

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนทอง  
ในโครงสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำ  
ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

SYNTHESIS OF PHOTOANODE ELECTRODE BASED ON  
ZnO-NRS/Au-NPS CORE/SHELL STRUCTURE FOR IMPROVEMENT  
PHOTOELECTROCHEMICAL WATER SPLITTING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF PHOTOANODE ELECTRODE BASED ON  
ZnO-NRS/Au-NPS CORE/SHELL STRUCTURE FOR IMPROVEMENT  
PHOTOELECTROCHEMICAL WATER SPLITTING



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT OF THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนทองใน  
โครงสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการ  
แยกน้ำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง


Special Project Title Synthesis of Photoanode Electrode Based on ZnO-  
NRs/Au-NPs Core/Shell Structure for Improvement  
Photoelectrochemical Water Splitting

นักศึกษา นายประภากร รัตนวารินทร์ชัย  
รหัสประจำตัว 56110021  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ดารินี พรหมโยธิน

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ดร. ชัตติยา	ชลาพัฒน์	
ดร. นงลักษณ์	หวงกำแหง	
ผศ.ดร. ดารินี	พรหมโยธิน	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)  
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วันที่..... 27 ..... เดือน..... มิถุนายน ..... พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงการพิเศษเรื่อง

นักศึกษา

รหัสนักศึกษา

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนทองในโครงสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

นายประภากร รัตนวารินทร์ชัย

56110021

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

วิศวกรรมวัสดุนาโน

2559

ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล และเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทอง สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วแอโนดในปฏิกิริยาการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง โดยในงานวิจัยส่วนแรกเป็นการศึกษาผลกระทบความเข้มข้นของสารตั้งต้นและเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ต่อกลไกการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกและลักษณะกายภาพพื้นผิวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยการควบคุมความเข้มข้นของสารตั้งต้น ส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีลักษณะเป็นแท่งขนาดนาโนตั้งตรงอย่างเป็นระเบียบบนวัสดุฐานรองรับ นอกจากนี้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ซึ่งระนาบหลักตรงกับระนาบ (002) การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารตั้งต้นส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของซิงค์ไอออน และไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น การควบคุมความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่ 45 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 0.44 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นขั้วแอโนด ในงานวิจัยส่วนที่สองจะเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้วแอโนดเพื่อเพิ่มช่วงการดูดกลืนแสงในย่านแสงขาว โดยการเคลือบอนุภาคนาโนทองด้วยกระบวนการสปีดเตอริงที่เวลาต่าง ๆ กัน พบว่าการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองเป็นเวลา 30 วินาที ให้ค่ากระแสสูงสุดเท่ากับ 1.16 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าความต่างศักย์ 0.8 โวลต์เทียบกับขั้วมาตรฐาน

คำสำคัญ แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์, อนุภาคนาโนทอง, กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล, การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

Special Project Title	Synthesis of Photoanode Electrode Based on ZnO-NRs/Au-NPs Core/Shell Structure for Improvement Photoelectrochemical Water Splitting
Student	Mr. Prapakorn Rattanawarinchai
Student ID	56110021
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2016
Thesis advisor	Asst. Prof. Dr. Darinee Phromyothin

### Abstract

Synthesis of ZnO nanorods (ZnO-NRs) decorated with Au nanoparticles (Au-NPs) as core/shell structure used in photoelectrochemical (PEC) water splitting cell was studied. Initially, ZnO-NRs as core structure was prepared via seed-assisted hydrothermal technique. Hydrothermal parameters as precursor concentration and growth time related to a formation of ZnO-NRs were investigated and discussed. Vertical alignment of ZnO-NRs with preferential orientation along [0001] direction were confirmed by field emission electron microscope (FE-SEM) and X-ray diffractometer (XRD). Moreover, growth direction of ZnO-NRs along c-plane and a-plane were able to be designed via controlling an amount of  $Zn^{2+}$  and  $OH^-$  precursor. The electrochemical measurement was set up under  $100 \text{ mW/cm}^2$  of solar simulated illumination for evaluation PEC performance. At precursor concentration and growth time of 45 mM and 2hr demonstrated photocurrent as high as  $0.44 \text{ mA/cm}^2$  at 0.8V against Ag/AgCl electrode that was enough potential to utilize as core structure of photoanode electrode. In order to enhance the PEC performance, Au-NPs as shell structure were decorated on top of ZnO-NRs by DC magnetron sputtering system at variation of sputtering time as 15s, 30s and 60s, respectively. At sputtering time of 30s, the highest photocurrent of  $1.16 \text{ mA/cm}^2$  was acquired. Drastic improvement of the PEC performance caused by the extended optical absorption of photoanode through visible region from localized surface plasmon resonance (LSPR) phenomena of Au-NPs. By using the core/shell structure is not only designed the optical absorption range of photoanode electrode based on metal oxide material but can suppress carrier recombination that strongly influence on degradation of the PEC performance as well.

**Key words:** ZnO-NRs/Au-NPs core/shell structure, seed-assist hydrothermal technique, photoelectrochemical (PEC) water splitting.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน ที่ให้คำแนะนำสำหรับแนวทางการทำงาน คำปรึกษาในแนวทางการดำเนินงานวิจัย การอำนวยความสะดวกในการจองเครื่อง และกำลังใจที่ให้การดำเนินงานวิจัยนี้เสมอมา

ขอขอบคุณ ดร.สากร ระหงษ์ นายนราธร เขมะศิริ และนายสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์ ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการเกี่ยวกับงานวิจัย เทคนิคการทำวิจัยการวิเคราะห์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเฉพาะด้านต่างๆ รวมทั้งการให้กำลังใจในการวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.มติ ห่อประทุม นางสาวชนันธร ขนนนนวนร นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสง (Optical thin film laboratory; OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ชัตติยา ชลาพัฒน์ และ ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง ที่ให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และคณาจารย์ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัวรัตนวารินทร์ชัย ที่คอยเป็นกำลังใจสำคัญจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ประกาศ รัตนวารินทร์ชัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลังงานไฮโดรเจน.....	5
2.2 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....	6
2.2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเคมี.....	6
2.2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส.....	7
2.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	7
2.3 สารซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO).....	7
2.4 กระบวนการสเปตเตอริง.....	9
2.4.1 ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสเปตเตอริง.....	10
2.4.2 อัตราการสเปตเตอริง (Sputtering yield, Y).....	10
2.5 ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง (DC Magnetron Sputtering).....	11
2.6 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process).....	12
2.7 เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance; SPR).....	12
2.8 หลักการเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้าน.....	13
2.8.1 การตรวจสอบหาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD).....	13
2.8.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของวัสดุด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	15
2.9 การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical measurement).....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1 โวลแทมเมทรี (Votammetry).....	16
2.10 ทบทวนวรรณกรรม.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	19
3.1.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	19
3.1.2 การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	20
3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยอนุภาคทองคำนาโน.....	21
3.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้านต่าง ๆ ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	21
3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD).....	21
3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM).....	22
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยวี่ วิสิเบิล สเปกสโคปี (UV-Visible spectroscopy).....	23
3.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	26
4.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อ ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	26
4.2 การศึกษาอิทธิพลของเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อลักษณะทางกาย ภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	31
4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้โครงสร้างแท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนทอง.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	40
5.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ.....	41
บรรณานุกรม.....	42
ประวัติผู้เขียน.....	45

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาทำการวิจัย.....	4
3.1 เงื่อนไขการปลูกซิงค์ออกไซด์.....	19
3.2 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกัน....	20
3.3 เงื่อนไขการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ตามเวลาในการปลูกที่แตกต่างกัน.....	20
3.4 เงื่อนไขการสปีดเตอริงอนุภาคทองคำนาโนตามเวลาที่แตกต่างกัน.....	21



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์.....	8
2.2 โครงสร้างแบบ Zinc blend.....	8
2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ.....	9
2.4 ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง.....	11
2.5 ภาพแสดงการเกิดเซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ โดยแสดงการสั่นของกลุ่มอิเล็กตรอน ในแถบเหนี่ยวนำเมื่อมีแสงจากภายนอกส่องผ่าน.....	13
2.6 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร์ริก.....	14
2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	14
2.8 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....	15
2.9 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่าประสิทธิภาพที่ได้.....	17
2.10 ภาพ SEM a.) แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์รูปแบบส้อม b.) แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์รูปแบบ สี่เหลี่ยม.....	17
2.11 a.) ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ b.) ค่าประสิทธิภาพที่ได้.....	18
3.1 เครื่อง XRD Rigaku รุ่น SmartLab.....	22
3.2 SEM Hitachi รุ่น SU8030.....	23
3.3 เครื่องยูวี วิสิเบิล สเปกสโคปี รุ่น T92+ UV Spectrophotometer.....	24
3.4 เครื่องจำลองแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar simulator) รุ่น XPS300.....	25
3.5 เครื่องโพเทนทีโอสแตต (Potentiostat) รุ่น PGSTAT 302N.....	25
4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันเข้มข้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์.....	27
4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้ความเข้มข้นสาร ตั้งต้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์.....	28
4.3 ลักษณะทางความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้ความเข้มข้นสารตั้งต้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์.....	28
4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	29
4.5 ลักษณะการเกิดเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	30
4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อให้ความต่างศักย์โดยฉายแสงและไม่ฉายแสง.....	31
4.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้เวลาในการปลูก แตกต่างกันคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง.....	32
4.8 ลักษณะทางความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้เวลาในการปลูกแตก ต่างกันคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง.....	33

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความสูงเฉลี่ยของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเวลาต่างกัน.....	33
4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อให้ความต่างศักย์โดยฉายแสงและไม่ฉายแสง.....	34
4.11 ช่วงสเปกตรัมของแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar spectrum).....	35
4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบด้วยอนุภาคทองที่เวลาแตกต่างกัน.....	36
4.13 ภาพลักษณะพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สปีดเตอริงอนุภาคนาโนทองที่เวลาต่างกัน.....	37
4.14 ภาพลักษณะพื้นผิวที่มองจากมุม 45 องศาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สปีดเตอริงอนุภาคนาโนทองที่เวลาต่างกัน.....	37
4.15 กราฟแสดงปริมาณอนุภาคนาโนทองที่สปีดเตอริงที่เวลาต่างกันที่วิเคราะห์จาก EDS.....	38
4.16 การดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่มีปริมาณอนุภาคนาโนทองต่างกัน.....	38
4.17 ค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อให้ความต่างศักย์โดยฉายแสงและไม่ฉายแสงของขั้วไฟฟ้าเมื่อตกแต่งแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยอนุภาคนาโนทองด้วยการสปีดเตอริงที่เวลาต่างกัน.....	39

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของสังคมเมือง ส่งผลให้เกิดความต้องการในการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แหล่งพลังงานที่ได้จากสารประกอบอินทรีย์ (Hydrocarbon Compound) อาทิเช่น ปิโตรเลียม (Petroleum) ฟอสซิล (Fossil) ถ่านหิน (Coal) ที่เกิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตาม แหล่งพลังงานดังกล่าวเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) รวมทั้งการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและการกักเก็บพลังงานดังกล่าวจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง

ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen,  $H_2$ ) ถือเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียน ที่ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เมื่อพิจารณาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน กระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง (Photoelectrochemical Water Splitting, PCE) เป็นกระบวนการที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เป็นจำนวนมาก รวมทั้งระบบที่ใช้ไม่มีความซับซ้อน นอกจากนี้ในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งนั้นไม่เพียงแต่ผลิตได้เฉพาะก๊าซไฮโดรเจน แต่ยังสามารถผลิตก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ได้ในเวลาเดียวกัน ประสิทธิภาพในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการดูดกลืนแสง (Absorption) และการส่งผ่านพาหะประจุ (Carrier Transport) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Material) ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode Electrode) ซึ่งวัสดุสารกึ่งตัวนำที่กำลังได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด อาทิเช่น ทังสเตนออกไซด์ (Tungsten Oxide,  $WO_3$ ) [1] เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide,  $Fe_2O_3$ ) [2-3] บิสมัทวานาเดท (Bismuth Vanadate,  $BiVO_4$ ) [4] ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide,  $TiO_2$ ) [5] และ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide,  $ZnO$ ) [6-8] เป็นต้น โดยซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเด่นเช่น มีแถบพลังงานต้องห้ามที่กว้าง (Wide Energy Band Gap,  $\sim 3.37$  eV) [8] มีความคล่องตัวของพาหะประจุที่ค่อนข้างสูง (High Carrier Mobility) มีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนที่สูง นอกจากนี้วัสดุซิงค์ออกไซด์ยังสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type Semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวชนิดพี (P-type Semiconductor) ได้ [9-11] ส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดบ่อยครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้อยู่ในโครงสร้างระดับนาโน (Nanostructures) ไม่ว่าจะเป็นลวดนาโน (Nanowires) หรือ แท่งนาโน (Nanorods) ไม่เพียงแต่เพิ่มพื้นที่สัมผัสในการทำปฏิกิริยา แต่ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านพาหะประจุ (อิเล็กตรอน) ไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode electrode) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง การเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายเทคนิค เช่น Vapor-Liquid-Solid (VLS growth) เทคนิคแมกนีตรอน สปีดเตอริง (Magnetron sputtering) และเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นชั้นแรกเริ่ม (Seed-assisted hydrothermal) ซึ่งเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลนั้นมีข้อได้เปรียบในแง่ของระบบในการเตรียมไม่ยุ่งยาก สามารถเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ในพื้นที่ขนาดใหญ่ (Large area) รวมทั้งอุณหภูมิจากกระบวนการเตรียมค่อนข้างต่ำ

ในงานวิจัยนี้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ด้วยกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง ซึ่งปัจจัยของความเข้มข้นสารตั้งต้น และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ รวมทั้งประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ถูกศึกษาและอภิปราย

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเกิดความรู้ความเข้าใจในกลไกการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 1.2.2 เพื่อเกิดความรู้ความเข้าใจการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด สำหรับกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

## 1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง

- 1.3.1 ศึกษาความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง
- 1.3.2 ศึกษาการปริมาณการใช้อนุภาคนาโนทองที่ตกแต่งลงบนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้านของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ และศึกษาการนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสม ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้เทคนิคโวลแทมเมทรี (Voltammetry)

### สมมติฐานงานวิจัย

1 แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ของการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

2 การตกแต่งแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยอนุภาคนาโนทองช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 สังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง

1.4.1 ตกแต่งแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยอนุภาคนาโนทอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการทำวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาทำการวิจัย									
	ปี 2559					ปี 2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาหลักการในสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และกลไกการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์										
2. ออกแบบเงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์										
3. ตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้านของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ และศึกษาการนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง										
4. วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลังงานไฮโดรเจน

พลังงานหมายถึงพลังงานที่ได้มาจากธรรมชาติ เช่น ได้จากน้ำ แสงแดด คลื่นลม และเชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil fuel) ซึ่งได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาตินอกจากนั้น ยังได้พลังงานจากความร้อนใต้พิภพ แร่นิวเคลียร์ ไม้พิน แกลบ และขานอ้อย พลังงานที่ได้จากแหล่งต่างๆ ดังกล่าว เรียกว่า พลังงานต้นกำเนิด (Primary energy) ส่วนพลังงานที่ได้มาโดยการนำพลังงานต้นกำเนิดดังกล่าวมาแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ในลักษณะต่างๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ถ่านโค้ก และก๊าซหุงต้ม เราเรียกว่า พลังงานแปรรูป (Secondary energy) พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้ เช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุบางอย่างจะเกิดพลังงานจลน์และเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่ได้ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดพลังงานแสงสว่าง [12]

พลังงานจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ โดยความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลนี้ จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสาเหตุหลักของสภาวะโลกร้อนหรือปรากฏการณ์เรือนกระจก เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันมาจากปิโตรเลียมและถ่านหิน ซึ่งมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องและกำลังจะหมดไปในไม่ช้า วิกฤตการณ์เช่นนี้ทำให้ทุกประเทศมีความตื่นตัวเป็นอย่างมากในการแสวงหาพลังงานแหล่งใหม่ๆ เพื่อทดแทนการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม พลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่นำความสนใจ เป็นพลังงานที่ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง สะอาด และสามารถนำมาใช้กับรถยนต์ หรือยานพาหนะอื่นๆ ได้โดยไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน

ไฮโดรเจน (Hydrogen,  $H_2$ ) เป็นธาตุที่มีความสำคัญมากต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกเพราะเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำ ไขมัน หรือน้ำแข็ง แต่หากอยู่รวมกันเองก็คือก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนมีคุณสมบัติที่สามารถติดไฟได้ มีความสะอาดสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย ไม่มีเปลวไฟเวลาเผา การเผาไหม้สะอาด ไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [13] จากการที่ธาตุไฮโดรเจนเป็นธาตุลำดับที่หนึ่งของตารางธาตุจึงมีน้ำหนักเบาที่สุดและเป็นธาตุที่พบมากที่สุด ในเอกภพ และไฮโดรเจนมีจุดเดือด  $-252.87$  องศาเซลเซียสและมีจุดหลอมเหลว  $-259.14$  องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ไฮโดรเจนมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงถึง  $3,000$  องศาเซลเซียส ให้พลังงานความร้อน  $2,870$  กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าพลังงานเชื้อเพลิงที่ได้จากไฮโดรเจนจะมากกว่าค่าพลังงานเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน และเชื้อเพลิงจากแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลและเอทานอล ถึง  $2.5$  และ  $5$  เท่า ตามลำดับ ไฮโดรเจนมีค่าความร้อนสูงถึง  $122$  กิโลจูลต่อกรัม มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่ดีและสามารถพัฒนาให้เป็นเชื้อเพลิงหลักได้ ดังนั้นการได้มาซึ่งก๊าซ

ไฮโดรเจนนั้นมีหลายวิธี ทั้งก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และที่เกิดโดยกิจกรรมของมนุษย์ [14]

ในปัจจุบันมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่ นำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตพลังงาน เพื่อใช้แทนพลังงานดั้งเดิม และยังนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง

## 2.2 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

แม้ว่าไฮโดรเจนจะเป็นธาตุที่พบมากที่สุดบนโลก แต่ก็ไม่ได้อยู่ในสภาพก๊าซไฮโดรเจนที่พร้อมใช้งาน ดังนั้นการที่จะนำไฮโดรเจนมาใช้งานจะต้องสกัดไฮโดรเจนจากสารประกอบ ซึ่งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นมีหลายวิธี ดังนี้

### 2.2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเคมี

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเคมี (Thermochemical process) เป็นการให้ความร้อนในการเปลี่ยนมวลชีวภาพ ก๊าซธรรมชาติหรือ ถ่านหิน ให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซผสมที่ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) น้ำ ( $H_2O$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) จากนั้น จึงทำการแยกไฮโดรเจนออกมาโดยใช้รูปแบบของการเผาไหม้ การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการความร้อนเคมีมีหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (Steam reforming) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นต้น การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเคมีสามารถจำแนกตามสารตั้งต้นได้เป็น 5 รูปแบบ [13] ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงก๊าซธรรมชาติ
2. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากถ่านหิน
3. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชีวมวล
4. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงเหลว
5. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูงในการแยกโมเลกุลของน้ำ

แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ใช้ก๊าซธรรมชาติหรือ ถ่านหินที่มีอยู่อย่างจำกัด และก่อให้เกิดมลพิษเนื่องจากมีสารพิษตกค้างจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์

### 2.2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (Photolysis process) เป็นกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากการแตกโมเลกุลของน้ำโดยอาศัยพลังงานแสง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเร็วมากและสามารถที่จะนำมาใช้ทำการผลิตในระยะยาวได้ นอกจากนี้กระบวนการผลิตยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้สามารถที่จะแบ่งออกได้ 2 กระบวนการ [13] ดังนี้

1. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีการโฟโตอิเล็กโทรเคมีคอล
2. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีการโฟโตไลซิสของจุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสง

### 2.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตไฮโดรเจนที่มีแนวโน้มที่ดี หลักการเบื้องต้นคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์ไฟฟ้าเคมีทางแสง ซึ่งจมอยู่ในน้ำ และได้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ในกระบวนการนี้ การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำโดยใช้แสงอาทิตย์และสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า เซลล์ไฟฟ้าเคมีทางแสง (Photo-electrochemical Cell) ในระบบนี้ สารกึ่งตัวนำดังกล่าวจะใช้พลังงานแสงในการแยกโมเลกุลของน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยที่สารกึ่งตัวนำต่างชนิดจะตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ไม่เท่ากันซึ่งจะได้พลังงานในปริมาณที่แตกต่างกันด้วย การวิจัยมุ่งเป้าไปที่การพัฒนาสารกึ่งตัวนำที่รองรับพลังงานในการแยกน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ การแยกน้ำด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางแสงยังถือได้ว่าอยู่ในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตามในระยะยาวเทคโนโลยีนี้จะเป็นเทคนิคในการผลิตไฮโดรเจนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสงนั้นสามารถได้แสดงได้ [1-8,15] ดังสมการ

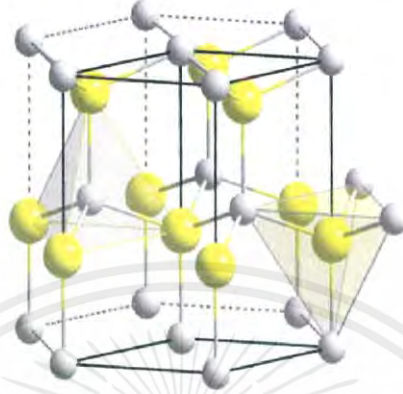


ข้อดีของวิธีการนี้คือ ไม่ก่อให้เกิดสภาวะก๊าซเรือนกระจกในระหว่างกระบวนการผลิต ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือ ต้องการกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก และสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในแต่ละขั้นตอนของการแยกสลายด้วยน้ำ [13]

## 2.3 สารซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

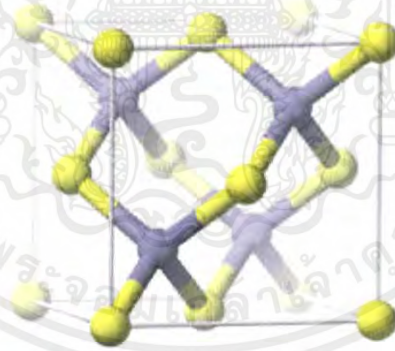
ซิงค์ออกไซด์เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่สมิธโซไนต์ (Smithsonite) ตั้งแต่ยุคอียิปต์โบราณ มนุษย์ได้ใช้ซิงค์ออกไซด์ในการรักษาโรค ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว เป็นสารที่ใช้ยับยั้งการแบคทีเรีย (Anti-bacteria) นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียแล้วยังไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ทำให้เป็นที่นิยมในการนำซิงค์ออกไซด์มาเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตยาต้านแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกันรังสียูวีและยูวีบีได้อีกด้วย และยังช่วยระงับกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ได้อีกด้วย

สารประกอบซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกได้สองรูปแบบคือ โครงสร้างแบบเวิร์ทไซต์ (Wurtzite structure) และแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blend structure) สำหรับโครงสร้างแบบ Wurtzite จะประกอบไปด้วย ไอออน  $O^{2-}$  จัดเรียงตัวจัดเรียงตัวกันในรูปแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องเตตระฮีดรอลมี  $Zn^{2+}$  แทรกอยู่ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์ [17]

สำหรับโครงสร้างแบบ Zinc blend จะประกอบไปด้วย  $O^{2-}$  จัดเรียงตัวแบบโครงสร้างเฟซเซนเตอร์คิวบิก (Face centered cubic structure; FCC) โดยมี  $Zn^{2+}$  เข้าไปบรรจุอยู่ครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยแต่ละไอออน  $Zn^{2+}$  จะ  $O^{2-}$  4 ไอออนมาล้อมรอบดังภาพที่ 2.2

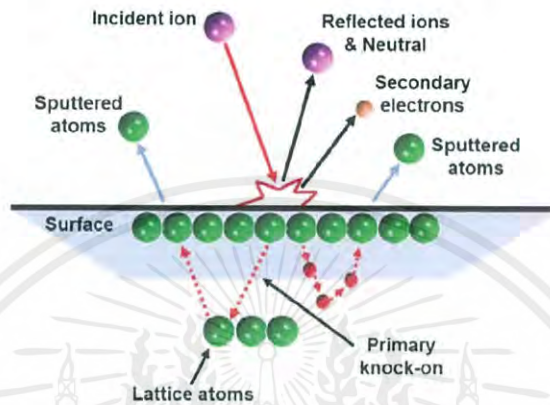


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างแบบ Zinc blend [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กระบวนการสปัตเตอริง [18]

สปัตเตอริงเป็นผลลำดับชั้นการชน (Collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากผิวเป้าที่ถูกชนด้วยไอออนบวก อะตอมที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการชนจะเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากเป้าไม่มากนัก โดยประมาณไม่เกิน 10 อังสตรอม และอะตอมของผิวเป้าซึ่งถูกสปัตเตอริงจะเป็นชั้นสุดท้ายในลำดับการชน ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ [19]

อันตรกิริยาระหว่างผิวเป้าสารเคลือบกับไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยพลังงานต่างๆ กันจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ไอออนบวกที่เข้าชนอะตอมของเป้าแบบยึดหยุ่นจะสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเป้า ซึ่งส่วนใหญ่รวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบและสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า
2. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงมากเมื่อชนกับเป้าสารเคลือบอาจฝังตัวในเป้าสารเคลือบโดยที่ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานของไอออนที่เข้าชน
3. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ เรียกกระบวนการนี้ว่า การสปัตเตอริง รวมทั้งมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ด้วย

การพิจารณาการชนระหว่างอนุภาคที่เกี่ยวข้องแต่ละคู่ทั้งระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของเป้า และระหว่างอะตอมของเป้าด้วยการ ยึดถือตามแบบจำลองการชนแบบยึดหยุ่นของแบบจำลองลูกบิลเลียดระหว่างการชนโมเมนตัมจะถูกส่งผ่านจากอนุภาคที่เข้าชนไปยังอนุภาคที่ถูกชนในทิศทางแนวฉากที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองในขณะที่ยึดกัน โดยกลไกการถ่ายเทโมเมนตัมที่สามารถนำไปสู่การสปัตเตอริง เริ่มต้นจากไอออนบวกชนเป้าแล้วถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวเป้าซึ่งอยู่นิ่ง อะตอมที่ถูกไอออนบวกชนในลักษณะการชนแบบพลังงานต่ำจะได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในแนวขนานกับผิวเป้าเป็นส่วนใหญ่จึงเคลื่อนตัวออกในแนวเฉียงด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดจากผิวเป้าได้จากการชนเพียงลำดับแรก การชนระหว่างไอออนบวกกับอะตอมนี้เรียกว่า การชนปฐมภูมิ (Primary knock-on) ส่วนอะตอมที่ได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในทิศพุ่งเข้าสู่เป้าเป็นส่วนใหญ่จะเคลื่อนตัวลึกลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป และอาจสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกได้ หรือทำให้เกิดการชนกันอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมเป้าสารเคลือบ จนกระทั่งทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศที่เปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกตกกระทบ อะตอมเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวให้หลุดออกในที่สุด

#### 2.4.1 ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอริง

อะตอมที่หลุดออกจากผิวจะมีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่ด้ว้ออกด้วยวิธีระเหยถึง 50-100 เท่าโดยที่อะตอมมีการกระจายค่าพลังงานแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) ถ้าไอออนบวกที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปีดเตอริงจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อไอออนบวกที่เข้าชนมีพลังงานมากกว่า 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปีดเตอริงจะมีค่าคงตัว เป้าสารเคลือบที่มีค่าการสปีดเตอริงสูงจะมีอนุภาคที่หลุดออกมาจำนวนมากทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมมีค่าต่ำทั้งนี้เนื่องจากไอออนบวกที่ชนจะเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมา ดังนั้นอะตอมแต่ละตัวจึงได้รับพลังงานเฉลี่ยลดลง [18]

#### 2.4.2 อัตราการสปีดเตอริง (Sputtering yield, Y)

อัตราการสปีดเตอริง คืออัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณอะตอมที่หลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบต่อปริมาณไอออนที่เข้าชน [18] ดังสมการ

$$Y = N_a/N_i \quad (2.2)$$

โดยที่ Y คือ อัตราการสปีดเตอริง

$N_a$  คือ จำนวนอะตอมโดยเฉลี่ยที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบ

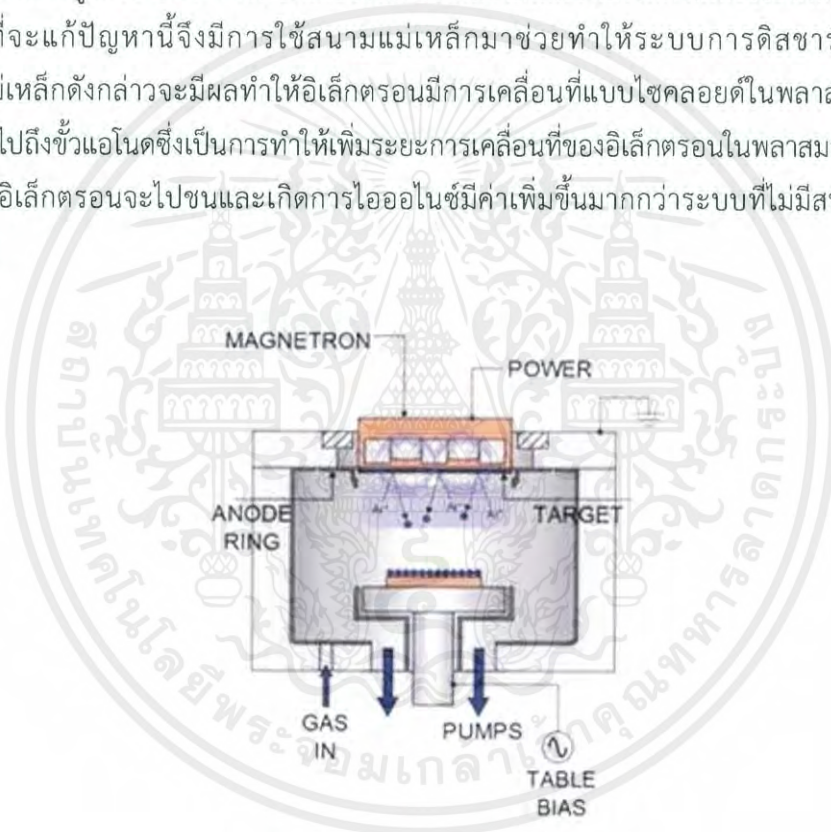
$N_i$  คือ จำนวนไอออนที่เข้าชน

อัตราการสปีดเตอริงนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆ ในกระบวนการดังนี้

1. ค่าพลังงานของไอออนที่เข้าชน
2. ชนิดและระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ
3. ชนิดของไอออนบวก
4. มุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ

## 2.5 ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering)

ในช่วงต้นของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงใช้ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงดังภาพที่ 2.4 โดยจัดตำแหน่งของแอโนดให้อยู่บริเวณเนกาทีฟโพล์และใช้ช่วงนอร์มอลโกลวดิสชาร์จในการเคลือบฟิล์มเนื่องจากอัตราการเกิดสปัตเตอริงแปรผันตรงกับอัตราการสปัตเตอริงและปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบในระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและความดันก๊าซ โดยค่าความดันก๊าซที่ต้องใช้ในการทำงานมีค่าค่อนข้างสูง ( $10^{-2} - 10^{-1}$  mbar) ทำให้ค่าระยะปลอดการชนกับอะตอมของก๊าซในระบบมาก และค่าอิมพีแดนซ์ของพลาสมามีค่าที่สูง ทำให้ความต่างศักย์ที่ให้กับระบบจำเป็นต้องมีค่าสูงด้วย อัตราการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มจึงมีค่าที่ต่ำเมื่อใช้ระบบดีซีสปัตเตอริงในการที่จะแก้ปัญหาจึงจะมีการใช้สนามแม่เหล็กมาช่วยทำให้ระบบการดิสชาร์จดีขึ้น โดยสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่แบบไซโคลอยด์ในพลาสมาก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปถึงขั้วแอโนดซึ่งเป็นการทำให้เพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพลาสมาทำให้โอกาสในการที่อิเล็กตรอนจะไปชนและเกิดการไอออไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก [18,19]



ภาพที่ 2.4 ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริง [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process)

การเตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยาพวกเกลือของโลหะออกไซด์ หรือพวกโลหะต่างๆ โดยปกติจะใช้น้ำทำให้อยู่ในรูปของสารละลายหรือสารแขวนลอย ให้ความร้อนที่อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งการตกตะกอนภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดผงที่ปราศจากน้ำ (Anhydrous Powder) นอกจากนี้ผงที่ได้ยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากโดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ  $10^{-12}$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้อย ส่วนใหญ่เป็นพวกผลึกเชิงเดี่ยว มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลนี้มีความแตกต่างจากเทคนิคการตกตะกอนคือ ต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งอุณหภูมิที่ใช้งานก็มักจะใกล้เคียงกับบริเวณจุดเดือดกับอุณหภูมิวิกฤติของน้ำ คือ 374 องศาเซลเซียส และความดัน ประมาณ 20 เมกะปาสกาลจึงต้องทำการเตรียมในหม้อนิ่งอัดความดันไอ (Autoclave) [20]

การเตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนี้มีข้อดีหลายประการ [19] คือ

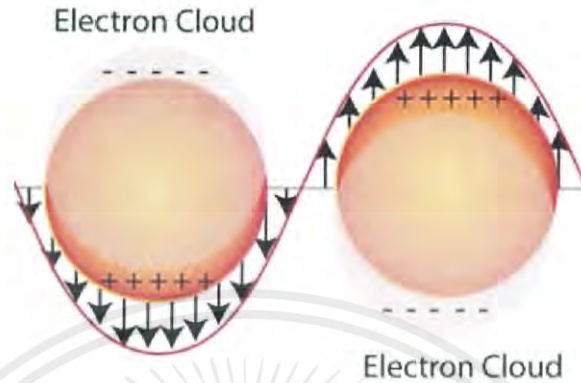
1. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความบริสุทธิ์สูง
2. ผลึกที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างที่สมมาตร
3. อนุภาคมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ
4. สามารถเตรียมสารประกอบทางเคมีได้หลากหลาย
5. กระบวนการที่เกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว
6. ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย

## 2.7 เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance; SPR)

เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ ก็คือปรากฏการณ์เชิงแสง ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะระดับนาโน กล่าวคือเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบโลหะ กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกจำกัดอยู่ในอนุภาคระดับนาโนจะเกิดการสั่นรวม (collective oscillation) และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในอนุภาคนาโนจะทำให้เกิดการกำทอนขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบคือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทาง เรียกว่า การกระเจิง (scattering) และในขณะเดียวกัน บางโฟตรอนก็จะถูกดูดกลืนและถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ซึ่งเรียกว่าการดูดกลืนแสง (absorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างระดับนาโนของโลหะจะเกิดทั้งกระบวนการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสงซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน ดังนั้น เมื่อแสงตกกระทบที่โครงสร้างระดับนาโนของโลหะอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบเหนี่ยวนำและจะเกิดการสั่นพ้องกับแสงที่มาตกกระทบ ซึ่งจะทำให้เกิดพลาสมอน โพลาริตรอน ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งจะสามารถถ่ายทอดระหว่างรอยต่อของโลหะและไดอิเล็กทริก ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดอยู่บริเวณเปลือกชั้นนอกของโลหะนาโน เพราะแสงจากภายนอกไม่สามารถส่องทะลุผ่านเข้าไปภายในวัสดุได้ โดยทั่วไปจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า localized surface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

plasmon resonance (LSPR) แสงที่ตกกระทบที่พื้นผิวของวัสดุจะทำอันตรกิริยากับวัสดุสองแบบคือ การดูดกลืน และการกระเจิง โดยแสงที่ถูกดูดกลืนก็จะขึ้นกับขนาดของขนาดของอนุภาคระดับนาโน [21,22]



ภาพที่ 2.5 การเกิดเซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ โดยแสดงการสั่นของกลุ่มอิเล็กตรอนในแถบเหนี่ยวนำเมื่อมีแสงจากภายนอกส่องผ่าน [22]

## 2.8 หลักการเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้าน

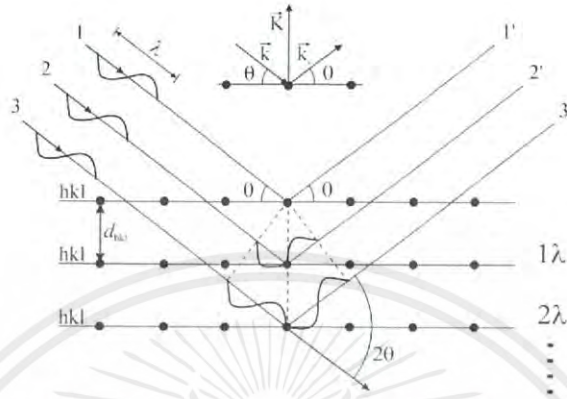
### 2.8.1 การตรวจสอบหาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัวตรวจวัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกันจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง ซึ่งการเลี้ยวเบนมีมุมในการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบ (h k l) ที่รังสีมาตกกระทบภายในอะตอมของธาตุ โดยที่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะมีความเฉพาะของมันแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำมาตรวจสอบได้ว่าสารนั้นเป็นสารชนิดใดซึ่งจะพิจารณาจากข้อมูลความสัมพันธ์ของสมการแบรกก์ (Bragg's equation) ดังสมการที่ 2.3 และพิจารณาความเข้มของพีคสูงสุดที่เกิดในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพ 2.6 แล้วนำรูปแบบมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐาน JCPDS (Joint committee on powder diffraction standard) เพื่อเปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้น ในวิเคราะห์โดยใช้ช่วงมุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 10 - 80 องศา โดยตั้งค่าการเคลื่อนที่ของตัวตรวจวัดที่ 0.02 องศาต่อนาที [23]

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.3)$$

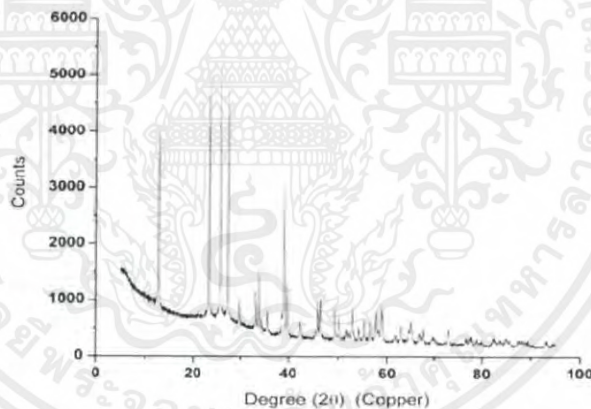
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก  
 $\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึก  
 $n$  คือ เลขใดๆ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $1.54 \text{ \AA}$ )



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร็กก์ [24]

สเปกตรัมของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงแกน  $y$  เป็นค่า (Count) และแกน  $x$  เป็นค่า (Degree,  $2\theta$ ) แสดงในภาพ 2.7



ภาพที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [23]

จากรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการคำนวณหาขนาดของเฟสที่ต้องการศึกษาได้โดยอาศัยสมการของ Scherrer คือสมการที่ 2.4

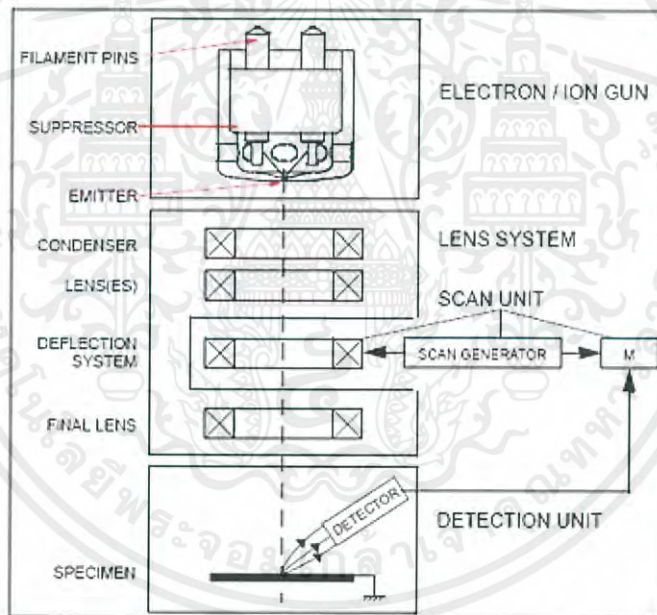
$$t = K\lambda/B_{\text{size}}\cos\theta \quad (2.4)$$

- เมื่อ  $t$  คือ ขนาดของผลึก  
 $K$  คือ ค่าคงที่ มีค่าประมาณ 0.9  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $B_{\text{size}}$  คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน  
 $\theta$  คือ มุมแบร็กก์ (องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของวัสดุด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่องนี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) โดยหลักการทำงานของเครื่องแยกแบบแต่ละส่วนดังภาพที่ 2.8 คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกมาจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดย Condenser lens และปรับโฟกัสโดย Objective lens ถ้าต้องการให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปทั่วผิวของตัวอย่างก็สามารถควบคุมได้โดยใช้ Scanning coils แล้วหัววัด (Detector) จะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นและถูกแปลงเป็นข้อมูลที่ต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ [25] และแปลงเป็นภาพ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical)

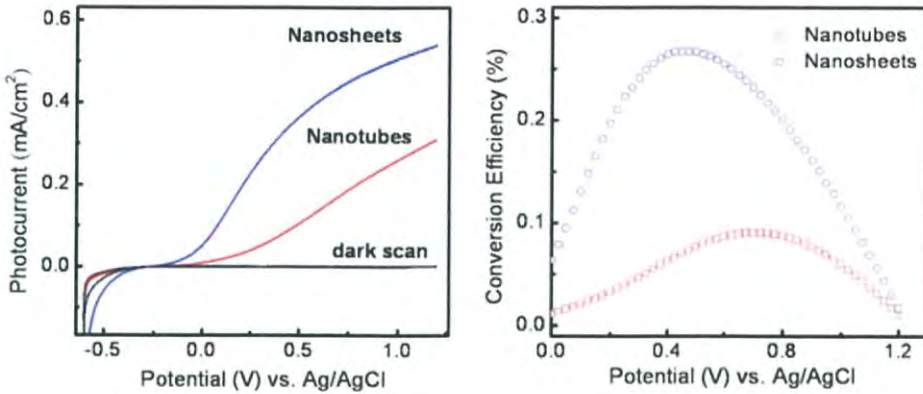
### 2.9.1 โวลแทมเมตรี (Voltammetry)

โวลแทมเมตรีเป็นวิธีวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการคือ การให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าเพื่อทำงานเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในสารละลาย โดยเทคนิคการวัดแบบโวลแทมเมตรีได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการใช้การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยในการศึกษาจะวัดในที่มีดเทียบกับการวัดตอนที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ดังนั้นเมื่อในระบบการวัดมีกระแสที่เพิ่มมากขึ้น เราสามารถที่จะบ่งบอกได้ว่าการที่มีกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นก็คือการที่มีอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนแล้วเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนได้

### 2.10 ทบทวนวรรณกรรม

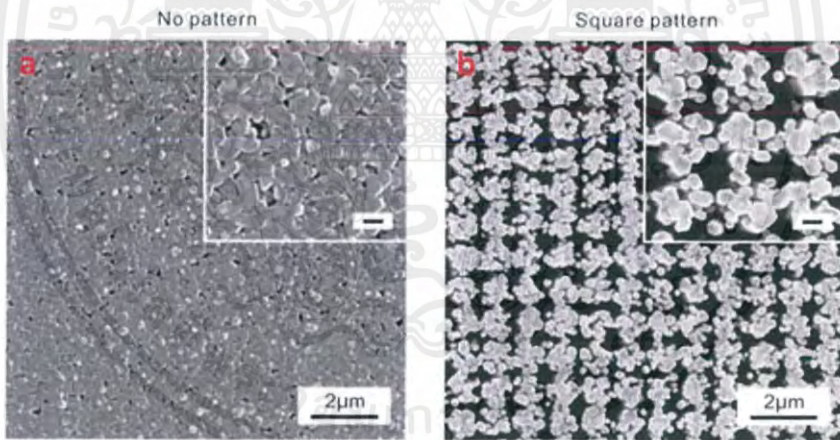
ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของสังคมเมือง ส่งผลให้เกิดความต้องการในการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แหล่งพลังงานที่ได้จากสารประกอบอินทรีย์ (Hydrocarbon Compound) อาทิเช่น ปิโตรเลียม (Petroleum) ฟอสซิล (Fossil) ถ่านหิน (Coal) ที่เกิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิต ซึ่งปัจจุบันแหล่งพลังงานพวกนี้เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) รวมทั้งการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและการกักเก็บพลังงานดังกล่าวจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen,  $H_2$ ) ถือเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียน ที่ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เมื่อพิจารณาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน กระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง (Photoelectrochemical Water Splitting, PCE) เป็นกระบวนการที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

ซึ่งในปี 2011 Yu-Kuei Hsu, Yan-Gu Lin และ Ying-Chu Chen ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนในรูปแบบเป็นแผ่นนาโน และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยสังเคราะห์ลงบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) มาทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง โดยเมื่อนำไปทดสอบในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ไฟฟ้าเคมีโดยแสงเป็นตัวเร่งพบว่าการใช้ซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นนาโนให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่มากกว่าโครงสร้างแบบท่อนาโนดังภาพที่ 2.9 [27]



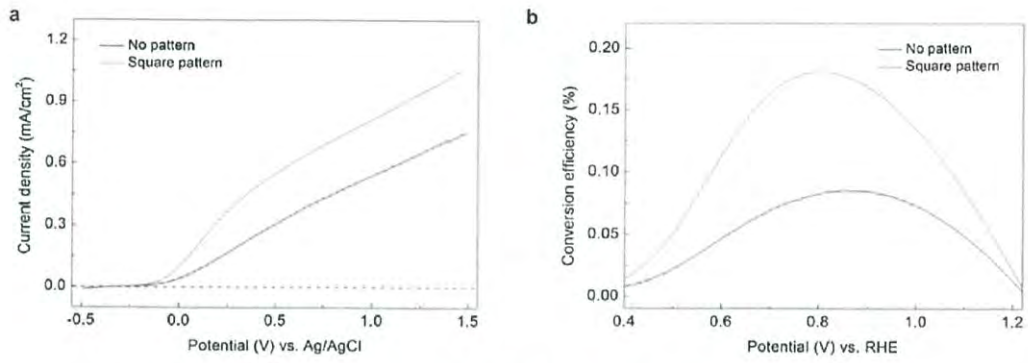
ภาพที่ 2.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่าประสิทธิภาพที่ได้ [27]

ต่อมาในปี 2015 Yaping Hu และคณะได้ทำการศึกษาการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แบบมีรูปแบบดังภาพที่ 2.10b และแบบสุ่มดังภาพที่ 2.10a โดยเมื่อนำไปทดสอบในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ไฟฟ้าเคมีโดยแสงเป็นตัวเร่งพบว่าการทำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แบบมีรูปแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แบบสุ่มให้ค่าประสิทธิภาพดีที่สุดในที่ 0.8 โวลต์ ดังภาพที่ 2.11 [28]



ภาพที่ 2.10 ภาพ SEM a.) แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์รูปแบบสุ่ม b.) แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์รูปแบบสี่เหลี่ยม [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 a.) ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ b.) ค่าประสิทธิภาพที่ได้ [28]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะบอกถึงขั้นตอนที่ใช้ในการทำการทดลองทั้งหมด โดยเริ่มจากการเตรียมเม็ดผลึกด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC Magnetron sputtering) เพื่อใช้เป็นตัวเหยื่อล่อในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล จากนั้นจะนำไปตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้านต่างๆ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาการใช้อิออนูภาคนาโนทองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

#### 3.1 การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

##### 3.1.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จำเป็นที่จะต้องมีส่วนซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นตัวล่อในการเกิดตกผลึกของซิงค์ออกไซด์จนกลายเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ในการทดลองนี้ทำการปลูกซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นตัวล่อด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำให้มีความเป็นผลึกสูง โดยมีเงื่อนไขในการปลูกดังตารางที่ 3.1 ซึ่งปลูกอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นอินเดียมทินออกไซด์ที่ปลูกอยู่บนกระจก หลังจากนั้นจึงจะนำไปปลูกเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการปลูกซิงค์ออกไซด์

Parameter	Condition
Target	Zinc (Zn) 99.99%
DC Generator Power	80 W
Base Pressure	$1 \times 10^{-6}$ Torr
Sputtering Time	40 mins
Argon Flow rate	10 sccm
Oxygen Flow rate	15 sccm
Substrate Temperature	Room Temperature
Working Pressure	8 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

ในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นชั้นแรกเริ่ม ที่ได้จากการสปีดเตอริง ในขั้นตอนแรกได้แยกออกเป็นสองการทดลอง โดยในแต่ละการทดลองจะหาความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหมาะสม ต่อมาจะหาเวลาในการปลูกที่เหมาะสมในการประยุกต์ในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง และเมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมแล้ว จะทำการสปีดเตอริงของคานาโนลงบนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงเพื่อใช้ในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

การทดลองที่ 1 ศึกษาการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อศึกษาลักษณะการเติบโต ตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.2 โดยผลที่ได้จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดจะถูกนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกัน

Parameter	Condition
Precursor	Zinc Nitrate ( $Zn(NO_3)_2$ ) Hexamethylenetetramine ( $C_6H_{12}N_4$ )
Solvent	Deionized water (DI Water)
Growth Time	4 hours
Temperature	90 °C
Precursors concentration	15, 30, 45 and 60 mM

การทดลองที่ 2 ศึกษาระยะเวลาในการสังเคราะห์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อหาเงื่อนไขเวลาที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ตามเวลาในการปลูกที่แตกต่างกัน

Parameter	Condition
Precursors	Zinc Nitrate ( $Zn(NO_3)_2$ ) Hexamethylenetetramine ( $C_6H_{12}N_4$ )
Precursors concentration	45 mM
Solvent	Deionized water (DI Water)
Temperature	90 °C
Time	2, 4, 6 and 8 hours

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วยอนุภาคนาโนทอง

หลังจากที่ได้เงื่อนไขความเข้มข้นและเวลาในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้ว ต่อจากนั้นได้ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนทองโดยใช้เทคนิคสปีดเตอริงในการที่ให้อนุภาคนาโนทองไปติดอยู่บนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยมีเงื่อนไขในการติดอนุภาคนาโนทองดังตารางที่ 3.4 โดยทดสอบปริมาณการใช้อนุภาคนาโนทองตามเวลาที่ใช้ในการสปีดเตอริงเพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการสปีดเตอริงอนุภาคนาโนทองตามเวลาที่แตกต่างกัน

Parameter	Condition
Target	Gold (Au) 99.95%
DC Generator Power	50 W
Base Pressure	$2 \times 10^{-6}$ Torr
Argon Flow rate	10 sccm
Substrate Temperature	Room Temperature
Working Pressure	5 mTorr
Sputtering Time	0, 15, 30 and 60 seconds

### 3.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้านต่าง ๆ ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

#### 3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ที่เป็นไปตามทฤษฎีของแบรกก์ กราฟที่ได้รับการตรวจสอบจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดซึ่งจะมีระนาบที่ต่างกันจะมีลักษณะภาพแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว โดยในการตรวจสอบจะใช้เครื่อง X-ray diffractometer Rigaku รุ่น SmartLab ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่อง XRD Rigaku รุ่น SmartLab

### 3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Hitachi รุ่น SU8030 ดังภาพที่ 3.2 เพื่อดูลักษณะพื้นผิวรูปร่างของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ทั้งความกว้าง ความสูง และลักษณะรูปร่างต่างๆ ทางกายภาพ ได้ละเอียดถึงระดับ 2-3 นาโนเมตร โดยมีกำลังขยายภาพสูงถึง 300,000 เท่า โดยอาศัยการยิงลำอิเล็กตรอนให้ส่องกราดลงมาที่ผิวของชิ้นงาน หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกส่งไปที่มอนิเตอร์และแสดงเป็นภาพบนจอ



ภาพที่ 3.2 SEM Hitachi รุ่น SU8030

### 3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล (UV-Visible spectroscopy)

การวิเคราะห์คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ตค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล สเปกสโคปี รุ่น T92+ UV Spectrophotometer ดังภาพที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 เครื่องยูวี วิสิเบิล สเปกสโคปี รุ่น T92+ UV Spectrophotometer

### 3.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง

กระบวนการแยกน้ำด้วยด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นตัวเร่ง เป็นกระบวนการที่ใช้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานแสงจากด้วยอาทิตย์หรือก็คือพลังงานโฟตรอน (Photon) โดยพลังงานแสงที่ใช้มาจากเครื่องจำลองแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar simulator) รุ่น XPS300 ดังภาพที่ 3.4 ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในระบบเคมีไฟฟ้าคือ เครื่องโพเทนทิโอสแตต (Potentiostat) รุ่น PGSTAT 302N – High Performance potentiostat/galvanostat ดังภาพที่ 3.5 โดยในการทดลองจะเป็นการเป็นการพัฒนาขั้วแอโนด โดยการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิกานาโนทองเพื่อช่วยในการดูดกลืนแสงในช่วงที่แสงที่ตามองเห็น ส่วนในการวัดขั้วแอโนดที่พัฒนาขึ้นจะทำหน้าที่เป็นขั้วทำงาน (Working electrode) ใช้ขั้วซิลเวอร์ ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และใช้ขั้วแพลตตินัม (Platinum; Pt) เป็นขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร วัดในที่มีดเทียบกับวัดตอนฉายแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์



ภาพที่ 3.4 เครื่องจำลองแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar simulator) รุ่น XPS300



ภาพที่ 3.5 เครื่องโพเทนทีโอสแตต (Potentiostat) รุ่น PGSTAT 302N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

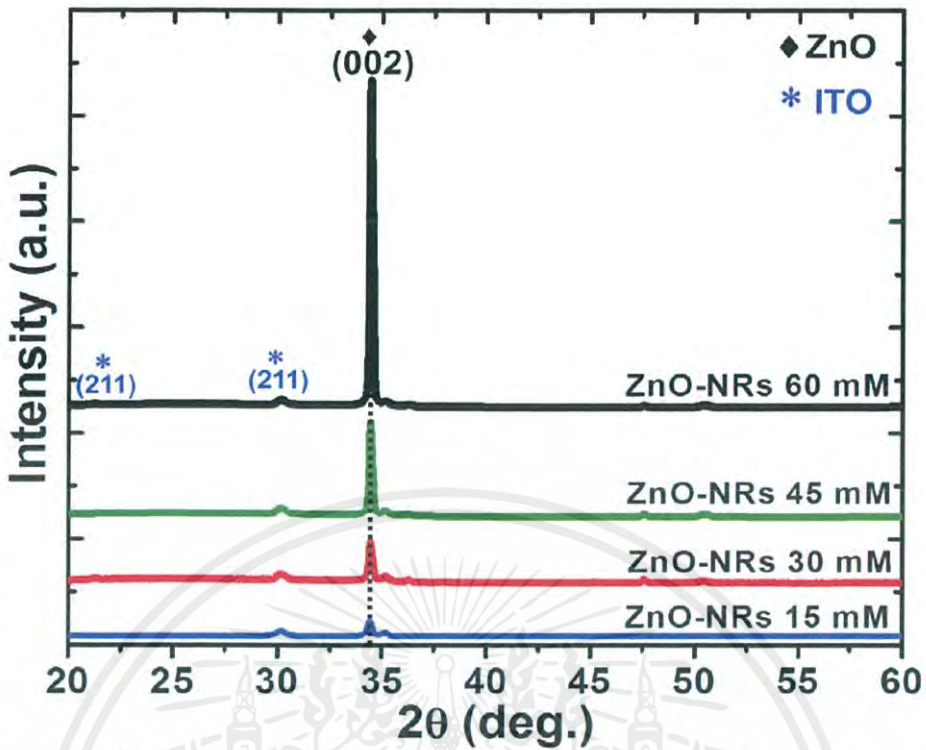
### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดลองจากการเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง โดยในการทดลองแบ่งออกเป็นสามส่วน โดยส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาการเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาในการเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน จากนั้นเมื่อสามารถหาเงื่อนไขการเตรียมที่ความเข้มข้นและเวลาที่ดีที่สุดแล้ว จึงจะเริ่มทำการทดลองที่สาม โดยในการทดลองที่สามจะทำการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแอโนดโดยใช้ออกไซด์นาโนท่อน โดยจะศึกษาเวลาในการเตรียมอนุภาคนาโนท่อนด้วยเทคนิคซีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

#### 4.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

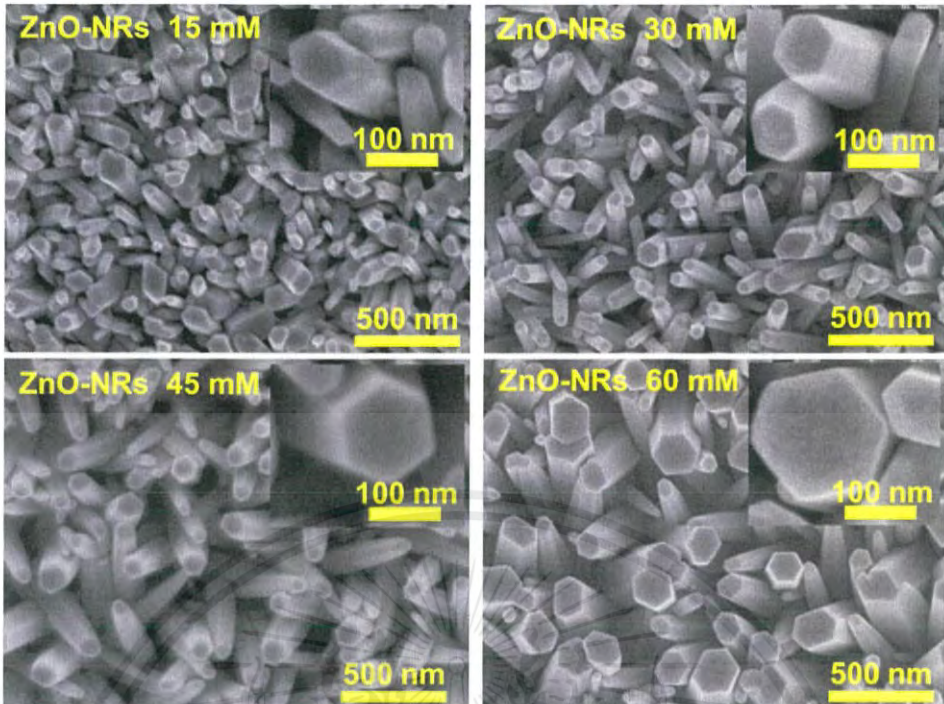
จากการศึกษาลักษณะการเติบโตของการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยมีเม็ดผลึกซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเชื่อมล่อ โดยมีเงื่อนไขการปลูกที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกันตั้งแต่ 15 30 45 และ 60 มิลลิโมลาร์ โดยอัตราส่วนโดยโมลของซิงค์ไนเตรท (Zinc Nitrate) ต่อเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน (Hexamethylenetetramine) เป็น 1:1 ที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปอบที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพโดยดูได้จากความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

จากการศึกษาขนาดผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถเห็นได้จากภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันได้ดังภาพที่ 4.1 โดยจากภาพสามารถสังเกตเห็นได้ว่าทุกความเข้มข้นที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $34.7$  องศา ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ในระนาบ (002) โดยจะสามารถบอกได้ว่าเป็นผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และมีโครงสร้างแบบเวิร์ตไซด์ (Wurtzite) ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDS รหัส 36-1451 [29]

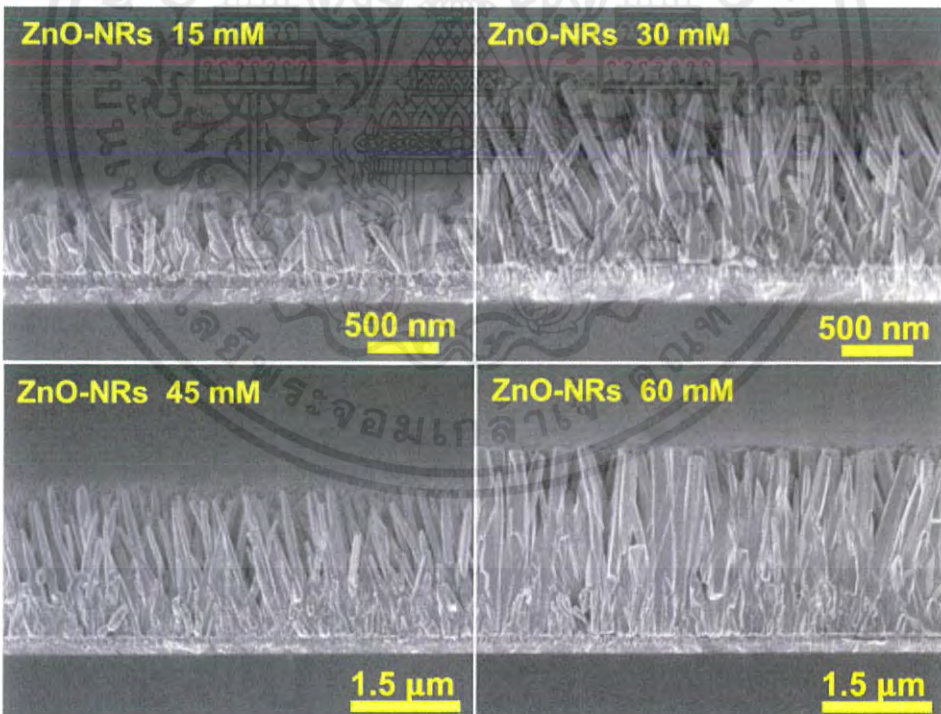


ภาพที่ 4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope; FE-SEM) โดยแสดงดังภาพที่ 4.2 ภาพลักษณะพื้นผิวที่มองจากด้านบนพบว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นท่อนเกลียวแบบเฮกซะโกนอล และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ทำการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกัน โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้นไปเส้นผ่าศูนย์กลางก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดเฉลี่ยของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถหรือได้จากฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gauss distribution) [30] ต่อมาก็ทำการตรวจสอบลักษณะความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยแสดงดังภาพที่ 4.3 โดยพบว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะแท่งที่ตั้งตรงและไม่พบข้อบกพร่องบริเวณรอยต่อ เช่น ช่องว่าง การลิ่มของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ หรือการพบโครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่เฮกซะโกนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นยิ่งก็พบว่าความสูงก็เพิ่มสูงตามความเข้มข้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะทำให้ได้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 4.4

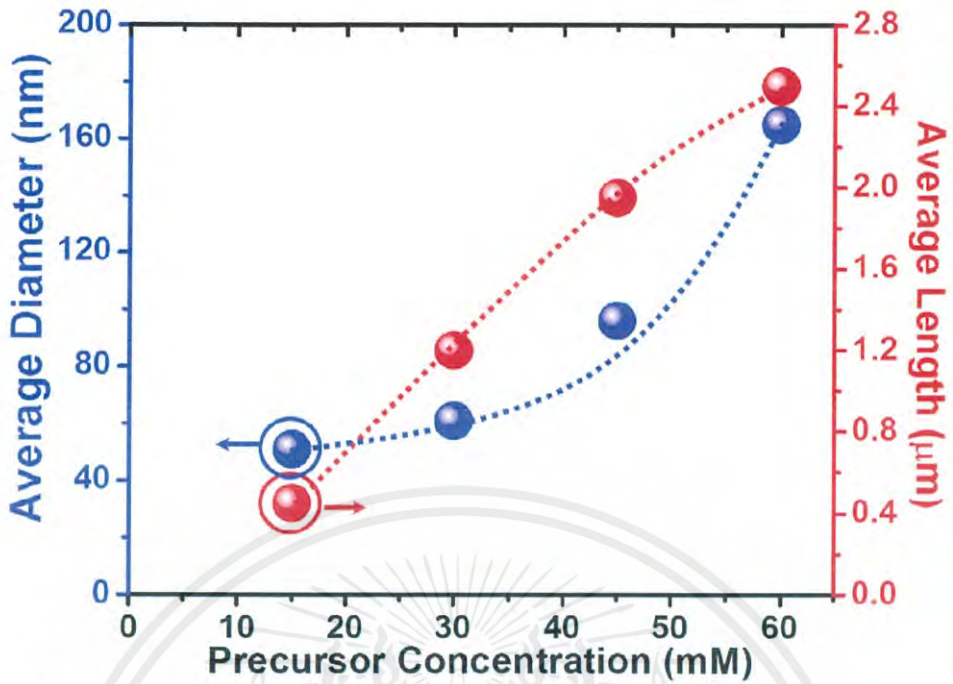


ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้ความเข้มข้นสารตั้งต้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์



ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้ความเข้มข้นสารตั้งต้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

กลไกการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยมีเม็ดผลึกเป็นตัวเหยื่อล่อ โดยสารตั้งต้นในการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซิงค์ไนเตรท (Zinc Nitrate;  $Zn(NO_3)_2$ ) และเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน (Hexamethylenetetramine;  $C_6H_{12}N_4$ ) ที่อยู่ในน้ำปราศจากไอออน โดยมีสมการการเกิดดังนี้ [31]

จากสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2$  อยู่ในน้ำทำให้สามารถแตกตัวให้  $Zn^{2+}$  ดังสมการ



ส่วนสาร  $C_6H_{12}N_4$  เมื่ออยู่ในน้ำจะทำให้แตกตัวได้  $OH^-$  ดังสมการ



จากนั้นเมื่อ  $Zn^{2+}$  และ  $OH^-$  อยู่ในระบบจะทำให้เกิดเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ของสารซิงค์ไฮดรอกไซด์ (Zinc hydroxide;  $Zn(OH)_2$ ) ดังสมการ

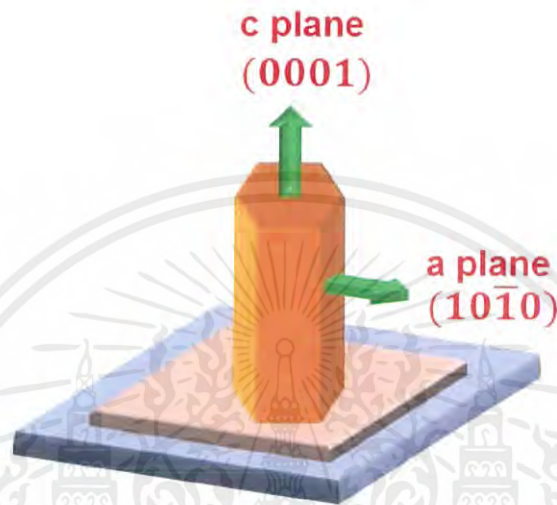


โดยจะเกิดจนกระทั่งความเข้มข้นของ  $Zn^{2+}$  และ  $OH^-$  อิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) ที่สภาวะนี้จึงทำให้เกิดนิวเคลียสของ ZnO ดังสมการ



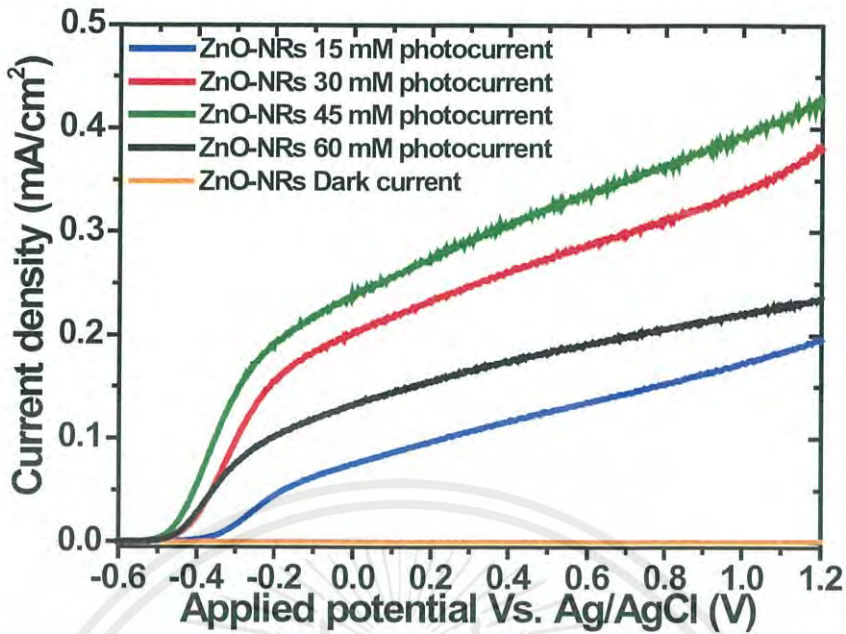
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการเกิดซิงค์ออกไซด์จะสามารถสรุปได้ว่ายิ่งสารตั้งต้นมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ได้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ซิงค์ออกไซด์ไปเกิดเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้มากขึ้น โดยการตกผลึกเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ขึ้นกับพลังงานพื้นผิว (Surface energy) โดยในระนาบ 0001 (c plane; Surface energy = 2.0 J/m<sup>2</sup>) พบว่าจะมีพลังงานพื้นผิวมากกว่าระนาบ 10 $\bar{1}0$  (a plane; Surface energy = 1.16 J/m<sup>2</sup>) [32] ทำให้การตกผลึกของซิงค์ออกไซด์ต้องเข้ามาตกที่ระนาบ C มากกว่าระนาบ A ทำให้เกิดเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ลักษณะการเกิดเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

หลังจากนั้นได้นำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้ทำการประกอบเป็นขั้วไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในระบบการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง เพื่อใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยในการวัดกระแสไฟฟ้าโดยให้ความต่างศักย์ตั้งแต่ -0.6 ถึง 1.2 โวลต์ พร้อมฉายแสงและไม่ฉายแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ดังภาพที่ 4.6 จากรูปพบว่า การให้ความต่างศักย์ขณะฉายแสงไปพร้อมกันจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อให้ความต่างศักย์ขณะไม่ฉายแสงไปพร้อมกันพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ศูนย์ถึงแม้จะเพิ่มความต่างศักย์ไปก็ตาม แล้วการวัดของขั้วแต่ละขั้วที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นตั้งแต่ 15, 30 ถึง 45 มิลลิโมลาร์ ทำให้มีพื้นที่ผิวหรือพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้ได้กระแสที่เพิ่มมากขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นที่ 60 มิลลิโมลาร์ ก็มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นนี้ทำให้ระยะห่างระหว่างแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แต่ละแท่งชิดกันมากเพราะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดทำให้สารละลายไม่สามารถซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวบริเวณแท่งได้ส่งผลให้มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาน้อยทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไม่เพิ่มสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อให้ความต่างศักย์โดยฉายแสงและไม่ฉายแสง

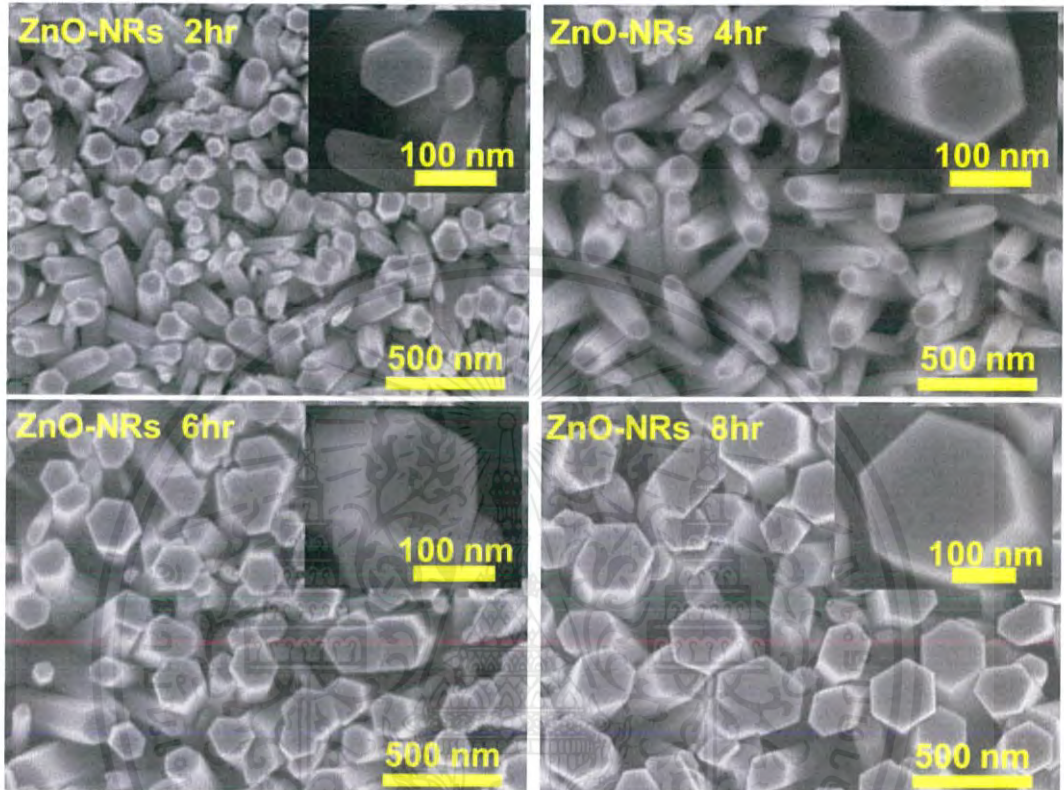
#### 4.2 การศึกษาอิทธิพลของเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในการทดลองที่ 4.1 พบว่าการที่ใช้สารตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 45 มิลลิโมลาร์ เพื่อมาประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง พบว่าที่ความเข้มข้นนี้ได้กระแสไฟฟ้าสูงที่สุดซึ่งสามารถบอกได้ว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดีที่สุด จากนั้นได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยใช้เวลาในการไฮโดรเทอร์มอลที่เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งกำหนดความเข้มข้นที่ใช้คือ 45 มิลลิโมลาร์ เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพโดยดูได้จากความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ขึ้นกับเวลา

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope; FE-SEM) โดยแสดงดังภาพที่ 4.7 โดยภาพลักษณะพื้นผิวที่มองจากด้านบนพบว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นท่อนเกลียวแบบเฮกซะโกนอล และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ทำการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่เวลาในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการปลูกมากขึ้นไป เส้นผ่าศูนย์กลางก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดเฉลี่ยของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถหรือได้จากฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gauss distribution) [30] ต่อมาก็ทำการตรวจสอบลักษณะความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยแสดงดังภาพที่ 4.8 โดยพบว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะแท่งที่ตั้งตรงและไม่พบข้อบกพร่องบริเวณรอยต่อ เช่น ช่องว่าง การล้มของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

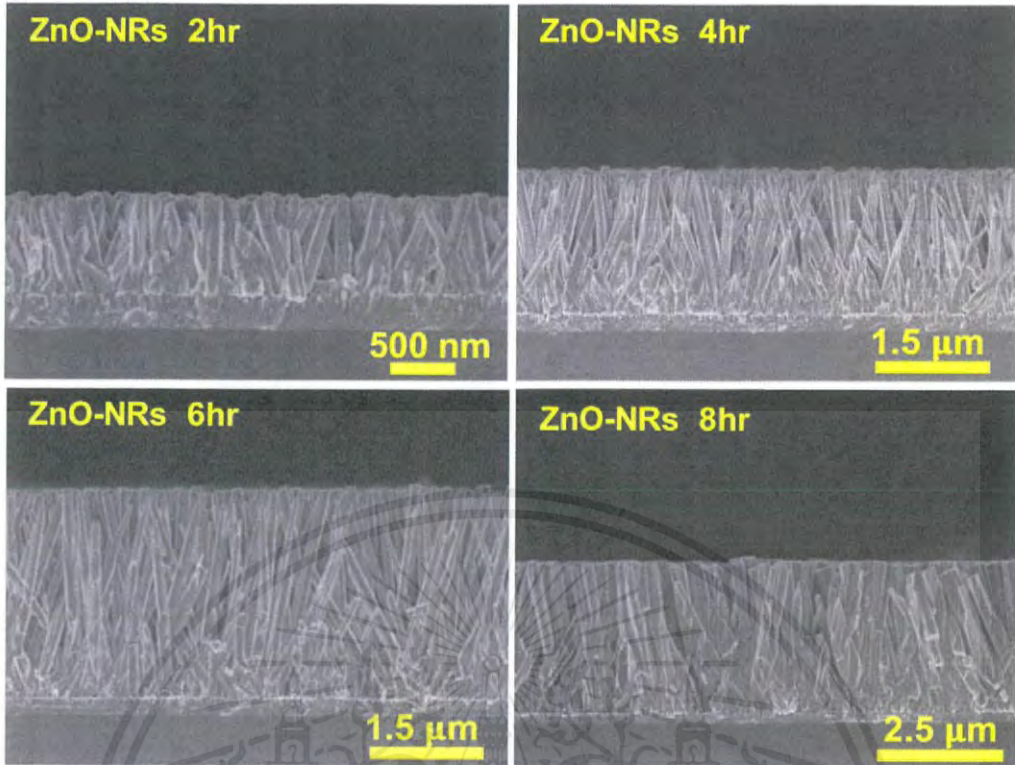
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการพบโครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่เฮกซะโกนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มเวลาในการปลูกให้นานมากขึ้นยิ่งก็พบว่าความสูงก็เพิ่มสูงตามเวลาในการปลูกที่นานขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มเวลาในการไฮโดรเทอร์มอลลิ่งจะทำให้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มากขึ้นดังภาพที่ 4.9

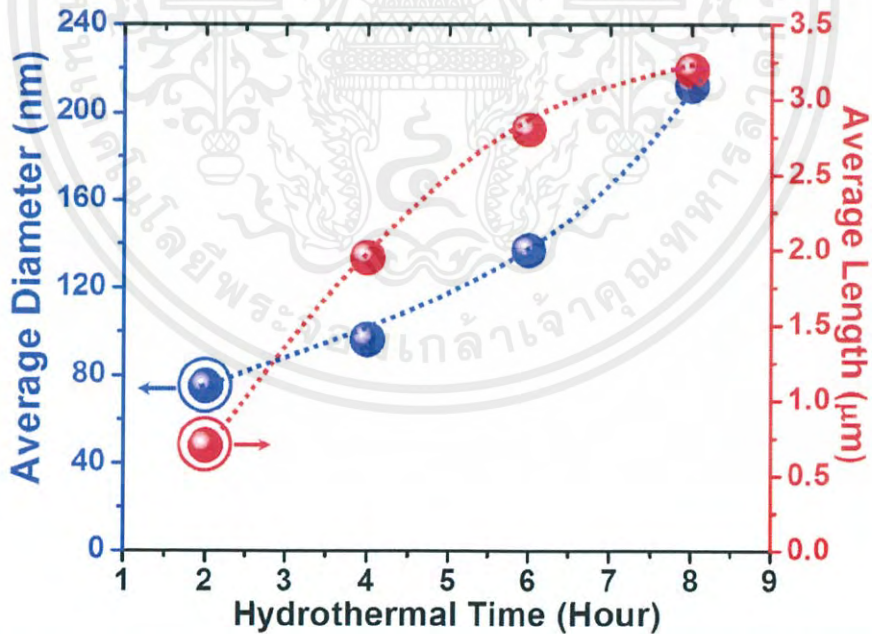


ภาพที่ 4.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกด้วยความเข้มข้น 45 มิลลิโมลาร์โดยใช้เวลาในการปลูกแตกต่างกันคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



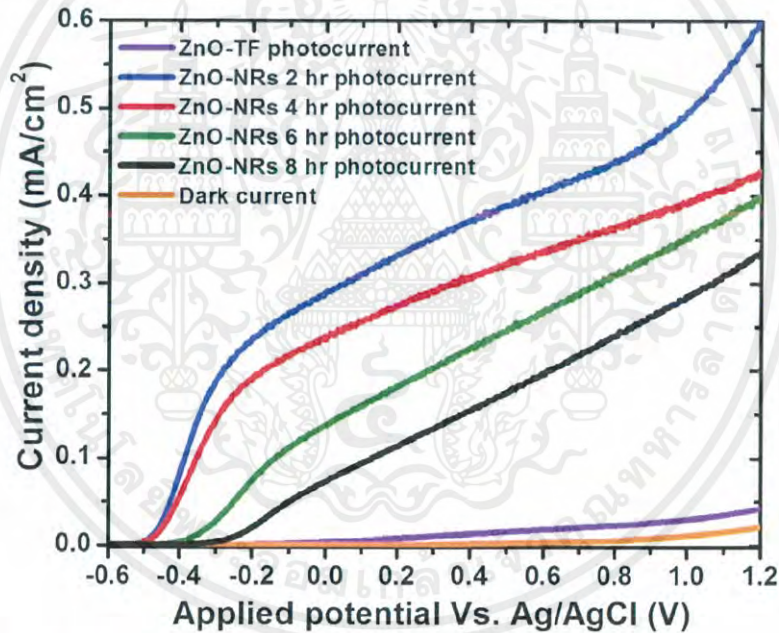
ภาพที่ 4.8 ลักษณะทางความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกโดยใช้เวลาในการปลูกแตกต่างกัน คือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความสูงเฉลี่ยของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

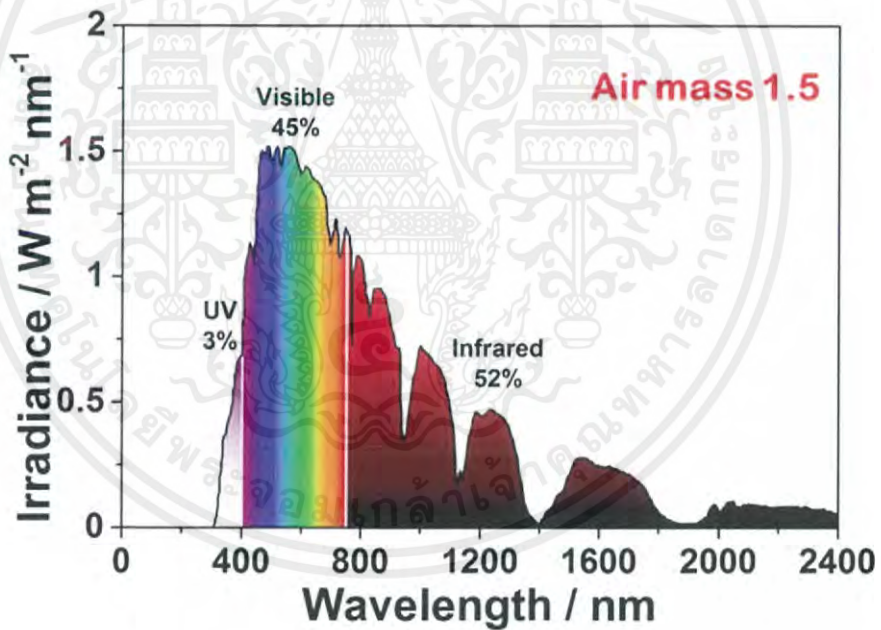
หลังจากนั้นได้นำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไฮโดรเทอร์มอลที่ความเข้มข้นเดียวกันแต่เวลาแตกต่างกันมาทำการประกอบเป็นขั้วไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง เพื่อใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยในการวัดกระแสไฟฟ้าโดยให้ความต่างศักย์ตั้งแต่  $-0.6$  ถึง  $1.2$  โวลต์ พร้อมฉายแสงและไม่ฉายแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ดังภาพที่ 4.10 โดยจากรูปพบว่า การให้ความต่างศักย์ขณะฉายแสงไปพร้อมกันจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อให้ความต่างศักย์ขณะไม่ฉายแสงไปพร้อมกันพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ศูนย์ถึงแม้จะเพิ่มความต่างศักย์ไปก็ตาม จากการวัดของขั้วแต่ละขั้วที่ใช้เวลาในการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่างกัน พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มขึ้น คือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ทำให้มีพื้นที่ผิวหรือพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแต่กลับทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่ลดลงตามลำดับ แต่กับมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ลดลงตามลำดับของเวลาในการปลูก เนื่องจากการเพิ่มเวลาขึ้นไปเรื่อยๆ นี้ ทำให้ระยะห่างระหว่างแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แต่ละแท่งชิดกันมากขึ้นเพราะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดทำให้สารละลายไม่สามารถซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวบริเวณแท่งได้ส่งผลให้มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาน้อยทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นหรือตามเวลาในการปลูกที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อให้ความต่างศักย์โดยฉายแสงและไม่ฉายแสง

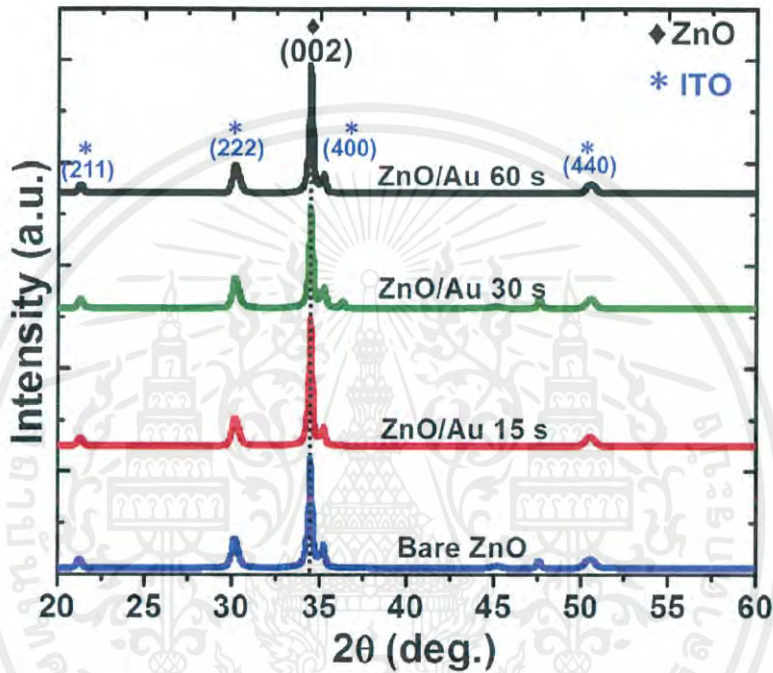
#### 4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้โครงสร้างแท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนทอง

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและเวลาในกระบวนการทำไฮโดรเทอร์มอล เพื่อหาความเข้มข้นและเวลาที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าแอโนด สำหรับผลิตก๊าซไฮโดรเจน ด้วยกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง พบว่าการที่ใช้ซิงค์ออกไซด์มาทำขั้วไฟฟ้าแอโนดจะทำให้ได้ประสิทธิภาพไม่มากพอ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีแถบช่องว่างที่กว้าง มีพลังงานสูงทำให้การดูดกลืนแสงไปตรงกับช่วงยูวี ซึ่งจากภาพที่ 4.11 แสดงช่วงแสงที่ได้ดวงอาทิตย์ จะพบว่าในช่วงยูวีเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแอโนดได้นั้นจำเป็นต้องต้องดูดกลืนแสงได้มากขึ้น หรือสามารถที่จะดูดกลืนแสงในช่วงอื่นได้ ดังนั้นอนุภาคนาโนทองจึงตรงจุดประสงค์เนื่องอนุภาคนาโนทอง เมื่ออยู่ในระดับนาโนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ localized surface plasmon resonance (LSPR) ซึ่งจะทำให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ โดยในการทดลองนี้จะทำการสปีดเตอริงอนุภาคนาโนทองลงไปติดอยู่บนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอริงต่างกัน คือ 15, 30 และ 60 วินาที เพื่อศึกษาการใช้อนุภาคนาโนทอง การช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน



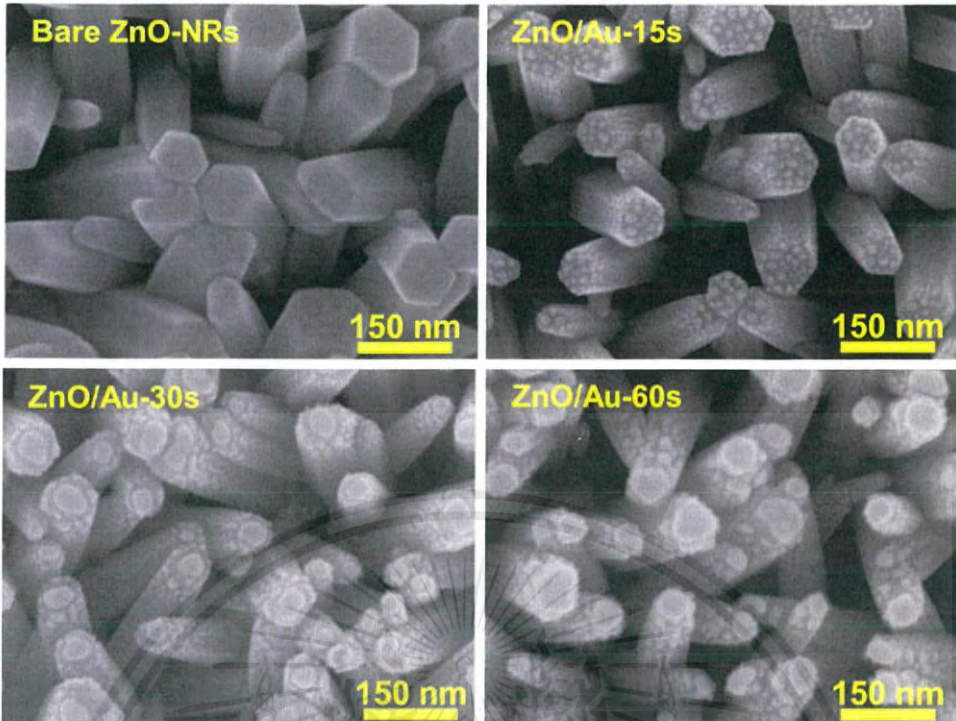
ภาพที่ 4.11 ช่วงสเปกตรัมของแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar spectrum) [33]

จากการศึกษาธรรมชาติของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการสปีดเตอริงของอนุภาคนาโนทอง สามารถเห็นได้จากภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอริงแตกต่างกันได้ดังภาพที่ 4.12 โดยจากภาพสามารถสังเกตเห็นได้ว่าทุกความเข้มชั้นที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $34.7$  องศา ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ในระนาบ (002) โดยจะสามารถบอกได้ว่าเป็นผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และมีโครงสร้างแบบเวิร์ตไซด์ (Wurtzite) ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDS รหัส 36-1451 และไม่ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทอง

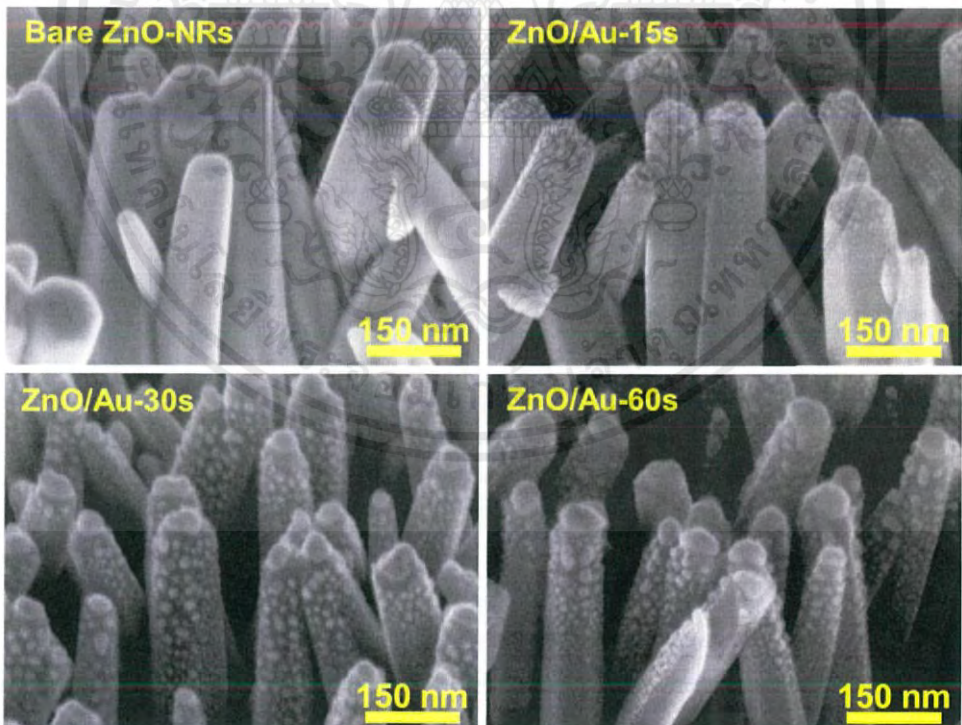


ภาพที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองที่เวลาแตกต่างกัน

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope; FE-SEM) โดยแสดงดังภาพที่ 4.13 โดยภาพลักษณะพื้นผิวที่มองจากด้านบนจะช่วยให้ยืนยันได้ว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นท่อนแบบเฮกซะโกนอล ที่มีอนุภาคนาโนทองที่สปีดเตอริงลงไปติดบนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนทองมีขนาดอยู่ในระดับนาโนจริง โดยจากภาพที่ 4.14 แสดงภาพที่มองในแนวเฉียง  $45$  องศา จะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองกระจายตัวอยู่ตรงบริเวณส่วนยอดของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ และจากภาพที่ 4.15 แสดงกราฟวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) ของอนุภาคนาโนทอง โดยสรุปได้ว่าพอใช้เวลาในการสปีดเตอริงทองเพิ่มมากขึ้นก็ทำให้ปริมาณทองเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

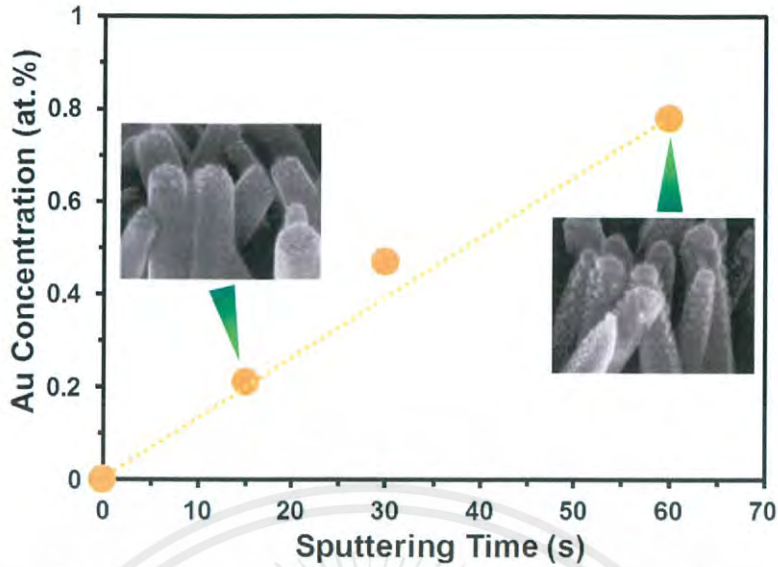


ภาพที่ 4.13 ภาพลักษณะพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สputtering อนุภาคนาโนทองที่เวลาต่างกัน



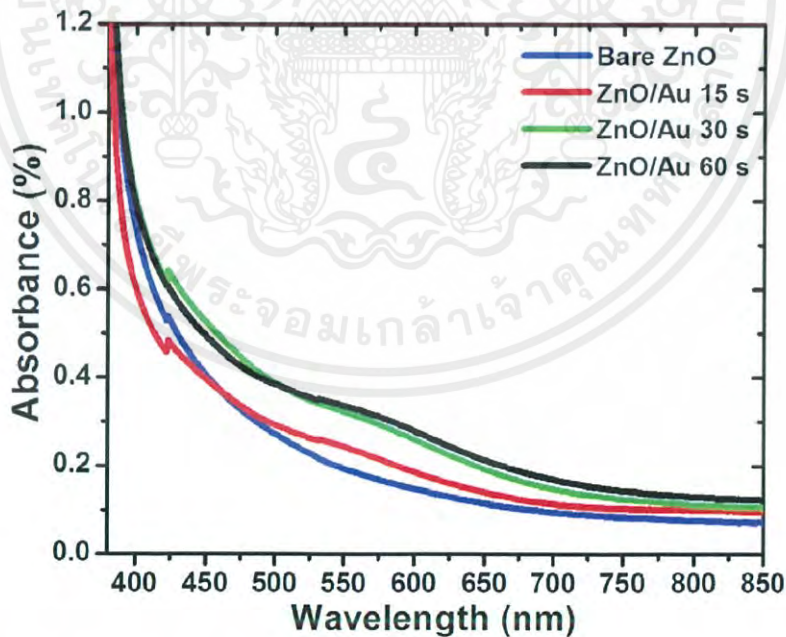
ภาพที่ 4.14 ภาพลักษณะพื้นผิวที่มองจากมุม 45 องศาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สputtering อนุภาคนาโนทองที่เวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงปริมาณอนุภาคนาโนทองที่สputtering ที่เวลาต่างกันที่วิเคราะห์จาก EDS

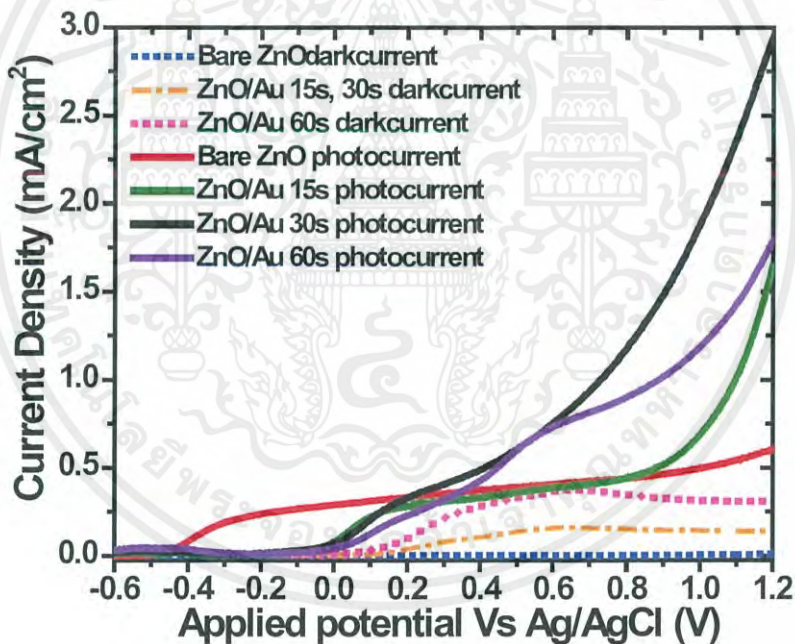
จากการศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล (UV-Visible spectroscopy) ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ถูกตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนทองโดยแสดงการดูดกลืนแสงดังภาพที่ 4.16 โดยจะพบว่าในช่วงคลื่นแสง 400-700 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคนาโนทองมากขึ้น ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดปรากฏการณ์ LSPR ทำให้สามารถที่จะดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้



ภาพที่ 4.16 การดูดกลืนแสงของซิงค์ไฟฟ้าแอโนดที่มีปริมาณอนุภาคนาโนทองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นได้นำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ถูกตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนทองด้วยเวลาในการสปีดเตอริงแตกต่างกันมาประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อใช้ในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง เพื่อใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยในการวัดกระแสไฟฟ้าโดยให้ความต่างศักย์ตั้งแต่  $-0.6$  ถึง  $1.2$  โวลต์ พร้อมฉายแสงและไม่ฉายแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ตั้งภาพที่ 4.17 โดยจากกราฟพบว่า การให้ความต่างศักย์ขณะฉายแสงไปพร้อมกันจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อให้ความต่างศักย์ขณะไม่ฉายแสงไปพร้อมกันพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ถูกตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนทองอยู่ที่ศูนย์แม้จะเพิ่มความต่างศักย์ไปก็ตาม แต่เมื่อแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ถูกตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนทองที่เวลาในการสปีดเตอริง 15 และ 30 วินาที ช่วงที่วัดแบบไม่ฉายแสงมีค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงตั้งแต่  $0.2$  ถึง  $1.2$  โวลต์ แต่เมื่อฉายแสงที่พบว่าเวลาการสปีดเตอริงอนุภาคนาโนทองที่ 15 วินาที ได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับที่ไม่มีการสปีดเตอริงของอนุภาคนาโนทอง แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการสปีดเตอริงทองเข้าไปที่ 30 วินาที พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาการสปีดเตอริงขึ้นเป็น 60 วินาที พบว่าค่ากระแสที่ได้ลดลงจากที่เวลาสปีดเตอริง 30 วินาที เกิดขึ้นเนื่องจากคาร์บอนที่อนุภาคนาโนทองมากเกินไปทำให้ไปปิดบริเวณรับแสงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ทำให้ดูดกลืนแสงได้ลดลงส่งผลให้ค่ากระแสที่วัดได้ลดลง



ภาพที่ 4.17 ค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อให้ความต่างศักย์โดยฉายแสงและไม่ฉายแสงของขั้วไฟฟ้าเมื่อตกแต่งแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยอนุภาคนาโนทองด้วยการสปีดเตอริงที่เวลาต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยที่มีเม็ดผลึกของซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเหยื่อล่อ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง โดยศึกษาถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ จากการควบคุมตัวแปรความเข้มข้นของสารตั้งต้นและเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ความเข้มข้น 15, 30, 45 และ 60 มิลลิโมลาร์ จากนั้นจะศึกษาถึงผลกระทบของเวลาที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง เพื่อศึกษาลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยผลที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นและเวลาที่ใช้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่มีผลึกแบบเฮกซะโกนอล โครงสร้างแบบเวิร์ตไซด์โดยสามารถยืนยันได้จากผลที่วัดจาก XRD โดยพบพีคที่ระนาบ (002) ที่  $2\theta$  เท่ากับ  $34.7$  องศา

2. ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณ  $Zn^{2+}$  และ  $OH^-$  ที่เพิ่มขึ้น

3. การประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่งที่เงื่อนไขความเข้มข้นที่ใช้แตกต่างกัน พบว่าเมื่อไม่ฉายแสงจะไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้า แต่เมื่อฉายแสงพบว่าที่ความเข้มข้น 45 มิลลิโมลาร์ ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดถึง  $0.36$  มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์  $0.8$  โวลต์

4. การเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าการใช้เวลาในการปลูกเพิ่มขึ้นทำให้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น

5. การประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่งที่เงื่อนไขความเข้มข้นที่ 45 มิลลิโมลาร์ ที่เวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน พบว่าเมื่อไม่ฉายแสงจะไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้า แต่เมื่อฉายแสงพบว่าที่เวลา 2 ชั่วโมง ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดถึง  $0.44$  มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์  $0.8$  โวลต์

และงานวิจัยนี้ยังต่อยอดไปถึงการใช้อนุภาคนาโนทองเพื่อมาตกแต่งที่แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง โดยจะศึกษาถึงเวลาในการสปีดเตอริงอนุภาคนาโนทองแตกต่างกันและพบว่าเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดพบว่าเมื่อใช้เวลาในการสปีดเตอริงที่ 30 วินาที ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาสปีดเตอริงอื่นๆ เท่ากับ  $1.16$  มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์  $0.8$  โวลต์

## 5.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ

- 5.1.1 ศึกษาการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิ
- 5.1.2 ศึกษาการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เกิดจากอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-เบส
- 5.1.3 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองเพื่อตกแต่งบนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อให้อนุภาคนาโนทองกระจายตัวทั่วแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์



## บรรณานุกรม

- [1] Fang X., et al. (2015). Au nanoparticle decorated  $\text{WO}_3$  photoelectrode for enhanced photoelectrochemical properties. *RSC Adv.*, 5, 60339–60344.
- [2] Yu-Kuei H., Ying-Chu C., and Yan-Gu L. Novel ZnO/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Core-Shell Nanowires for Photoelectrochemical Water Splitting. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7 (25), 14157–14162.
- [3] Christopher D. B., et al. (2012). Effect of Tin Doping on  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  Photoanodes for Water Splitting. *J. Phys. Chem. C*, 116 (29), 15290–15296.
- [4] Songmei S., et al. (2014). Solar Light Driven Pure Water Splitting on Quantum Sized  $\text{BiVO}_4$  without any Cocatalyst. *ACS Catal.*, 4 (10), 3498–3503.
- [5] Gongming W., et al. (2011). Hydrogen-Treated  $\text{TiO}_2$  Nanowire Arrays for Photoelectrochemical Water Splitting. *Nano Lett.*, 11 (7), 3026–3033.
- [6] Xing Z., Yang L., and Zhenhui K. (2014). 3D Branched ZnO Nanowire Arrays Decorated with Plasmonic Au Nanoparticles for High-Performance Photoelectrochemical Water Splitting. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6, 4480–4489.
- [7] Yichong L. et al. (2016). Synergistic Effect of Surface Plasmonic particles and Surface Passivation layer on ZnO Nanorods Array for Improved Photoelectrochemical Water Splitting. *Scientific Reports*, 6(29907), 1-7.
- [8] Xu Y., et al. (2016). High Visible Photoelectrochemical Activity of Ag Nanoparticle-Sandwiched CdS/Ag/ZnO Nanorods. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 658–667.
- [9] M. A. Thomas and J. B. Cui., (2010). Electrochemical Route to p-Type Doping of ZnO Nanowires. *J. Phys. Chem. Lett.*, 1, 1090–1094.
- [10] Benoit C., et al. (2012). P-Type Nitrogen-Doped ZnO Nanoparticles Stable under Ambient Conditions. *J. Am. Chem. Soc.*, 134 (1), 464–470.
- [11] Cheng-Liang H., et al. (2017). Tunable UV- and Visible-Light Photoresponse Based on p-ZnO Nanostructures/n-ZnO/Glass Peppered with Au Nanoparticles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 14935–14944
- [12] e-books (Electronic) Chiang Mai University. **ทฤษฎีพลังงาน**. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.thailandenergyeducation.com/assets/media/A005.pdf>

- [13] สรัญญา พันธุ์ฤกษ์. 2557. การผลิตไบโอไฮโดรเจนของจุลสาหร่ายที่แยกได้จากนาข้าวของประเทศไทย. วิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] Scott C. W. and Elijah T. (2012). Plasmonic solar water splitting. *Energy Environ. Sci.*, 5, 5133–5146.
- [15] Zhang S., et al. (2017). A facile fabrication of high-quality Si/Cu<sub>2</sub>O nanowire arrays for photoelectrochemical water splitting. *Mater. Lett.*, 197, 131-134.
- [16] New Directions. Zinc Oxide. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://shop.newdirections.com.au/1-kg-Zinc-Oxide>
- [17] Pijus Kanti S. (2017). Review on Wet Chemical Growth and Anti-bacterial Activity of Zinc Oxide Nanostructures. *J Tissue Sci Eng*, 8(1). 1-4.
- [18] พัฒนา เทพชโลธร. 2548. การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบรีแอคทีฟ. วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี, วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ภูสุภา เพ็ชรแบน. 2558. การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน, วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] สรพงษ์ ภาสุปรี และคณะ. 2555. การเตรียมและสมบัติการผลิต H<sub>2</sub> ของท่อนาโนจากผงสีขาว TiO<sub>2</sub> ราคาถูกด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นเองในประเทศ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [21] Wenbo H. and Stephen B. C. (2012). A Review of Surface Plasmon Resonance-Enhanced Photocatalysis. *Adv. Funct. Mater.*
- [22] Apiwat C. (2013). Gold Nanostructures: Synthesis and Applications for Cancer Therapy. *KKU Sci. J.*, 41(4), 859-872.
- [23] Scott A Speakman. Basics of X-Ray Powder Diffraction. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://prism.mit.edu/xray/oldsite/Basics20of20XRay%20Powder%20Diffraction.pdf>.
- [24] Institute for Nuclear and Radiation Physics. X-RAY DIFFRACTION (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] นราธร เขมะศิริ. (2557). การเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ในไตรด์ โดยระบบ อาร์เอฟ แมคนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้งาน. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี, วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] Brandon University. Scanning Electron Microscope. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://www.brandonu.ca/microscope/micro-analytical-facilities/scanning-electron-microscope/>
- [27] Yu-Kuei Hsu, Yan-Gu Lin and Ying-Chu Chen. (2011). Polarity-dependent photoelectrochemical activity in ZnO nanostructures for solar water splitting. *Electrochemistry Communications*, 13, 1383–1386.
- [28] Yaping Hu, et al. (2015). Large-scale patterned ZnO nanorod arrays for efficient photoelectrochemical water splitting. *Applied Surface Science*, 339, 122–127.
- [29] Linxia F. (2014). Controllable synthesis of ZnO hierarchical architectures and their photocatalytic property. *Superlattices and Microstructures*, 75, 324–333.
- [30] Christian Walck. (2007). *Hand-book on STATISTICAL DISTRIBUTIONS for experimentalists*. University of Stockholm.
- [31] Solis-Pomar., et al. (2011). Growth of vertically aligned ZnO nanorods using textured ZnO films. *Nanoscale Research Letters*, 6:524.
- [32] Panita K., et al. (2014). Morphology- controller seed-assisted hydrothermal ZnO nanowires via critical concentration for nucleation and their photoluminescence properties. *Phys. Status Solidi A*, 1-7.
- [33] Hiroaki T. and Qiliang J. (2016). First-Transition Metal Oxocomplex–Surface-Modified Titanium(IV) Oxide for Solar Environmental Purification. *Advanced Catalytic Materials*.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ประภากร รัตนวารินทร์ชัย
วัด เดือน ปีเกิด	5 กุมภาพันธ์ 2538
ที่อยู่	7-8 หมู่ 1 ตำบลวิหารแดง อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี 18150
ประวัติการศึกษา	<ul style="list-style-type: none"><li>- ระดับประถมศึกษา โรงเรียนมาลาสารรรค์พิทยา จังหวัดนครนายก</li><li>- ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมาลาสารรรค์พิทยา จังหวัดนครนายก</li><li>- ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ นาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร</li></ul>
ประสบการณ์ทำงานวิจัย	<ul style="list-style-type: none"><li>- สิทธิบัตรในหัวข้อ “Polymeric Selective Membranes for non-enzymatic detection of urea and organic compounds” เลขที่คำขอ 1501000653 ปี พ.ศ. 2558</li><li>- เข้าร่วมค่าย ASEAN Synchrotron science ครั้งที่ 5 ปี พ.ศ. 2559</li><li>- ผลงานตีพิมพ์ เรื่อง Electrochemical sensor: preparation technique based on electronic tongue in fragranceวารสาร Materials Today: Proceeding ปี พ.ศ. 2560</li></ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้