12	34.71	31.63	35.37
1.6	31.42	57.78	58.77	55.05	59.78
1.7	54.41	89.11	90.01	85.24	91.33
1.8	85.07	128.36	129.94	124.97	131.95
1.9	123.56	173.20	174.73	168.89	176.63
2.0	167.68	223.32	224.25	217.6	226.43
2.1	216.79	276.44	277.90	271.26	280.81
2.2	270.35	331.39	332.78	326.43	335.23
2.3	325.45	385.12	386.46	380.56	389.39



V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.4	379.62	436.10	436.77	431.46	439.22
2.5	430.57	483.22	484.72	479.51	487.07
2.6	478.60	528.07	528.98	525.14	531.27
2.7	524.25	570.44	570.54	567.07	572.68
2.8	565.80	608.33	608.74	605.26	610.76
2.9	604.51	643.57	643.86	640.77	645.81
3.0	640.43	676.13	676.66	673.86	678.54

ก.4 ค่า sensitivity ของ TiO<sub>2</sub> ของ pH 10

V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
0.9	0.01	0.02	0.03	0.03	0.36
1.0	0.03	0.10	0.12	0.15	0.15
1.1	0.10	0.41	0.50	0.58	0.61
1.2	0.41	1.55	1.85	2.12	2.20

V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
1.3	1.56	4.90	5.56	6.36	6.57
1.4	4.90	12.49	13.68	15.24	15.53
1.5	12.49	25.90	27.72	30.18	30.69
1.6	25.90	47.70	49.00	54.20	53.36
1.7	47.07	75.40	77.67	82.80	83.31
1.8	75.40	110.02	112.86	118.57	119.15
1.9	110.02	154.09	156.85	164.16	165.87
2.0	154.09	201.58	204.63	212.88	214.78
2.1	201.58	254.23	257.43	266.70	267.55
2.2	254.23	309.16	312.28	321.24	322.59
2.3	309.16	363.69	366.60	375.99	376.80
2.4	363.69	415.28	418.06	427.60	427.90
2.5	415.28	464.10	466.45	474.87	476.18
2.6	464.10	510.33	512.84	520.86	521.66
2.7	510.33	553.20	555.43	563.07	563.94
2.8	553.20	592.43	594.84	601.83	603.48
2.9	592.43	628.58	630.43	637.17	638.76
3.0	628.58	662.33	664.45	670.50	671.74

ก.5 ค่า sensitivity ของ  $WO_3$  ของ pH 7

V(REF) (V)	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
1.0	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
1.1	0.11	0.09	0.11	0.11	0.08
1.2	0.39	0.37	0.39	0.39	0.32
1.3	1.37	1.39	1.37	1.37	1.23
1.4	4.35	4.36	4.35	4.35	3.98
1.5	11.19	11.12	11.19	11.19	10.40
1.6	23.95	23.77	23.95	23.95	22.60
1.7	43.65	43.39	43.65	43.65	41.72
1.8	70.42	70.10	70.42	70.42	67.97
1.9	103.49	102.93	103.49	103.49	100.40
2.0	147.00	144.72	147.00	147.00	141.66
2.1	194.00	192.00	194.00	194.00	188.60
2.2	246.00	244.22	246.00	246.00	240.60
2.3	301.00	298.85	301.00	301.00	295.22

V(REF) (V)	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.4	354.00	352.72	354.00	354.00	349.18
2.5	406.00	404.95	406.00	406.00	401.55
2.6	456.00	454.80	456.00	456.00	451.60
2.7	502.00	501.30	502.00	502.00	498.40
2.8	545.00	544.18	545.00	545.00	541.46
2.9	584.00	583.50	584.00	584.00	581.04
3.0	621.00	620.20	621.00	621.00	617.88

ก.6 ค่า sensitivity ของ  $WO_3$  ของ pH 4

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.9	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1.0	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16
1.1	0.62	0.66	0.62	0.66	0.66
1.2	2.26	2.40	2.26	2.40	2.40

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
1.3	6.73	7.00	6.73	7.00	7.00
1.4	15.77	16.50	15.77	16.50	16.50
1.5	31.95	32.66	31.95	32.66	32.66
1.6	55.38	56.34	55.38	56.34	56.34
1.7	85.28	86.92	85.28	86.92	86.92
1.8	124.26	126.32	124.26	126.32	126.32
1.9	169.60	169.70	169.60	169.70	169.70
2.0	220.24	222.38	220.24	222.38	222.38
2.1	274.79	277.38	274.79	277.38	277.38
2.2	329.66	331.30	329.66	331.30	331.30
2.3	382.30	384.55	382.30	384.55	384.55
2.4	433.67	432.34	433.67	432.34	432.34
2.5	481.60	483.41	481.60	483.41	483.41
2.6	525.84	526.88	525.84	526.88	526.88
2.7	566.35	566.35	566.35	568.46	568.46
2.8	604.33	604.65	604.33	604.65	604.65
2.9	640.56	640.69	640.56	640.69	640.56
3.0	673.70	673.83	673.70	673.83	673.70

ก.7 ค่า sensitivity ของ  $WO_3$  ของ pH 9

V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
1.1	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04
1.2	0.15	0.16	0.18	0.15	0.18
1.3	0.59	0.65	0.73	0.59	0.73
1.4	2.10	2.27	2.53	2.10	2.53
1.5	6.36	6.79	7.39	6.36	7.39
1.6	15.43	16.26	17.37	15.43	17.37
1.7	30.84	26.45	33.82	30.84	33.82

V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
1.8	53.40	55.26	57.55	53.40	57.55
1.9	83.22	85.63	88.55	83.22	88.55
2.0	119.20	124.76	128.42	119.20	128.42
2.1	166.75	170.24	174.44	166.75	174.44
2.2	216.74	220.46	225.18	216.74	225.18
2.3	269.73	273.76	278.56	269.73	278.56
2.4	324.78	328.90	333.61	324.78	333.61
2.5	378.52	382.50	387.06	378.52	387.06
2.6	429.35	433.28	437.46	429.35	437.46
2.7	476.48	480.25	484.14	476.48	484.14
2.8	521.04	524.65	528.28	521.04	528.28
2.9	562.50	565.92	569.60	562.50	569.60
3.0	600.75	604.00	607.19	600.75	607.19

ก.8 ค่า sensitivity ของ  $WO_3$  ของ pH 10

V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
1.2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1.3	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15
1.4	0.59	0.60	0.61	0.59	0.60
1.5	2.16	2.21	2.25	2.16	2.21
1.6	6.53	60650.00	6.76	6.53	60650.00
1.7	15.65	15.93	16.14	15.65	15.93
1.8	31.22	31.80	32.06	31.22	31.80
1.9	54.60	57.88	55.32	54.60	57.88
2.0	83.75	85.23	85.90	83.75	85.23



V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.1	122.64	124.64	125.50	122.64	124.64
2.2	167.19	169.52	170.64	167.19	169.52
2.3	216.89	219.49	221.82	216.89	219.49
2.4	271.08	273.80	275.30	271.08	273.80
2.5	326.21	328.85	330.44	326.21	328.85
2.6	379.72	382.24	383.90	379.72	382.24
2.7	429.96	432.40	434.05	429.96	432.40
2.8	472.75	480.16	481.68	472.75	480.16
2.9	522.35	524.63	526.01	522.35	524.63
3.0	563.49	565.67	567.00	563.49	565.67

ก.9 ค่า sensitivity ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ของ pH 7

V(REF) (V)	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

V(REF) (V)	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.02	0.03	0.01	0.04	0.02
0.9	0.11	0.12	0.10	0.13	0.11
1.0	0.44	0.45	0.43	0.46	0.44
1.1	1.64	1.65	1.63	1.66	1.64
1.2	5.08	5.09	5.07	5.10	5.08
1.3	12.59	12.60	12.58	12.61	12.59
1.4	25.89	25.90	25.88	25.91	25.89
1.5	46.41	46.42	46.40	46.43	46.41
1.6	74.56	74.57	74.55	74.58	74.56
1.7	108.40	108.41	108.39	108.42	108.40
1.8	152.76	152.77	152.75	152.78	152.76
1.9	201.37	201.38	201.36	201.39	201.37
2.0	254.32	254.33	254.31	254.34	254.32
2.1	309.11	309.12	309.10	309.13	309.11
2.2	362.31	362.32	362.30	362.33	362.31
2.3	414.14	414.15	414.13	414.16	414.14

V(REF) (V)	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7	pH = 7
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.4	463.26	463.27	463.25	463.28	463.26
2.5	508.62	508.63	508.61	508.64	508.62
2.6	550.76	550.77	550.75	550.78	550.76
2.7	589.92	589.93	589.91	589.94	589.92
2.8	626.74	626.75	626.73	626.76	626.74
2.9	660.72	660.73	660.71	660.74	660.72
3.0	689.77	689.78	689.76	689.79	689.77

ก.10 ค่า sensitivity ของ  $Al_2O_3$  ของ pH 4

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.01	0.01	0.02	0.00	0.03

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.8	0.03	0.03	0.04	0.02	0.05
0.9	0.15	0.15	0.16	0.14	0.17
1.0	0.62	0.62	0.63	0.61	0.64
1.1	2.23	2.23	2.24	2.22	2.25
1.2	6.58	6.58	6.59	6.57	6.60
1.3	15.57	15.57	15.58	15.56	15.59
1.4	30.73	30.73	30.74	30.72	30.75
1.5	53.28	53.28	53.29	53.27	53.30
1.6	83.72	83.72	83.73	83.71	83.74
1.7	118.92	118.92	118.93	118.91	118.94
1.8	166.00	166.00	166.01	165.99	166.02
1.9	216.14	216.14	216.15	216.13	216.16
2.0	270.21	270.21	270.22	270.20	270.23
2.1	325.19	325.19	325.20	325.18	325.21
2.2	377.55	377.55	377.56	377.54	377.57
2.3	429.39	429.39	429.40	429.38	429.41
2.4	477.55	477.55	477.56	477.54	477.57
2.5	521.53	521.53	521.54	521.52	521.55
2.6	562.63	562.63	562.64	562.62	562.65

V(REF) (V)	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4	pH = 4
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
2.7	601.29	601.29	601.30	601.28	601.31
2.8	637.52	637.52	637.53	637.51	637.54
2.9	670.57	670.57	670.58	670.56	670.59
3.0	696.32	696.32	696.33	696.31	696.34

ก.11 ค่า sensitivity ของ  $Al_2O_3$  ของ pH 9

V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ซ้ำ 4	ซ้ำ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00
0.9	0.07	0.06	0.00	0.01	0.00
1.0	0.27	0.27	0.00	0.01	0.00

V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	น้ำ 1	น้ำ 2	น้ำ 3	น้ำ 4	น้ำ 5
1.1	1.06	1.05	0.00	0.01	0.00
1.2	3.57	3.57	0.00	0.01	0.00
1.3	9.62	9.60	0.04	0.05	0.03
1.4	21.04	21.02	0.02	0.03	0.01
1.5	39.54	39.56	0.08	0.09	0.07
1.6	65.40	65.42	0.29	0.30	0.28
1.7	97.87	97.97	1.50	1.51	1.49
1.8	139.52	139.79	4.00	4.01	3.99
1.9	186.60	186.81	11.00	11.01	10.99
2.0	238.42	238.71	23.00	23.01	22.99
2.1	293.02	293.45	43.00	43.01	42.99
2.2	347.06	347.44	69.70	69.71	69.69
2.3	398.89	399.37	101.40	101.41	101.39
2.4	448.96	449.40	148.80	148.81	148.79
2.5	495.71	496.00	196.68	196.69	196.67
2.6	538.88	539.10	245.88	245.89	245.87
2.7	578.55	578.78	303.33	303.34	303.32
2.8	615.95	616.08	352.50	352.51	352.49
2.9	650.86	650.94	411.00	411.01	410.99

V(REF) (V)	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9	pH = 9
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ซ้ำ 4	ซ้ำ 5
3.0	683.21	683.29	460.00	460.01	459.99

ก.12 ค่า sensitivity ของ  $Al_2O_3$  ของ pH 10

V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ซ้ำ 4	ซ้ำ 5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.8	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00
0.9	0.05	0.04	0.03	0.04	0.02
1.0	0.19	0.15	0.14	0.15	0.13
1.1	0.78	0.62	0.58	0.59	0.57
1.2	2.73	2.28	2.13	2.14	2.12
1.3	7.80	6.70	6.37	6.38	6.36

V(REF) (V)	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10	pH = 10
	ซ้ํ้า 1	ซ้ํ้า 2	ซ้ํ้า 3	ซ้ํ้า 4	ซ้ํ้า 5
1.4	19.64	15.71	15.28	15.29	15.27
1.5	34.39	31.60	30.83	30.84	30.82
1.6	58.40	54.44	53.66	53.67	53.65
1.7	89.30	84.42	83.51	83.52	83.50
1.8	128.93	123.03	119.52	119.53	119.51
1.9	174.37	167.70	166.78	166.79	166.77
2.0	225.16	218.00	217.20	217.21	217.19
2.1	279.39	272.20	271.40	271.41	271.39
2.2	333.74	326.63	325.85	325.86	325.84
2.3	386.15	379.46	378.80	378.81	378.79
2.4	419.01	430.70	430.22	430.23	430.21
2.5	484.46	478.68	478.25	478.26	478.24
2.6	528.38	523.10	522.74	522.75	522.73
2.7	588.70	563.87	563.56	563.57	563.55
2.8	599.48	602.30	602.08	602.09	602.07
2.9	642.24	638.19	637.96	637.97	637.95
3.0	675.22	671.42	671.21	671.22	671.20



ก.13 ค่า Hysteresis ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ 

Time	$\text{WO}_3$				$\text{TiO}_2$				$\text{Al}_2\text{O}_3$			
	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH
0.30	2.114	7	2.109	7	2.025	7	2.031	7	2.089	7	2.097	7
1.00	2.115	7	2.110	7	2.024	7	2.031	7	2.089	7	2.098	7
1.30	2.115	7	2.110	7	2.023	7	2.030	7	2.087	7	2.098	7
2.00	2.116	7	2.110	7	2.023	7	2.029	7	2.087	7	2.098	7
2.30	2.116	7	2.111	7	2.022	7	2.028	7	2.087	7	2.097	7
3.00	2.116	7	2.111	7	2.021	7	2.028	7	2.087	7	2.097	7
3.30	2.116	7	2.111	7	2.021	7	2.027	7	2.086	7	2.096	7
4.00	2.116	7	2.111	7	2.021	7	2.026	7	2.086	7	2.096	7
4.30	2.116	7	2.111	7	2.021	7	2.026	7	2.086	7	2.096	7
5.00	2.116	7	2.111	7	2.021	7	2.026	7	2.086	7	2.095	7
5.30	1.952	4	2.241	4	1.979	4	2.067	4	2.048	4	2.146	4
6.00	1.951	4	2.241	4	1.978	4	2.068	4	2.048	4	2.145	4
6.30	1.951	4	2.242	4	1.977	4	2.069	4	2.048	4	2.144	4

Time	WO <sub>3</sub>				TiO <sub>2</sub>				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH
7.00	1.952	4	2.243	4	1.977	4	2.069	4	2.048	4	2.145	4
7.30	1.952	4	2.243	4	1.976	4	2.070	4	2.047	4	2.145	4
8.00	1.951	4	2.243	4	1.975	4	2.070	4	2.045	4	2.146	4
8.30	1.951	4	2.243	4	1.975	4	2.071	4	2.045	4	2.147	4
9.00	1.952	4	2.243	4	1.975	4	2.071	4	2.045	4	2.148	4
9.30	1.953	4	2.243	4	1.975	4	2.071	4	2.045	4	2.148	4
10.00	1.953	4	2.243	4	1.974	4	2.071	4	2.045	4	2.148	4
10.30	2.101	7	2.128	7	2.010	7	2.037	7	2.075	7	2.108	7
11.00	2.101	7	2.127	7	2.011	7	2.036	7	2.076	7	2.106	7
11.30	2.102	7	2.126	7	2.011	7	2.036	7	2.078	7	2.106	7
12.00	2.102	7	2.125	7	2.012	7	2.034	7	2.078	7	2.105	7
12.30	2.102	7	2.125	7	2.012	7	2.035	7	2.078	7	2.103	7
13.00	2.103	7	2.124	7	2.012	7	2.036	7	2.079	7	2.101	7
13.30	2.103	7	2.124	7	2.013	7	2.036	7	2.079	7	2.101	7
14.00	2.103	7	2.124	7	2.013	7	2.037	7	2.079	7	2.100	7

Time	WO <sub>3</sub>				TiO <sub>2</sub>				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH
14.30	2.103	7	2.124	7	2.014	7	2.037	7	2.079	7	2.100	7
15.00	2.103	7	2.124	7	2.014	7	2.037	7	2.079	7	2.100	7
15.30	2.261	10	1.962	10	2.063	10	1.977	10	2.143	10	2.039	10
16.00	2.262	10	1.961	10	2.063	10	1.976	10	2.142	10	2.039	10
16.30	2.262	10	1.960	10	2.065	10	1.975	10	2.142	10	2.041	10
17.00	2.263	10	1.959	10	2.067	10	1.973	10	2.143	10	2.042	10
17.30	2.265	10	1.959	10	2.067	10	1.973	10	2.143	10	2.043	10
18.00	2.266	10	1.958	10	2.068	10	1.973	10	2.143	10	2.043	10
18.30	2.266	10	1.958	10	2.068	10	1.973	10	2.144	10	2.044	10
19.00	2.267	10	1.958	10	2.069	10	1.971	10	2.144	10	2.044	10
19.30	2.268	10	1.958	10	2.069	10	1.971	10	2.144	10	2.044	10
20.00	2.268	10	1.958	10	2.069	10	1.970	10	2.144	10	2.044	10
20.30	2.120	7	2.098	7	2.039	7	2.005	7	2.109	7	2.065	7
21.00	2.120	7	2.099	7	2.038	7	2.006	7	2.109	7	2.066	7
21.30	2.120	7	2.099	7	2.038	7	2.007	7	2.108	7	2.066	7

Time	WO <sub>3</sub>				TiO <sub>2</sub>				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH	7-4-7-10-7	pH	7-10-7-4-7	pH
22.00	2.119	7	2.100	7	2.037	7	2.007	7	2.108	7	2.067	7
22.30	2.119	7	2.100	7	2.037	7	2.008	7	2.107	7	2.068	7
23.00	2.119	7	2.101	7	2.036	7	2.009	7	2.107	7	2.067	7
23.30	2.119	7	2.102	7	2.036	7	2.009	7	2.107	7	2.067	7
24.00	2.119	7	2.102	7	2.035	7	2.010	7	2.107	7	2.068	7
24.30	2.119	7	2.102	7	2.035	7	2.010	7	2.107	7	2.068	7
25.00	2.119	7	2.102	7	2.035	7	2.010	7	2.107	7	2.068	7

## ประวัตินักวิจัย

อ.ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

- การศึกษา/คุณวุฒิ : ปริญญาเอก :Ph.D. (Environmental management) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปริญญาโท : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ปริญญาตรี : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ตำแหน่งปัจจุบัน : หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ประวัติการทำงาน :
- เม.ย. 46 – ส.ค. 47 Research assistance of Assoc. Prof. Dr. Puangrat Kajitvichyanukul, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand
- ก.พ. 49 - ส.ค. 50 Research Assistance, Center for Renewable Energy Science and Technology (CREST), Department of Chemistry & Biochemistry, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA.
- มี.ค. 51 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานทางวิชาการ /ผลงานวิจัย :

### AWARDS

- Distinguished Research Award, Nanotechnology and Nanomaterial Safety Management, Thailand Research Fund (TRF), Thailand, 2014

### A CHAPTER IN BOOK

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

## INTERNATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Chanrawangyot, S., Rattanachan, S.T., **Watcharenwong, A.** & Fangsuwannarak, T. (2017). Antibacterial Activity to ZnO Nanoparticles Coated on Ceramic Tiles Prepared by Sol-Gel Method. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 27(2), 1-5.
- Watcharenwong, A.**, Noguchi, S., Kawai, T., Ogata, T., Unuma, H., “Self-organized TiO<sub>2</sub> nanotubes and their photocatalytic performance measured using spin-trap ESR spectroscopy” , *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, Issue 43, 2013, Pages 91-97
- A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Anodic growth of nanoporous WO<sub>3</sub> films: morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion” , *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120, 2008
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Formation and Characterization of Self-Organized TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays by Pulse Anodization” *Journal of American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 965-974, 2008 (*impact factor = 9.907*)
- A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Self-organized TiO<sub>2</sub> nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response” , *Journal of Materials Research*, Vol. 22, pp. 3186-3195, 2007
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Titania nanotubes from pulse anodization of titanium foils” , *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 2145–2149, 2007 (*impact factor = 3.388*)
- N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeeswaran, **A. Watcharenwong**, R. S. de Zoysa, N. A. Basit and K. Rajeshwar, “Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> Films

by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response”, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp. 25347-25355, 2006

#### BOOK SERIES

- Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 367-372, 2017
- Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 373-378, 2017
- Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioung, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Nanoporous Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 174-178, 2017

#### CONFERENCE SERIES

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

#### RIGINAL AND NATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Apichon Watcharenwong, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae”, *Thai environmental engineering journal*, Vol. 31 No. 1, 2017
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Role of pH, Organic and Inorganic Anions on Photocatalytic Reduction Of Chromium(VI) using  $TiO_2$  and Ultraviolet

*Light*”, *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 169-179, 2005

- P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong**, “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface” *Songkhlanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 47-53, 2005
- P. Kajitvichyanukul, P. Amornchat, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, “Structure and Photocatalytic characteristics of TiO<sub>2</sub> Thin Film coated on Stainless Steel for Chromium(VI) Removal Application, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp.79-86, 2005
- P. Kajitvichyanukul, S. Pongpom, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, “Effects of Acetyl Acetone on Property of TiO<sub>2</sub> Thin Film for Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) from Aqueous Solution, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp. 87-93, 2005
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Contradiction Effect of pH on the Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) and Thallium (I)”. *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 21, No.4, pp. 269-280, 2004
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Adsorption Behavior of Chromium (VI) on Titanium Dioxide Surface” *Thai Environmental Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-95, 2004

#### REFEREED CONFERENCE PROCEEDINGS

- A Rittirat<sup>1</sup>, C Chokejaroenrat<sup>2</sup> and **A Watcharenwong<sup>1\*</sup>**, “Atrazine adsorption potential of Leonardite from Mae Moh power plant” , 2nd International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development (CEESD 2017), Phuket, Thailand, 8-11 Dec, 2017.
- A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammaroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from melamine scraps” 8th International conference on Environmental Science and Technology, Madrid, Spain, 12 – 14 June, 2017



- **Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae” Proceedings of the 15<sup>th</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Bangkok, Thailand, 11-13 May, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Pimchanok Leusoongnoen, “Synthesis of rhombic ZnO rods using anodization technique and their properties”, GTSNN 2014 International Conference on “Safe and Sustainable Nanotechnology” (in conjunction with 4th German- Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology), Phitsanulok, Thailand, October 14<sup>th</sup>-17<sup>th</sup>, 2014
- **Apichon Watcharenwong**, Shun Noguchi, Takahiro Kawai, Tateaki Ogata, and Hidero Unuma, “Self-Organized TiO<sub>2</sub> Nanotubes and Their Photocatalytic Performance Measured Using Spin-Trap ESR Spectroscopy”, Proceeding of 5<sup>th</sup> International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development, MECAHITECH’13, Bucharest, Romania, September 12<sup>th</sup>-13<sup>th</sup>, 2013

- N. Bussabong, **A. Watcharenwong**, and S. Dararat, “Biogas Production from Ruzi grass in the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)”, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Agriculture and Environment Systems (ICAES'13), Pattaya (Thailand), April 23-24, 2013
- Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Preparation of TiO<sub>2</sub> Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International conference on NanoThailand 2012: Nanotechnology for the benefits of mankind, Khon Kaen, Thailand, April 9-11, 2012
- Arnanapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “ Photocatalytic Performance of Nanoporous WO<sub>3</sub> for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012) Penang, Malaysia, February 11-12, 2012
- Arnanapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “ Treatment of CO in Photocatalysis process using WO<sub>3</sub>” Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
- Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of Carbon monoxide” Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
- **Apichon Watcharenwong** , Wilaiwan Chanmanee , Norma R. de Tacconi, C. Ramannair Chenthamarakshan , Puangrat Kajitvichyanukul, Krishnan Rajeshwar, “Effect of pulsing voltage and electrolyte composition on photoelectrochemical response of composite TiO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub> nanotubes obtained from pulse anodization using Ti foil”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on NanoThailand Symposium 2008 (NTS 2008) November 6 – 8, 2008, Bangkok, Thailand, 2008
- **Watcharenwong Apichon**, Chanmanee Wilaiwan, Kajitvichyanukul Puangrat, Chenthamarakshan C. R., de Tacconi N. R., Rajeshwar Krishnan, “Anodic Growth of Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> films: Influence of Process Variables on

- Morphology, Photoelectrochemical response and Photocatalysis applications”, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007) June 25 – 28, 2007, Bangkok, Thailand, 2007
- Krishnan Rajeshwar, Wilaiwan Chanmanee, **Apichon Watcharenwong**, C. Ramannair, Chenthamarakshan, Puangrat Kajitvichyanukul, and Norma R. de Tacconi, “ Titania Nanotubes from Pulse Anodization of Titanium foils” , Proceedings of the Twenty- Ninth DOE Solar Photochemistry Research Conference, Airlie Conference Center Warrenton, Virginia, USA, June 10-13, 2007
  - P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong** “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface” , Proceedings of the 3<sup>rd</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, January 28-30, 2004
  - P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “ Role of pH, organic and inorganic ions on the photocatalytic reduction of Chromium (VI) using TiO<sub>2</sub> and ultraviolet light” , Proceedings of ASIAN WATERQUAL2003, IWA Asia- Pacific conference, Thailand, 2003
  - P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “ Effect Of pH On Dark Adsorption And Photocatalysis Of Chromium(VI) And Thallium(I) In Aqueous Titanium Dioxide Suspension” , Proceedings of An International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, Thailand, July 22-25, 2003
  - P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “A Study of Adsorption Behavior of Chromium(VI) on Titanium Dioxide Surface” , Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Khon Kaen, Thailand, January, 2003