

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า



ปริญญานิพนธ์
ของ
สุภาวดี โภคัย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2559

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

ธันวาคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

ธันวาคม 2559

สุภาวดี โภคัย. (2559). การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า. ปริญญาานิพนธ์ กศ.ม (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ:
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์:
ดร. ภูณิศรา ลิ้มนนทกุล

งานวิจัยนี้ ทำการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงชนิดชั้นล่อผลึก ความหนาชั้นล่อผลึก ความเข้มข้นสารตั้งต้น และเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยทำการควบคุมความดันและอุณหภูมิคงที่ที่ 90 องศาเซลเซียส จากนั้น ศึกษาผลกระทบของแต่ละเงื่อนไขที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) จากผลการวิเคราะห์ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่ขนาดความสูงกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนั้น แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์ไฟฟ้าในการตรวจวัดปริมาณกลูโคส โดยทำการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าทองเปลวและขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ เมื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตรวจวัดปริมาณกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์บนขั้วไฟฟ้าทองที่ไม่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ให้การตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสเป็น $11.55 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ซึ่งสูงกว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์บนขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ ซึ่งได้ค่าเพียง $4.15 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ในขณะที่ ขั้วไฟฟ้าทองที่ไม่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสเป็น $3.46 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ดังนั้น แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณกลูโคสได้มากขึ้น

SYNTHESIS OF ZnO NANORODS BY HYDROTHERMAL PROCESS FOR ENHANCE
EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL SENSORS



AN ABSTRACT
BY
SUPAWADEE POKAI

Presented in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Master of Education Degree in Physics
At Srinakharinwirot University
November 2016

Supawadee Pokai. (2559). *Synthesis of ZnO Nanorods by Hydrothermal Process for Enhance Efficiency of Electrochemical Sensors*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr. Puenisara Limnonthakul.

In this report, we fabricated zinc oxide (ZnO) nanorods (NRs) via the hydrothermal method with various types of seed layer, ZnO seed layer thickness, precursor concentration and growth time at 90°C for 6 hour. On the prepared ZnO NRs samples, the morphologies were examined by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The results show that the diameter and length of ZnO NRs increases linearly with the increase precursor concentration and growth time. Furthermore, while the ZnO seed layer increases, the diameter of ZnO NRs increases, the length of NRs significant decrease.

The application of ZnO NRs for enhance performance of electrochemical sensor. The ZnO NRs were fabricated on different Au electrode (Au blank electrode and ZnO seed layer / Au blank electrode) for glucose biosensor. All of the Au electrodes were characterized by cyclic voltammetry. We found that, the ZnO NRs on Au blank electrode and ZnO NRs on ZnO seed layer / Au blank electrode can detect glucose 11.55 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ - mM and 4.15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ - mM, respectively. Whereas, the Au blank electrode can detect only 3.46 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ - mM. The ZnO NRs have unique advantages including the high surface area for immobilization GOx. Furthermore, the ZnO NRs clearly had a major role in preventing the coalescence of GOx on electrode.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์

ทางเคมีไฟฟ้า

ของ

สุภาวดี โภคัย

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2559

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษา

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร. ภูนิศรา ลิ้มนนทกุล)

(อาจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มติ ห่อประทุม)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ภูนิศรา ลิ้มนนทกุล)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนของบัณฑิตวิทยาลัย ประเภททุนการศึกษาเพื่อทำวิทยานิพนธ์

จาก

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ภูนิศรา ลิ้มนนทกุล ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา คอยอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ คอยช่วยเหลือและชี้แนะทางการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาในการทำ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ ดร. มติ ห่อประทุม ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบปากเปล่า ตลอดจน คอยอบรมสั่งสอนเกี่ยวกับหลักการทำงานวิจัย คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและชี้แนะ ทางการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาที่ดำเนินปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. โชคชัย พุทธิรักษา ที่ให้เกียรติเป็นประธานในการสอบปากเปล่า และให้คำแนะนำเกี่ยวกับปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ดร. พงศ์พันธ์ จินดาอุดม หัวหน้าห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณนักวิจัยภายในห้องวิจัยแห่งนี้ ได้แก่ คุณวิยะพล พัฒนะเศรษฐกุล ดร. พัทธชัย เอี่ยมชัย ดร. นพดล นันทวงศ์ และคุณศักรย์ศรณ์ ลิ้มวิเชียร ที่คอยให้ คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณน้องๆ เพื่อนๆ และพี่ๆ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และจากต่างสถาบันทุกๆ ท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยแนะนำ และให้กำลังใจที่ดีตลอดระยะเวลาที่ทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ ที่คอยอบรมและให้ความรู้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาวและพี่ชาย ที่คอยให้ความกรุณาทางด้านทุนทรัพย์ คอยสนับสนุน และให้กำลังใจที่ดีตลอดมา คุณค่าและประโยชน์อันใดที่ได้รับจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ย่อมเป็นผล จากความกรุณาและเมตตาจากทุกท่านที่กล่าวมา

สุภาวดี โกศัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย	3
สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
2 ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับซิงค์ออกไซด์.....	5
ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	5
โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์.....	6
โครงสร้างระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์.....	7
การสังเคราะห์แผ่นนาโนซิงค์ออกไซด์.....	8
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	9
ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดแผ่นนาโนซิงค์ออกไซด์.....	10
กลไกการเกิดแผ่นนาโนซิงค์ออกไซด์.....	11
เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า.....	15
ส่วนประกอบของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า.....	15
เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า.....	16
อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรี.....	18
หลักการทำงานของเทคนิคโวลแทมเมตรี.....	21
การตรวจวัดปริมาณกลูโคส.....	24
หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	26
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)	26

*

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	29
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34
สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	34
ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	35
4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	46
การศึกษาอิทธิพลของชั้นล่อผลึกที่มีต่อการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	46
ผลการศึกษาชนิดของชั้นล่อผลึกทอง (Au seed layer) และชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (ZnO seed layer) ที่มีต่อลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	46
ผลการศึกษาความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	50
การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	57
ผลการศึกษาความเข้มข้นสารตั้งต้นที่มีต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	58
ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่มีต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์..... *	62
การทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวิเคราะห์สารชีวภาพ.....	67
การทดสอบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าใช้งานก่อนนำไปทดสอบกับกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	71

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
อิทธิพลของชนิดและความหนาชั้นล่อนล็กที่มีต่อการสังเคราะห์แก่งนาโน ซิงค์ออกไซด์.....	79
อิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์แก่งนาโน ซิงค์ออกไซด์.....	79
การเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าของแก่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวัด ปริมาณกลูโคส.....	80
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย.....	80
บรรณานุกรม.....	82
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	85

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	6
2 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า.....	16
3 เงื่อนไขในการทำความสะดวกแผ่นรองรับซิลิกอนด้วยพลาสมา.....	36
4 เงื่อนไขในการเคลือบโครเมียม.....	37
5 เงื่อนไขในการเคลือบทอง.....	37
6 เงื่อนไขในการเคลือบชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าทอง.....	39
7 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดชั้นล่อผลึก.....	41
8 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นล่อผลึก.....	42
9 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาสำหรับการสังเคราะห์.....	42
10 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น.....	43
11 เงื่อนไขการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	44
12 ปริมาณสารเคมีที่ใช้สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	45
13 เงื่อนไขการตรวจวัดด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	45
14 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าชนิดชั้นล่อผลึกเป็นชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และทอง ตามลำดับ.....	48
15 ขนาดความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง และเกรนเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์.....	52
16 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์.....	55
17 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้น.....	60
18 ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์.....	65

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แบบจำลองชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์	4
2 แบบจำลองเอนไซม์	4
3 (ก) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์	
(ข) ระบายโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์.....	7
4 ส่วนประกอบหลักของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	10
5 แบบจำลองการตกผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	11
6 รอยเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคของของแข็งกับของเหลว.....	12
7 พลังงานอิสระรวมที่เปลี่ยนแปลงในระบบของของแข็งที่เป็นทรงกลมกับรัศมีวิกฤติ ของนิวเคลียสผลึกหรืออนุภาค.....	13
8 ส่วนประกอบของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า.....	15
9 หลักการทำงานของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า.....	16
10 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรีที่ต่อเข้ากับ เครื่องโพเทนชิโอสแตท.....	18
11 เครื่องโพเทนชิโอสแตท.....	20
12 หลักการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตท.....	21
13 ลักษณะสัญญาณกระตุ้นในโวลแทมเมตรี	
(ก) รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบลิเนียร์-สแกน	
(ข) รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์	
(ค) รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบสามเหลี่ยม.....	22
14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	23
15 สูตรโครงสร้างกลูโคส.....	24
16 การตรึงเอนไซม์แบบดูดซับ.....	25
17 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสต่อกลูโคส.....	26
18 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	27
19 ผลของอัตราการสลายตัวของอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนในอะตอมสาร.....	28
20 หลักการของเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์.....	30

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	31
22 เครื่องสเปกโตรริงรุ่น AJA INTERNATIONAL, ATC 2000 - F	36
23 ลักษณะข้อผิดพลาดของการเคลือบด้วยกระบวนการสเปกโตรริง.....	38
24 การเตรียมข้อผิดพลาดของการเคลือบชั้นล่องลึกซิงค์ออกไซด์.....	38
25 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมรุ่น SPA 400.....	37
26 กระบวนการสังเคราะห์แผ่นนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล	
(ก) การเตรียมสารละลาย	
(ข) การเตรียมชิ้นงานเป็นแผ่นรองรับ	
(ค) การอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 °C และ	
(ง) การทำความสะอาดชิ้นงาน.....	40
27 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAX III	43
28 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น 4700	44
29 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ	
ภาคตัดขวาง (cross - section) และพื้นผิว (surface) ของแผ่นนาโนซิงค์ออกไซด์	
ซึ่งถูกสังเคราะห์บนชั้นล่องลึก (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) ทอง ภายใต้เงื่อนไขความ	
เข้มข้นของสารตั้งต้น 10 mM เวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ 6 h ที่อุณหภูมิ 90 °C	47
30 แบบจำลองอิทธิพลของ	
(ก) ชั้นล่องลึกซิงค์ออกไซด์	
(ข) ชั้นล่องลึกของตัวลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นนาโนซิงค์ออกไซด์	49
31 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชั้นล่องลึกซิงค์ออกไซด์เมื่อความหนาเป็น	
10, 20, 30 และ 40 nm ตามลำดับ.....	51
32 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมแสดงลักษณะพื้นผิวชั้นล่องลึก	
ซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีความหนาเป็น (ก) 10 nm (ข) 20 nm (ค) 30 nm และ(ง) 40 nm	53

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
33 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ภาคตัดขวาง และพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารตั้งต้น 10 mM เวลาที่ใช้สำหรับ สังเคราะห์ 6 h ที่อุณหภูมิ 90 °C เมื่อความหนาชั้นล่องผลึกซิงค์ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 nm ตามลำดับ.....	54
34 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง (ข) ความหนาแน่น แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และอัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง และ (ค) พื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์กับความหนาชั้นล่อง ผลึกซิงค์ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 nm.....	56
35 แบบจำลองอิทธิพลของความหนาชั้นล่องผลึกซิงค์ออกไซด์ต่อลักษณะทางกายภาพ ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	57
36 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ มีการแปรค่าเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10, 20, และ 30 mM ตามลำดับ.....	58
37 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ภาคตัดขวางและพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล ภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ 6 h ที่อุณหภูมิ 90 °C เมื่อแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 mM ตามลำดับ.....	59
38 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง และ (ข) ความ หนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับการแปรค่าความเข้มข้น สารตั้งต้นเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 mM ตามลำดับ.....	61
39 แบบจำลองอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นต่อลักษณะทางกายภาพของ แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	62
40 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ มีการแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 30 min, 2, 4 และ 6 h ตามลำดับ.....	63

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 41 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ
ภาคตัดขวางและพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ
ไฮโดรเทอร์มอล ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10 mM อุณหภูมิ 90 °C
และแปรค่าเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เป็น 30 min (0.5 h), 2, 4 และ 6 h
ตามลำดับ..... 64
- 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง (ข) อัตราส่วน
ระหว่างขนาดความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์กับ
การเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เป็น 30 min, 2, 4 และ 6 h ตามลำดับ.... 66
- 43 โวลแทมโมแกรมของ (ก) ขั้วไฟฟ้าทองเปลว (ข) ขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึง
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และ (ค) ขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึง
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี
ในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกซยาไนต์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียม
คลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s..... 69
- 44 โวลแทมโมแกรมของ (ก) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ข) ขั้วไฟฟ้าทองที่มี
แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และ (ค) ขั้วไฟฟ้าทอง
ที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลาย
นาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่มีสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริก
ซยาไนต์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน
50 mV/s..... 70
- 45 โวลแทมโมแกรมของ (ก) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์
ออกไซด์(ข) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่ง
ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และ (ค) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออก
ไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและ
สารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายโพแทสเซียม
เพอร์ริกซยาไนต์ 5 mM ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน
50 mV/s..... 71

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
46 โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึงเอนไซม์ดีกลูโคสและสารละลายนาฟิออน ซึ่ง (ก) จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M (ข) เติมกลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ (ค) กลูโคสความเข้มข้น 20 mM อัตราเร็วสแกน 50 mV/s.....	72
47 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส.....	73
48 โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์ดีกลูโคสและสารละลายนาฟิออน (ก) จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M (ข) เติมกลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ (ค) กลูโคสความเข้มข้น 20 mM โดยให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง +1.0 V อัตราเร็วสแกน 50 mV/s.....	74
49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส	75
50 โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์ดีกลูโคสและสารละลายนาฟิออน (ก) จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M (ข) เติมกลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ (ค) กลูโคสความเข้มข้น 20 mM โดยให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง +1.0 V อัตราเร็วสแกน 50 mV/s.....	76
51 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส	77
52 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อตารางเซนติเมตรเทียบกับขั้วไฟฟ้าทองเปลว (Au blank electrode) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs/ Au blank electrode) และ ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs/ ZnO seed layer/Au blank electrode)	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณหรือปริมาณสารต่างๆ ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางเคมีเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในงานทางด้านทางการแพทย์ อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม เป็นต้น สำหรับทางด้านการแพทย์ เช่น นำไปผลิตเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและควบคุมระดับกลูโคสในเลือดของกลุ่มผู้ป่วยโรคเบาหวาน หรือใช้สำหรับค้นหาผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานในระยะเริ่มต้นซึ่งยังไม่แสดงอาการอย่างชัดเจน ทำให้สามารถทำการรักษาได้ทันทีโดยไม่ต้องรอให้มีอาการของโรคเบาหวานแสดง สำหรับทางด้านอุตสาหกรรม เช่นการนำไปผลิตเครื่องตรวจวัดระดับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำ ทั้งนี้ก็เพื่อควบคุมระดับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในเกณฑ์ที่ได้มาตรฐานตามความต้องการของโรงงานและทางด้านเกษตรกรรม เช่น การนำไปผลิตเครื่องตรวจโรคพืช ซึ่งเหมาะสำหรับเกษตรกรผู้ทำการเกษตร เพราะง่ายต่อการตรวจวิเคราะห์ และป้องกันการเกิดโรคในพืชผลทางการเกษตรได้ สำหรับอุปกรณ์เหล่านี้จะใช้เทคนิคการตรวจวัดที่เหมือนกันคือ เทคนิคโวลแทมเมตรี (voltammetry technique) ซึ่งเป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical techniques) ที่เกี่ยวข้องกับการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกไปยังเซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode: RE) ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode: CE) และ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode: WE) โดยศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน (redox reaction) และเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เช่น การตรวจวัดระดับกลูโคสในเลือดจะอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างกลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase; GOx) กับกลูโคส (glucose) ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยารีดอกซ์บริเวณขั้วไฟฟ้าใช้งาน และการไหลของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสในเลือดที่ต้องการตรวจวัด สำหรับข้อดีของการตรวจวัดโดยเทคนิคโวลแทมเมตรี คือ ราคาไม่แพง ขั้นตอนการตรวจวัดไม่ยุ่งยาก ที่สำคัญคือใช้ปริมาณสารที่ต้องการตรวจวัดน้อยและทราบผลการตรวจวัดทันที

อย่างไรก็ตาม การใช้เทคนิคโวลแทมเมตรียังมีข้อจำกัดหรือมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน เช่น ความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด อุณหภูมิ ความดัน และพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งถ้าหากควบคุมปัจจัยอื่นๆ โดยพิจารณาเฉพาะพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าใช้งาน จะพบว่าปัจจุบันอุปกรณ์เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าทั่วไปมีพื้นที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานเป็นแบบราบเรียบ (flat) ส่งผล

ให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์น้อย ประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอนจึงมีน้อย ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้น้อย จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีผู้คิดค้นและเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าใช้งานที่มีโครงสร้างระดับนาโน⁽¹⁾

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกปรับปรุงพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าใช้งานให้อยู่ในลักษณะแท่งนาโน (nanorod) เพราะนอกจากจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวแล้วยังเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอิเล็กตรอน ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาและเพิ่มประสิทธิภาพสัญญาณกระแสไฟฟ้า ทำให้ได้เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพทางด้านความไว (sensitivity) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งวัสดุที่เลือกใช้สำหรับสังเคราะห์แท่งนาโนคือซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) สูง เหมาะสำหรับจับกับสารทางชีวภาพที่มีค่าจุดไอโซอิเล็กทริกต่ำอย่างเช่น โปรตีน อีกทั้งซิงค์ออกไซด์ยังไม่มีพิษเมื่อสัมผัสกับร่างกายมนุษย์⁽²⁾ สำหรับการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) จะมีหลายวิธีให้เลือก แต่ในงานวิจัยนี้จะเลือกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal process) เพราะเป็นกระบวนการที่ง่ายสำหรับการเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ในการทดลอง อีกทั้งยังมีราคาถูกกว่าวิธีอื่น⁽³⁾ อย่างไรก็ตาม กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลก็ยังมีข้อกำหนด คือมีความยากต่อการควบคุมลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ อันประกอบด้วย ปัจจัยอื่นเนื่องจากแผ่นรองรับ⁽⁴⁾ ความหนาชั้นล่อผลึก⁽⁵⁾ อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ ความ

¹ Sadia, A; et. al. (2013). *Low temperature grown ZnO nanotubes as smart sensing electrode for the effective detection of ethanol amine chemical*. Materials Letters. 106(2013): pp(254–258).

² Zao, Y; et. al. (2010). *A rapid response time and highly sensitive Amperometric glucose biosensor based on ZnO nanorods via citric acid-assisted annealing route*. Physica E. 42(2010): pp(1830–1833)

³ D. Polsongkram; et. al. (2008). *Effect of synthesis conditions on the growth of ZnO nanorods via hydrothermal method*. Physica B. 403(2008): pp(3713– 3717).

⁴ Kyung, H. K; et. al. (2014). *Growth of Zinc Oxide Nanorods Using Various Seed Layer Annealing Temperatures and Substrate Materials*. Int. J. Electrochem. Sci. 9(2014): pp(2080– 2089).

⁵ Jaejin, S; & Sangwoo, L. (2007). *Effect of Seed Layer on the Growth of ZnO Nanorods*. J. Phys. Chem. C. 111(2007): pp596-600.

เข้มข้นของสารตั้งต้น⁽⁶⁾ เวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์⁽⁷⁾ และชนิดของชั้นล่อผลึก เป็นต้น จากปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาจะส่งผลต่อการเติบโตและลักษณะการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยทั้งนั้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ จากนั้นจะนำชิ้นงานทั้งหมดไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามลำดับ สุดท้ายเพื่อให้เกิดการนำไปประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จะถูกนำไปตรวจวัดคุณภาพในการใช้เป็นเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์โดยเทคนิคโวลแทมเมตรี

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นทองหรือชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
2. เพื่อประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารทางชีวภาพด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

1.3 ความสำคัญของงานวิจัย

สามารถประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารชีวภาพด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นทองหรือชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเวลาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (field emission scanning electron microscopy: FE-SEM)

⁶ Panita, K; et. al. (2015). *Morphology-controlled seed-assisted hydrothermal ZnO nanowires via critical concentration for nucleation and their photoluminescence properties*. Phys.Status Solidi A. 2(2015): pp394-400.

⁷ Sunandan, B; & Joydeep, D. (2009). *Effect of seeded substrates on hydrothermally grown ZnO nanorods*. J Sol-Gel Sci Technol 50(2009): pp(456–464).

3. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD)

4. นำข้อไฟฟ้าที่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ไปใช้ในการวิเคราะห์สารทางชีวภาพด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry: CV)

1.5 สมมติฐานของงานวิจัย

ข้อไฟฟ้าที่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าข้อไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

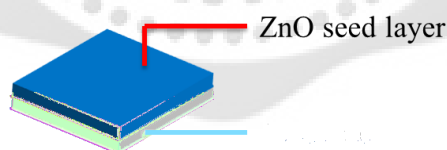
1. สามารถสังเคราะห์และควบคุมลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

2. สามารถปรับปรุงข้อไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าได้

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. แท่งนาโน คือ วัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่ง จะมีขนาดใน 2 มิติน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร และมีขนาดในอีก 1 มิติที่ยาวกว่า

2. ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (ZnO seed layer) คือ ชั้นฟิล์มบาง (thin film) ซิงค์ออกไซด์ที่เกิดจากการทับถมของอนุภาคซิงค์ออกไซด์บนแผ่นรองรับ และมีความหนาไม่เกิน 60 นาโนเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงแบบจำลองของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แบบจำลองชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์

3. เอนไซม์ (enzyme) คือ กลุ่มโปรตีน (protein) ที่ผลิตโดยเซลล์สิ่งมีชีวิต พบได้ทั้งในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงแบบจำลองของเอนไซม์ ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แบบจำลองเอนไซม์

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอถึงทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งจะเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับซิงค์ออกไซด์

2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์

2.1.2 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์

2.1.3 โครงสร้างระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์

2.2 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

2.2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

2.2.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

2.2.3 กลไกการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

2.3 เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor)

2.3.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า

2.3.2 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

2.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรี

2.3.4 หลักการทำงานของเทคนิคโวลแทมเมตรี

2.3.5 การตรวจวัดปริมาณกลูโคส

2.4 หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (field emission scanning electron microscopy: FE-SEM)

2.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD)

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับซิงค์ออกไซด์

2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นที่รู้จักในนาม คาลาไมล์ ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่สมิธโซไนต์ (smithsonite) ลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดขาว มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal closed pack: hcp) ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อถัดไป ซิงค์ออกไซด์

จัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สามารถใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (anti-bacteria) ได้ เพราะไม่มีพิษต่อร่างกาย สำหรับสมบัติทางกายภาพบางประการของซิงค์ออกไซด์แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์

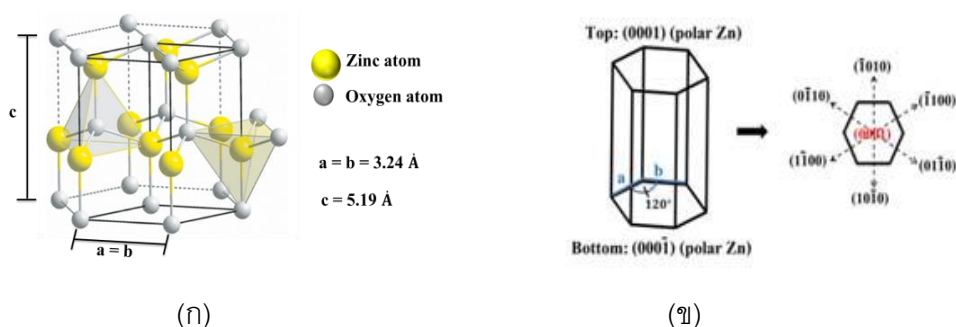
สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์	
น้ำหนักโมเลกุล	81.37 amu
ความหนาแน่น	$5.606 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
จุดหลอมเหลว	1975°C
จุดเดือด	2248°C
ความร้อนจำเพาะ	0.125 cal/g
ค่าการนำความร้อน	0.6, 1-1.2
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์	8.656
ดัชนีหักเห	2.008, 2.029
แถบช่องว่างพลังงาน	3.4 eV, (direct)
พลังงานยึดเหนี่ยว	60 meV

2.1.2 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์^(1,2)

ซิงค์ออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบเฮกซะโกนอลไคลสแพค ดังภาพประกอบ 3 (ก) โดยมีออกซิเจนไอออน (oxygen ions : O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกลางและถูกล้อมรอบด้วยซิงค์ไอออน (Zinc ions : Zn^{2+}) ทั้ง 4 ด้านในรูปทรงเตตระฮีดรอล (tetrahedral) เรียกว่าโครงสร้างเวิร์ตไซต์ (wurtzite structure) ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะมีค่าคงที่ผลึกที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เป็น $a = b = 3.24$ อังสตรอม (Å) $c = 5.19$ อังสตรอม และมีค่า $c/a = 1.602$ (มีค่าเป็น 1.633 สำหรับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลที่สมบูรณ์แบบ)

¹ นรินทร์ สิริกุลรัตน์. (2554). ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อ. หน้า 8-9.

² บัญชา อนุญสมบัติ. (2543). การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคไฟฟ้าพรกซัน. หน้า 14-15.



ภาพประกอบ 3 (ก) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์ (ข) ระบายโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide สืบค้นวันที่ 15 กรกฎาคม 2558

จากลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เป็นระเบียบ และระนาบผลึกที่แน่นอน สามารถบอกระนาบผลึกได้ด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) สำหรับผลึกระบบลูกบาศก์ ดัชนีมิลเลอร์เขียนได้เป็น (hkl) โดยที่ค่า h k และ l จะเป็นตัวเลขจำนวนเต็มส่วนกลับของจุดตัดของระนาบที่ตัดแกน x y z หรือแกนโพรมิทีฟเวกเตอร์

ส่วนกรณีซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลนั้น สามารถบอกระนาบผลึกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ 4 ตัวแปร คือ hkil หรือที่เรียกว่าดัชนีมิลเลอร์เบรเว (miller – bravais indices) โดยที่ i มีความสัมพันธ์กับดัชนี 2 ตัวแรก (h และ k) คือ $i = -(h+k)$ ยกตัวอย่างการเขียนระนาบ (hkil) เช่น ระนาบ (0001) และ (0001-bar) หรืออาจจะใส่เครื่องหมาย “ - ” เรียกว่า บาร์ สำหรับการบอกทิศทางและระนาบที่เป็นลบในระบบเฮกซะโกนอล ซึ่งระนาบ (0001) ของโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลเมื่อเทียบกับผลึกที่เป็นแบบลูกบาศก์จะหมายถึงระนาบ (001) ซึ่งเป็นระนาบที่ตัดแกน c ดังภาพประกอบ 3 (ข)

2.1.3 โครงสร้างระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์^(3,4)

โครงสร้างระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์ คือโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดของ ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใดด้านหนึ่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร หรือมีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่ออนุภาคของซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลงจนกระทั่งถึง

³ธีระพงษ์ พวงมะลิ. ม.ป.พ. นาโนฟิสิกส์. หน้า 33-39.

⁴จงดี ธรรมเขต; และ เพรศพิชญ์ คณาธารณา. (2556). วัสดุนาโนกับการพัฒนาเทคนิคการสกัดด้วยตัวดูดซับ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(2): 3.

ระดับนาโน จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์หลายอย่าง เช่น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับขนาดและพื้นที่ของ ซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวของซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในระดับนาโน จะมีพื้นที่ผิวรวม (collective surface area) และอัตราส่วนของ พื้นที่ต่อปริมาตร (surface-to-volume ratio: S/V) สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มี ขนาดใหญ่กว่า ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวน้ำวสดุซึ่งจะเกิดได้ง่ายมากขึ้น และยังเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณผิวน้ำของวัสดุอีกด้วย

โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในระดับนาโน สามารถแบ่งรูปร่างได้หลายประเภท เช่น ท่อนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanotube) คือ โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นท่อกลอง โดยมีขนาดใน 2 มิติน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร และมีขนาดในมิติที่เหลืยาวกว่า เส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanowire) เป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นเส้นลวด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งไม่เกิน 10 นาโนเมตร เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanofiber) เป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ถึงระดับ 100 นาโนเมตร และ แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorod) ซึ่งเป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง โดยมีขนาดใน 2 มิติน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร และมีขนาดในอีก 1 มิติที่ยาวกว่า เป็นต้น

เนื่องจากการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายรูปร่าง ซึ่งแต่ละรูปร่างจะส่งผลให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรแตกต่างกัน ดังนั้นโครงสร้างแต่ละรูปร่างจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์ให้อยู่ในลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้าน เซนเซอร์ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวัดสารเคมีหรือสารทางชีวภาพ เป็นต้น เพราะการเพิ่มพื้นที่ผิวของซิงค์ออกไซด์โดยการสังเคราะห์เป็นแท่งนาโน จะเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมี ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ส่งผลให้ได้เซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

2.2 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

สำหรับการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโน สามารถทำได้ 2 แบบ คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top - down) และกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน (bottom - up) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง เป็นการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จากโครงสร้างขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับนาโน โดยใช้การถ่ายแบบย่อส่วนจากแม่พิมพ์ (mask) ด้วยแสงลงบนพื้นผิวรองรับที่ต้องการจะสร้างลวดลาย ก่อนจะนำไปผ่านขั้นตอนทางเคมีต่างๆ

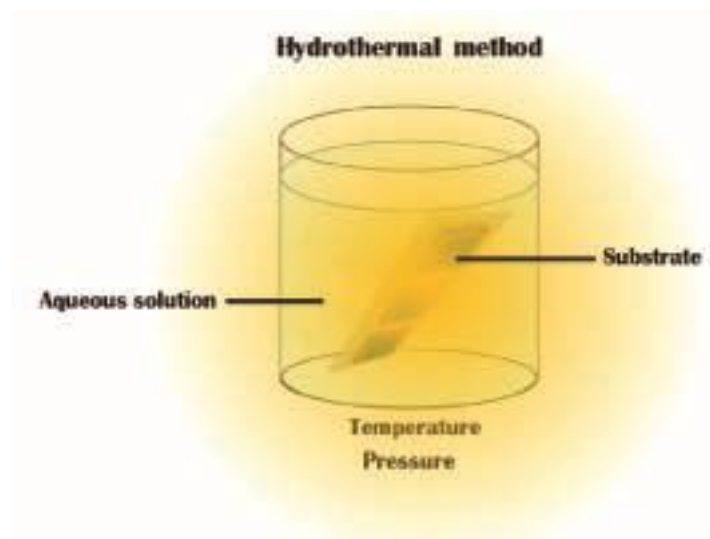
เพื่อทำการกัดกร่อนพื้นผิวรองรับให้เป็นลวดลายตามแบบที่ถ่ายไว้แล้ว สำหรับข้อดีของการสังเคราะห์แบบลงล่าง คือสามารถกำหนดตำแหน่งการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ตามความต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีนี้ ก็มีข้อจำกัดทางเทคโนโลยี คือการใช้แสงธรรมดาไม่สามารถให้รายละเอียดคมชัดได้ในระดับนาโน ดังนั้นจำเป็นจะต้องใช้เฉพาะแสง UV หรือรังสีเอ็กซ์ (X - ray) เท่านั้น

กระบวนการสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน เป็นการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จากขนาดเล็กไปขนาดใหญ่ หากจะให้เห็นภาพชัดเจน เช่น การสร้างบ้านเริ่มจากการก่ออิฐที่ละก้อนจนกลายเป็นบ้านหลังใหญ่ ซึ่งเปรียบเทียบกับกระบวนการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์คือ การนำอะตอมหรือโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์มาจัดเรียงให้เกิดเป็นโครงสร้างของแท่งนาโนขนาดเล็กจนกลายเป็นแท่งนาโนขนาดใหญ่ สำหรับข้อดีของการสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน คือสามารถทำการสังเคราะห์ได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการถ่ายแบบย่นส่วนจากแม่พิมพ์ด้วยแสงลงบนพื้นผิวรองรับ แต่อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีนี้ก็มีข้อจำกัดคือ แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะการเกิดเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดตำแหน่งการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ ตัวอย่างการสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน เช่น กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal process)

2.2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล⁽⁵⁾

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์ผลึกของวัสดุภายใต้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและสารละลายในน้ำ (aqueous solution) ที่มีลักษณะเฉพาะทางกายภาพ ซึ่งการทำปฏิกิริยากันจะเกิดขึ้นภายใต้ความดัน (pressure) และอุณหภูมิ (temperature) คงที่แล้วเกิดการสร้างผลึกของวัสดุขึ้นมา การสร้างผลึกของวัสดุจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างและพฤติกรรมของสารแต่ละชนิด โดยที่กระบวนการสังเคราะห์จะดำเนินอย่างต่อเนื่องภายในภาชนะปิดที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงและความดันเป็นเวลานานได้ ดังภาพประกอบ 4 สำหรับข้อดีของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คือ เป็น กระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถทำได้ภายใต้สภาวะปกติ ในอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 100 °C) ที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสังเคราะห์ต่ำ แต่สามารถได้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะโกนอลได้

⁵Han, S.C; et. al. (2012). Growth of high aspect ratio ZnO nanorods by solution process: Effect of polyethyleneimine. Journal of Solid State Chemistry. 189(2012): pp.25-31.

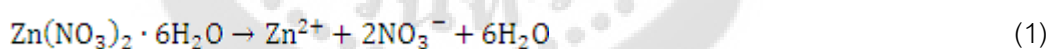


ภาพประกอบ 4 ส่วนประกอบหลักของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

2.2.2 ปฏิริยาเคมีกเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์⁽⁶⁾

แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายที่มีสารตั้งต้น 2 ชนิดคือ ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ทำหน้าที่เป็นตัวถูกละลาย และ เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อให้ความร้อนภายใต้อุณหภูมิและความดันคงที่ ส่งผลให้สารละลายเกิดการทำปฏิริยาและเกิดผลิตภัณฑ์เป็นซิงค์ออกไซด์ดังสมการต่อไปนี้

ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรตแตกตัวได้เป็นซิงค์ไอออน ไนเตรทไอออน และน้ำดังสมการที่ (1)



เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีนสามารถทำปฏิริยากับน้ำและแตกตัวได้เป็นแอมโมเนีย และฟอร์มัลดีไฮด์ดังสมการที่ (2)



แอมโมเนียสามารถทำปฏิริยากับน้ำแล้วแตกตัวเป็นแอมโมเนียไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ (3)



⁶ Francisco, S.P; et. al. (2011). Growth of vertically aligned ZnO nanorods using textured ZnO films. Nanoscale Research Letters. 6(2011): pp524

ซิงค์ไฮดรอกไซด์จากสมการ (1) ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนในสมการที่ (3) เกิดซิงค์ไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ (4)



จากสมการที่ (4) เมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด จะเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ดังสมการที่ (5)

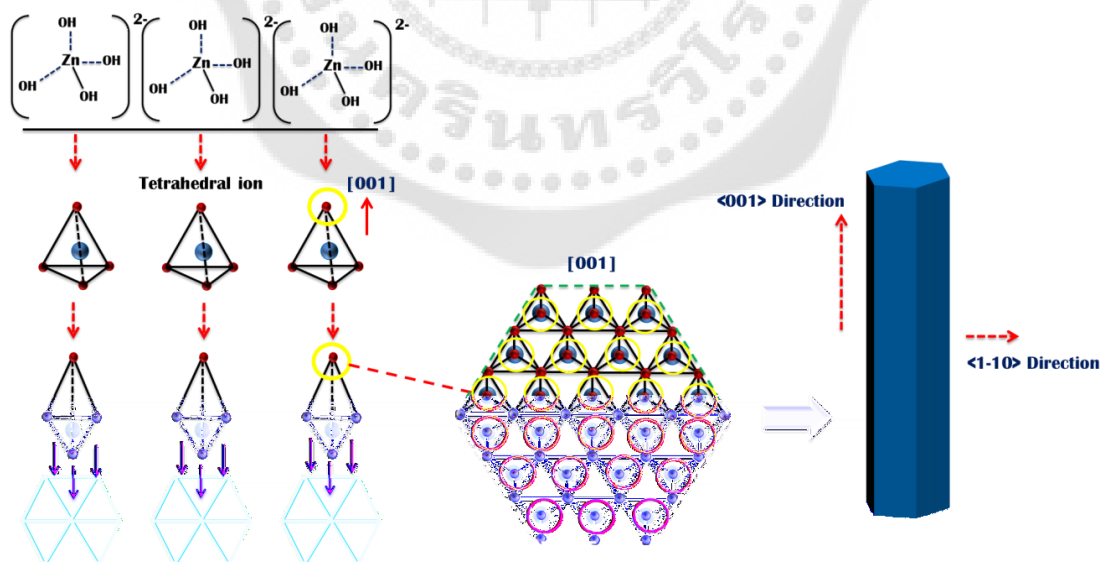


และปฏิกิริยาจะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

2.2.3 กลไกการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

จากปฏิกิริยาเคมีสมการที่ (4) จะเห็นได้ว่า Zn^{2+} ทำปฏิกิริยากับ 2OH^- เกิดเป็นซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Zn}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเพทระฮีดรอลไอออน ตกผลึกบนแผ่นรองรับตามแนวแกนตั้งตรงซึ่งถูกเรียกว่า แกน c โดยมีระนาบ (0001) เป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งเป็นไอออนประจุลบอะตอมคู่ หรือเรียกว่า ระนาบมีซัว และเมื่อสารละลายซิงค์ไฮดรอกไซด์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดจะเกิดการตกตะกอนและก่อตัวเป็นผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และน้ำดังปฏิกิริยาสมการที่ (5) โดยลักษณะการก่อตัวสามารถดูได้จากภาพประกอบ 5

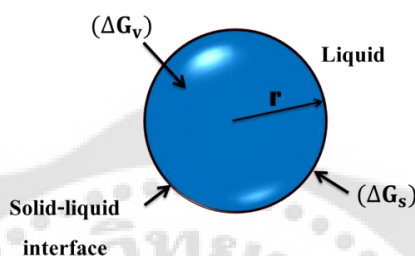
สำหรับการตกตะกอนและก่อตัวเป็นผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์นั้น สามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) และการเติบโตของผลึก (crystal growth) ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 5 แบบจำลองการตกผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

2.2.3.1 การเกิดนิวเคลียสผลึก⁽⁷⁾

นิวเคลียสของผลึกคือ ผลึกเล็กๆ ที่ก่อตัวขึ้นเป็นผลึกแรก ซึ่งการก่อตัวของนิวเคลียสนี้อาจจะก่อตัวขึ้นหลายบริเวณพร้อมๆ กัน การจัดเรียงตัวของอะตอมในนิวเคลียสผลึกจะทำให้พลังงานความร้อนของโครงสร้างผลึกถูกถ่ายเทออกมา ทำให้พลังงานความร้อนของโครงสร้างผลึกน้อยกว่าพลังงานความร้อนของสารละลายจึงเกิดความแตกต่างของพลังงานความร้อนระหว่างของแข็ง (ผลึก) และของเหลว (สารละลาย) เราเรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (**volume free energy, ΔG_v**) โดยเมื่อขนาดของผลึกโตขึ้นจะทำให้พลังงานอิสระเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 6 รอยเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคของของแข็งกับของเหลว

หากมองผลึกของแข็งหรือนิวเคลียสผลึกเป็นอนุภาคของของแข็งที่เป็นทรงกลม ดังภาพประกอบ 6 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของแข็งจะเกิดรอยเชื่อมต่อระหว่างผิวอนุภาคของของแข็งกับของเหลว ก่อให้พลังงานระหว่างรอยเชื่อมต่อที่เรียกว่า พลังงานการเกิดพื้นผิวรวม (**interfacial energy, γ**) และถ้าขนาดของอนุภาคของของแข็งโตขึ้น จะทำให้พลังงานการเกิดพื้นผิวรวมเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานรวม (**ΔG**) ของระบบซึ่งประกอบด้วยพลังงานอิสระเชิงพื้นผิว และพลังงานอิสระเชิงปริมาตรดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\Delta G = \Delta G_s + \Delta G_v \quad (6)$$

$$= 4\pi r^2 \gamma + \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v \quad (7)$$

ΔG คือ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลงในระบบ หรือพลังงานที่เปลี่ยนไปในการเกิดนิวเคลียสผลึก

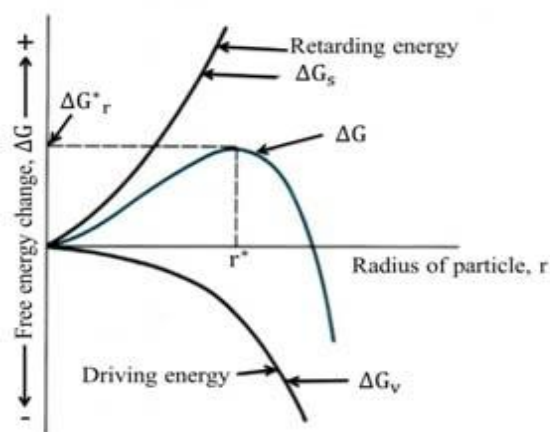
ΔG_s คือ พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว

ΔG_v คือ พลังงานอิสระเชิงปริมาตร

γ คือ พลังงานการเกิดพื้นผิวรวม

ΔG_v คือ พลังงานอิสระเชิงปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

⁷J.M. Mullin. (2012). *Crystallization*. p. 183.



ภาพประกอบ 7 พลังงานอิสระรวมที่เปลี่ยนแปลงในระบบของของแข็งที่เป็นทรงกลมกับรัศมีวิกฤติของนิวเคลียสผลึกหรืออนุภาค

ที่มา: J.M. Mullin. (2012). Crystallization. p. 183.

จากภาพประกอบ 7 แสดงให้เห็นว่าพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลงในระบบ จะผ่านจุดสูงสุดที่ r^* ที่เรียกว่า “รัศมีวิกฤติ” (the critical radius) ของนิวเคลียสผลึก ซึ่งสามารถหาค่าความชันที่จุดสูงสุดของรัศมีวิกฤติได้จากการอนุพันธ์สมการที่ (7) ด้วยขนาดของนิวเคลียสรัศมี r ดังสมการที่ (8)

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 = 8\pi r\gamma + 4\pi r^2 \Delta G_v \quad (8)$$

ทำการแก้สมการที่ (8) จะได้ r^* เป็น

$$r^* = \frac{-8\pi\gamma}{4\pi\Delta G_v} = \frac{-2\gamma}{\Delta G_v} \quad (9)$$

และพลังงานอิสระที่จุดวิกฤติ (ΔG^*_r) สามารถหาได้จากการแทนสมการที่ (9) ใน (7) จะได้ดังสมการที่ (10)

$$\Delta G^*_r = 4\pi \left(\frac{-2\gamma}{\Delta G_v}\right)^2 \gamma + \frac{4}{3}\pi \left(\frac{-2\gamma}{\Delta G_v}\right)^3 \Delta G_v \quad (10)$$

ทำการแก้สมการที่ (10) จะได้ ΔG^*_r เป็น

$$\Delta G^*_r = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2} = \frac{4}{3}\pi r^{*2}\gamma \quad (11)$$

ขนาดของรัศมีวิกฤติ r^* เป็นขนาดที่ต่ำสุดที่เป็นไปได้ของนิวเคลียสเสถียร (stable nucleus) โดยที่

$r > r^*$ เป็นนิวเคลียสเสถียร และมีการเติบโตต่อไป

$r < r^*$ เป็นนิวเคลียสไม่เสถียร (unstable nucleus) จะละลายหายไป (dissolve) เป็นของเหลวอีกครั้ง

จากกราฟยังสามารถอธิบายได้จากการพิจารณาพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของระบบดังต่อไปนี้

ถ้าพลังงานอิสระของระบบมีค่าเป็นบวกและไม่เกินค่าพลังงานอิสระวิกฤติ (ΔG^*_r) จะส่งผลให้กลุ่มก้อนโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์ไม่สามารถก่อตัวเป็นนิวเคลียสของผลึกได้ แต่จะละลายกลับไป ในสารละลาย ถ้าพลังงานอิสระของระบบมีค่าเป็นลบต่ำกว่าค่าพลังงานอิสระวิกฤติ (ΔG^*_r) แสดงให้เห็นว่ากลุ่มก้อนโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์พยายามเข้าสู่สภาวะที่ทำให้ระบบมีพลังงานต่ำสุด ดังนั้นจะสามารถก่อตัวและโตขึ้นเป็นผลึกขนาดใหญ่ได้ต่อไป

2.2.3.2 การเติบโตของผลึก^(8,9)

ภายหลังการเกิดนิวเคลียสของผลึกที่เสถียรแล้ว เมื่อระบบอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated system) นิวเคลียสจะเติบโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ โดยโอกาสในการเกิดผลึกซิงค์ออกไซด์นั้นเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ของอะตอม (diffusion reaction theories) ซึ่งการแพร่ของอะตอมจะเป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมคือความเข้มข้นของสารละลาย เพราะการแพร่เกิดขึ้นเมื่อบริเวณความเข้มข้นของสองบริเวณมีความแตกต่างกัน โดยเริ่มต้นแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นหากสารละลายที่ใช้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวมีความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณผิวหน้าผลึก จะเกิดการถ่ายโอนอะตอมจากสารละลายมายังบริเวณผิวหน้าผลึกและเมื่อทับถมขึ้นเรื่อยๆ จะกลายเป็นผลึกที่โตขึ้น การแพร่ของอะตอมอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การแพร่ในสภาพของเหลวและก๊าซนั้นอาจเกิดขึ้นได้ง่าย แต่การแพร่ในสภาพของแข็งนั้นจะต้องอาศัยตัวช่วยกระตุ้นให้เกิดการแพร่ อันได้แก่ความร้อน ยังมีพลังงานความร้อนมากก็จะช่วยทำให้เกิดการแพร่ได้ดีขึ้น อัตราการเคลื่อนที่ของอะตอมมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิหรือพลังงานความร้อน กลไกการแพร่ของอะตอมของโลหะบริสุทธิ์เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมของตัวเองจากที่หนึ่งไปอีกหนึ่ง กระบวนการแพร่แบบนี้เราเรียกว่า การแพร่โดยตัวเอง (self-diffusion) แต่กระบวนการแพร่โดยอะตอมที่ต่างชนิดกันหรืออะตอมของวัสดุที่ต่างกัน การแพร่ที่สำคัญอยู่ 2 อย่าง คือการแพร่แบบช่องว่าง (vacancy diffusion) จะเป็นการแพร่ที่เกิดขึ้นจาก

⁸ สุนทร มุลทา. โครงสร้างผลึก การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ. (เอกสารประกอบการสอน). หน้า 9-10.

⁹ ประเสริฐ สุทธิประสิทธิ์. (2525). เคมีฟิสิกส์ 1. หน้า 36.

การเคลื่อนที่ของอะตอมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เมื่อมีพลังงานกระตุ้นทำให้อะตอมสั่นสะเทือนและเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งซึ่งการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งสู่ที่ว่างอีกตำแหน่ง จะทำให้เกิดช่องว่างเกิดขึ้น จึงเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบช่องว่าง และการแพร่แบบแทรกที่ (interstitial diffusion) จะเป็นการแพร่ที่เกิดกับอะตอมที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ไปแทรกอยู่ตามช่องระหว่างอะตอมที่มีขนาดใหญ่กว่า พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ เป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้อะตอมเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งเรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (activate energy; Q) โดยพลังงานนี้จะได้จากการให้ความร้อนแก่อะตอม

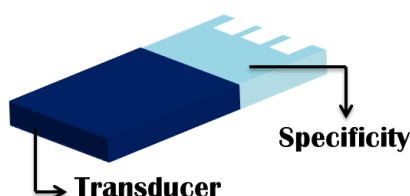
ดังนั้นหากการแพร่ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในกรณีของการเติบโตแห่งนาโนซึ่งคือออกไซด์ก็จะพบว่า ผลึกสามารถเติบโตได้ทราบจนความเข้มข้นของอะตอมอยู่ในสภาวะสมดุลและหยุดการเติบโตไปเอง

2.3 เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า

เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณหรือปริมาณสารต่างๆ ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางเคมีเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หากนำไปใช้งานในการตรวจวัดสารทางชีวภาพ จะถูกเรียกว่า ไบโอเซนเซอร์ (bio-sensor) หรือหากนำไปตรวจวัดสารเคมี จะถูกเรียกว่าเคมีเซนเซอร์ (chemical sensor) ซึ่งในปัจจุบันเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น ทางด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าที่จะกล่าวต่อไปนี้จะประกอบด้วย ส่วนประกอบของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรี ตามลำดับ

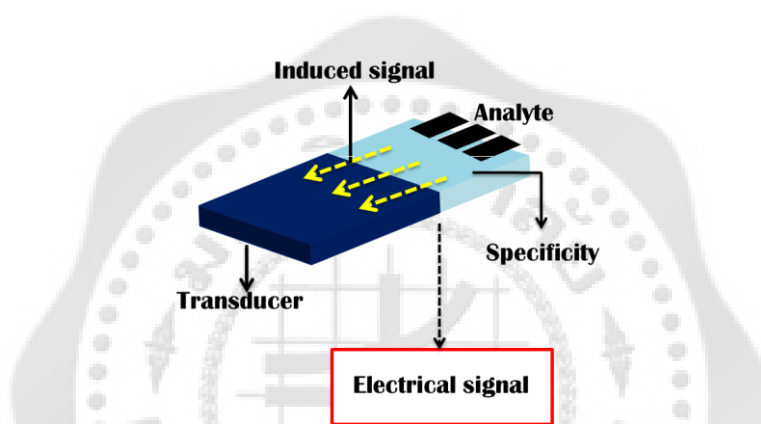
2.3.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า

เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) สารชีวภาพที่มีความจำเพาะเจาะจง (specificity) เป็นสารที่มีความสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวิเคราะห์อย่างจำเพาะเจาะจงได้ และ (2) ตัวแปลงสัญญาณ (transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงสัญญาณเฉพาะต่างๆ เช่น อิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้ จากนั้นนำไปขยายหรือแสดงผลออกมาเพื่อระบุถึงปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ส่วนประกอบของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า

หลักการทำงานของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าคือ เมื่อสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ (analyte) เข้าจับกับ สารชีวภาพที่มีความจำเพาะเจาะจง (specificity) เราเรียกขั้นตอนนี้ว่ากลไกการจดจำกับสารจำเพาะเจาะจง จากการเข้าจับกันนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและมีการถ่ายทอดสัญญาณเฉพาะ (Indicated signal) ซึ่งอาจเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และอื่นๆเข้าสู่ตัวแปลงสัญญาณ ดังเส้นประที่แสดงในภาพประกอบ 9 ซึ่งตัวแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่รับและเปลี่ยนสัญญาณเฉพาะเป็นสัญญาณไฟฟ้า (electrical signal) ผ่านเครื่องอ่านสัญญาณออกมา ทำให้เราสามารถอ่านค่าได้ เรียกขั้นตอนนี้ว่าเทคนิคของการรับและแปลงสัญญาณทางกายภาพ (physical transduction technique) และเมื่ออ่านค่าได้ก็ทำให้ทราบว่าสารที่เราวิเคราะห์นั้นเป็นสารใด



ภาพประกอบ 9 หลักการทำงานของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า

2.3.2 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าเป็นการนำหลักทางเคมีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ หรือความเข้มข้นของสารที่ต้องการ โดยอาศัยการตอบสนองทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารนั้น ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจะมีอยู่ 3 เทคนิค คือ คูลอมเมตรี (coulombmetry) โปเทนชิอเมตรี (potentiometry) และโวลแทมเมตรี (voltammetry) แบ่งตามลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่ให้และค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ ดังสรุปแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิควิธี	สัญญาณไฟฟ้าที่ให้	ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้
คูลอมเมตรี	ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า	ปริมาณไฟฟ้า
โปเทนชิอเมตรี	กระแสไฟฟ้า = 0	ศักย์ไฟฟ้า
โวลแทมเมตรี	ศักย์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า

สำหรับรายละเอียดเทคนิคการวิเคราะห์ในแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.3.2.1 คลอมเมตรี

คลอมเมตรีเป็นเทคนิควิธีวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณประจุไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้สารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชัน การวิเคราะห์หาสารตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าที่ใช้กับจำนวนกรัมโมเลกุลของสารนั้น สำหรับเทคนิคคลอมเมตรีจะมีการจัดเซลล์เพื่อการวิเคราะห์เป็นรูปแบบอิเล็กโทรไลต์ อาศัยพลังงานจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผลที่ได้จากเทคนิคนี้คือการวัดปริมาณประจุไฟฟ้า แต่สำหรับวิธีวิเคราะห์แบบคลอมเมตรีจะมีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากสำหรับการเตรียมสารวิเคราะห์ เนื่องจากจะต้องทำการแยกสลายของสารวิเคราะห์

2.3.2.2 โฟเทนชิอเมตรี

โฟเทนชิอเมตรีเป็นเทคนิควิธีวิเคราะห์ที่มีการจัดเซลล์แบบเกลวานิก ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน และอีกขั้วเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารตัวอย่างจากการวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยสภาวะนี้แทบจะไม่มีกระแสเกิดขึ้นในวงจรเลย วิธีโฟเทนชิอเมตรีมีลักษณะโดดเด่นคือไม่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอก แต่สารตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาเองที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า วิธีนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารตัวอย่างซึ่งแสดงผลออกมาในรูปแบบกระแสไฟฟ้า

2.3.2.3 โวลแทมเมตรี

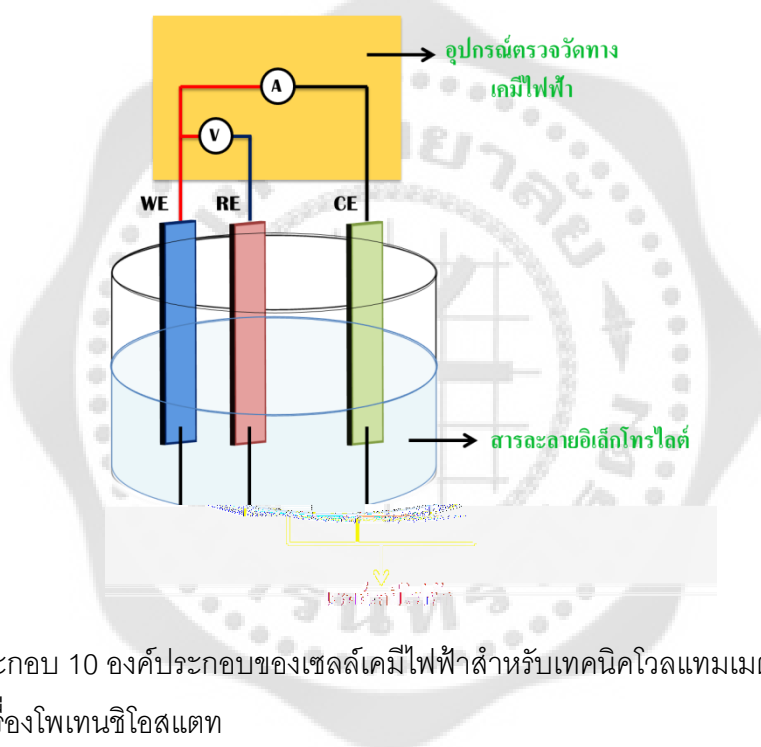
โวลแทมเมตรีเป็นเทคนิควิธีที่ให้ข้อมูลการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของกระแสกับการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจร ภายใต้สภาวะการทดลองที่เกิดกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆที่ไม่เกิดการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า) หรือเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์ที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาการรับและให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าช้าลง เป็นเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง) ที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยทำให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวน้อย เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง โดยเทคนิคโวลแทมเมตรีจะอาศัยศักย์ไฟฟ้าจากวงจรภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยา การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าเป็นรูปแบบอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วคือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย โดยทั้งหมดจะถูกต่อเข้าสู่เครื่องโฟเทนชิโอสแตต แตกต่างกับเทคนิคโฟเทนชิอเมตรีซึ่ง

สารตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาเองในสารละลายและมีการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าเป็นรูปแบบแกลวานิกที่มีเฉพาะ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วยเท่านั้น

ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ทำการเลือกเทคนิคโวลแทมเมตรีในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า ดังนั้นจึงจะขอกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือ พร้อมด้วยหลักการวัดสัญญาณในลำดับถัดไป

2.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรี

ในการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าจะต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน ประกอบด้วย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell) และ อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 10 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 10 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรีที่ต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท

จากภาพประกอบ 10 รายละเอียดแต่ละส่วนจะขอกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

2.3.3.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ สารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากมีไอออนบวกหรือไอออนลบเคลื่อนที่อยู่ในสารละลายหลังจากเกิดการแตกตัวแล้ว ซึ่งอาจจะเป็นสารละลายกรด เบส หรือเกลือก็ได้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 2 ประเภท คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์แก่ (strong electrolyte) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) ในที่นี้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ สารที่เติมลงไปในการวัดตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะต้องไม่รบกวนในการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย ยกตัวอย่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายบัฟเฟอร์

2.3.3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้า^(10,11)

เซลล์เคมีไฟฟ้า คือ วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 เซลล์ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยแต่ละขั้วจะเป็นเพียงครึ่งเซลล์ (half-cell) ของเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ แต่ละครึ่งเซลล์จะเกิดปฏิกิริยาการให้หรือรับอิเล็กตรอน (redox reaction) โดยขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแอโนด (anode) หรือครึ่งเซลล์แอโนดิก (anodic half-cell) และ อีกขั้วหนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วคาโทด (cathode) หรือ ครึ่งเซลล์คาโทดิก (cathodic half-cell) สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมี 2 ประเภทแบ่งตามหน้าที่ของเซลล์ คือ เซลล์แกลวานิกและเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทั้ง 2 ประเภทมีความแตกต่างกันคือ เซลล์แกลวานิกจะให้พลังงานเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แต่สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สำหรับขั้วไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในเซลล์เคมีไฟฟ้ามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode: WE) จะเป็นตัวแปลงสัญญาณและตอบสนองของสัญญาณกระตุ้นให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ดีจะต้องมีการนำไฟฟ้าได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ รักษาประสิทธิภาพการทำงานได้เป็นอย่างดี ขั้วไฟฟ้าใช้งานส่วนใหญ่จะทำมาจากโลหะเฉื่อย เช่น แพลทินัม และทอง เป็นต้น

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode: RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เปรียบเทียบกับไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าใช้งาน ทำให้สามารถรู้ผลการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าที่เกิดกับขั้วไฟฟ้าใช้งานได้ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีคุณสมบัติที่เป็นลักษณะเฉพาะคือ มีค่าศักย์ไฟฟ้าแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัว ไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเก็บไว้ ที่สำคัญคือต้องไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะทำมาจากซิลเวอร์ - ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver/silver chloride) เพราะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงอื่นๆ คือ โลหะเงิน และเกลือของโลหะมีความคงตัวสูง สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 275 °C เหมาะแก่การนำไปใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความร้อน อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับสารละลายที่มีน้ำ (aqueous) และที่ไม่มีน้ำ (non - aqueous) ที่สำคัญคือมีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก สำหรับการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อช่วยให้ครบวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า จะเป็นค่าที่เกิดจากผลต่างของศักย์ไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าใช้งาน

¹⁰ เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. (2552). เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. หน้า 7, 8, 27, 34.

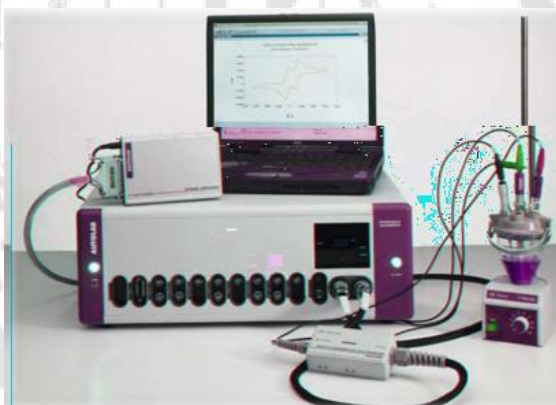
¹¹ ลาวัลย์ ศรีพงษ์. (2543). การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. หน้า 1.

ถูกเรียกว่า ศักย์สัมพัทธ์ (relative potentials) ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของสารตัวอย่างได้จากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารตัวอย่าง

ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode: CE) ทำหน้าที่รับพลังงานจากขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งได้รับจากปฏิกิริยาเคมีของสารชีวภาพตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานจุ่มอยู่แล้วส่งต่อพลังงานที่ได้รับเข้าสู่เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าช่วยที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวมากๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี มีความเป็นรูพรุนสูง ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา โดยส่วนใหญ่แล้วขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำมาจากโลหะแพลทินัม (Pt) แต่เนื่องจากแพลทินัมมีราคาสูงจึงอาจจะเลือกใช้วัสดุอื่นมาทดแทน เช่น ผงคาร์บอน และกราไฟต์

2.3.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้สำหรับควบคุมและตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) เป็นเครื่องที่ควบคุมพลังงานศักย์ ถูกนำไปใช้กับการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า สำหรับการใช้งานเครื่องโพเทนชิโอสแตทจะถูกต่อเข้ากับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย ดังภาพประกอบ 11

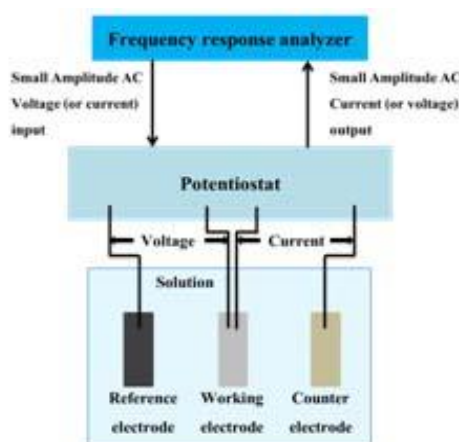


ภาพประกอบ 11 เครื่องโพเทนชิโอสแตท

ที่มา: พรวิสา วงศ์ปัญญา. (2555). การทดสอบการกักเก็บด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท.

(เอกสารประกอบการสอน). หน้า 3.

อิเล็กตรอนิกส์ภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน พลังงานศักย์ที่ให้นี้จะมีผลทำให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานมีศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายโดยรอบกับขั้วไฟฟ้าใช้งานได้ ซึ่งการให้และรับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าใช้งานนี้ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าใช้งาน ดังภาพประกอบ 12



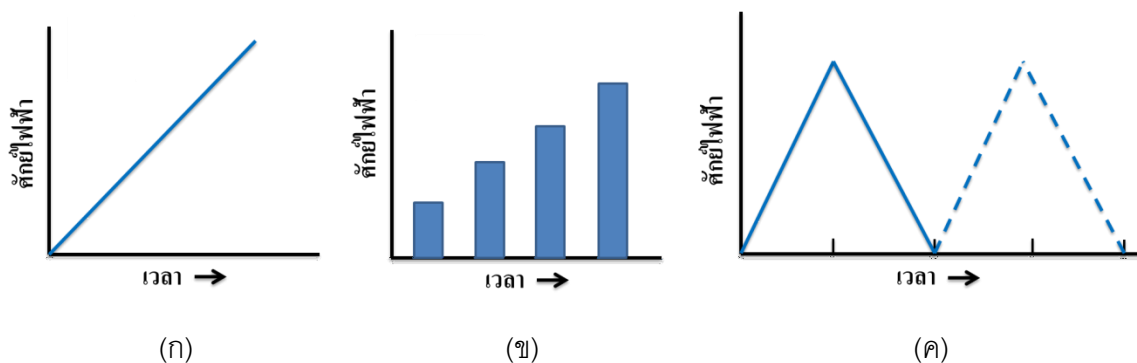
ภาพประกอบ 12 หลักการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตท

2.3.4 หลักการทำงานของเทคนิคโวลแทมเมตรี⁽¹²⁾

หลักการวิเคราะห์ของเทคนิคโวลแทมเมตรี คือ เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าจากวงจรภายนอก แก่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สารตัวอย่างในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารตัวอย่างกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้าใช้งาน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าใช้งานกับขั้วไฟฟ้าช่วย กระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าภายนอก ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจจับได้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าใช้งาน

สำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรีจะสามารถแบ่งย่อยการวิเคราะห์ได้อีกหลายเทคนิคขึ้นอยู่กับรูปแบบสัญญาณของการให้ค่าศักย์ไฟฟ้างานประกอบ 13 (ก) เป็นรูปแบบสัญญาณแบบลิเนียร์-สแกน จะมีการให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นเส้นตรงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (ข) แบบพัลส์ ให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นช่วงเวลา โดยจะมีรูปแบบในการให้เป็นช่วงเวลาที่แตกต่างกันออกไป การตอบสนองของขั้วไฟฟ้าในแต่ละพัลส์ จะถูกบันทึกแยกจากกัน (ไม่ต่อเนื่อง) และ (ค) แบบสามเหลี่ยม รูปแบบนี้จะมีมีการให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นเส้นตรงไปถึงจุดสูงสุดแล้วจะมีการสแกนกลับไปที่ศักย์ไฟฟ้าที่จุดเดิมอีกครั้ง ซึ่งถูกเรียกว่าเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry: CV)

¹² จิตยา เงินแท้. (2555). เทคนิคการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. หน้า 143-181.



ภาพประกอบ 13 ลักษณะสัญญาณกระตุ้นในโวลแทมเมตรี

(ก) รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบลิเนียร์-สแกน

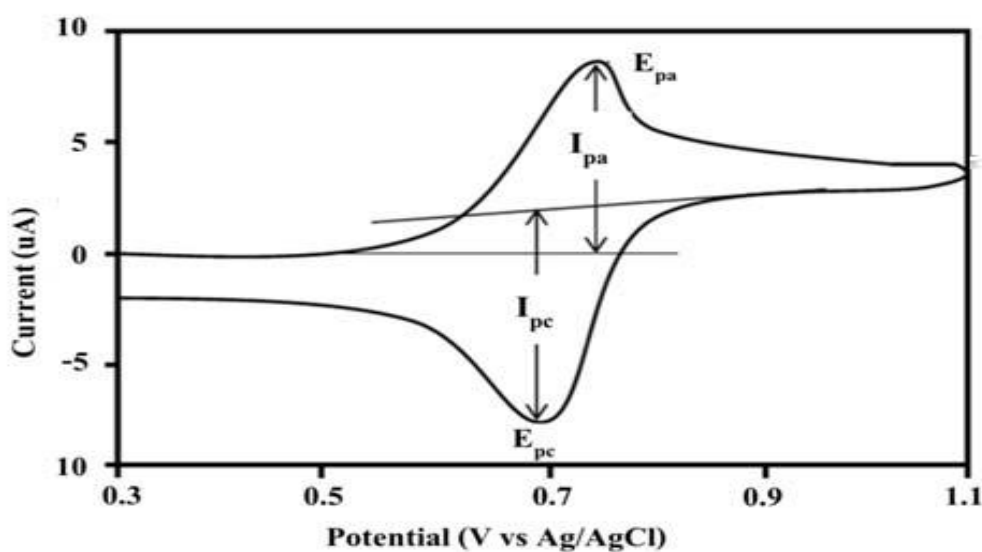
(ข) รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์

(ค) รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบสามเหลี่ยม

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยลักษณะการกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบสามเหลี่ยม ไปยังขั้วไฟฟ้าที่ถูกจุ่มอยู่ในสารตัวอย่าง จากนั้นก็ทำการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งเราสามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนตั้งเป็นศักย์ไฟฟ้า และแกนนอนเป็นเวลาได้เมื่อมีการให้สัญญาณไฟฟ้าแบบสามเหลี่ยมดังภาพประกอบ 13 (ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเราจะเรียกค่าศักย์ไฟฟ้านี้ว่า การสแกนไปข้างหน้า (forward scan) แต่เมื่อสแกนไปถึงจุดหนึ่งตามที่กำหนดไว้ ศักย์ไฟฟ้าก็จะเริ่มลดลงด้วยอัตราสแกนเท่าเดิม เราจะเรียนการสแกนแบบนี้ว่า การสแกนย้อนกลับ (reverse scan) จนกระทั่งค่าศักย์ไฟฟ้าจะกลับมาเริ่มต้นที่ค่าเดิม

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ข้อมูลที่ได้จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานในระหว่างการสแกนศักย์ไฟฟ้าที่ทำการป้อนเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในสภาวะมีแรงดันคงที่ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) กับศักย์ไฟฟ้า (แกนนอน) และเรียกรูปแบบนี้ว่า “ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (cyclic voltammogram)” ดังภาพประกอบ 14 จากภาพจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าจากลบไปศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากขึ้น จะพบว่าสารตัวอย่างเกิดการให้อิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reduction) ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้า จนมาถึงจุดหนึ่งซึ่งปรากฏค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด เมื่อลากเส้นตรงจากจุดยอดมาตัดแกนศักย์ไฟฟ้า จะพบตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งถูกเรียกว่า ตำแหน่งยอดศักย์ไฟฟ้าของฟิคแอโนดิก (anodic peak potential: E_{pa}) มีค่าเป็นบวก และความสูงของฟิคคือกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า กระแสของฟิคแอโนดิก (anodic peak current: I_{pa}) หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ภายหลังตำแหน่งฟิคสูงสุดจะเห็นได้ว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นแต่ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มลดน้อยลง เนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้ค่า

กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง ในทำนองเดียวกัน เมื่อมีการลดค่าศักย์ไฟฟ้าจากทางด้านบวกไปยังด้านลบ สารตัวอย่างจะเกิดการรับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ค่าเป็นลบเนื่องจากการกลับชั่วพลังงานศักย์) ตามศักย์ไฟฟ้าที่ลดลง และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง ดังปรากฏในพีค เรียกตำแหน่งที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าของพีคแคโทดิก (cathodic peak potential: E_{pc}) ซึ่งมีค่าเป็นลบ และความสูงของพีคคือกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า กระแสของพีคแคโทดิก (cathodic peak current: I_{pc}) หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน



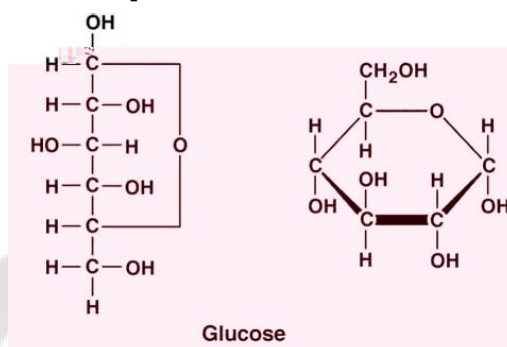
ภาพประกอบ 14 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรม

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558

จากการฟัไฮคคลิกโวลแทมโมแกรมจะให้ข้อมูลที่มีความสำคัญมาก ซึ่งความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกระแสสูงสุด สามารถบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารประกอบที่ศึกษานั้นว่าผันกลับได้หรือไม่ สำหรับปฏิกิริยาการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะเกิดจากการควบคุมด้วยการแพร่ (diffusion controlled) ในกรณีนี้ ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมจะต้องเป็นไปตามสมการที่ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ได้กระแสสูงสุด สำหรับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ควรมีค่าอยู่ประมาณ 59 mV หากด้วยจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอนต่อโมลในปฏิกิริยา นอกจากนั้น อัตราส่วนของกระแสสูงสุดควรจะมีค่าเท่ากับ 1

2.3.5 การตรวจวัดปริมาณกลูโคส

กลูโคส คือ สารชีวโมเลกุลที่จัดอยู่ในสารอาหารประเภทของคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วย หมู่อัลดีไฮด์และคาร์บอนจำนวน 6 อะตอม ดังภาพประกอบ 15 กลูโคสจัดเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบมากที่สุดในธรรมชาติและมีความสำคัญเพราะเป็นน้ำตาลพื้นฐานของคาร์โบไฮเดรตทุกตัว หรือเป็นสารผลิตพลังงาน แหล่งอาหารธรรมชาติที่พบกลูโคส เช่น แป้ง ข้าว ผัก ผลไม้ และน้ำตาล ซึ่งเมื่อน้ำตาลเข้าสู่ร่างกายจะถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสเพื่อให้ร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้



ภาพประกอบ 15 สูตรโครงสร้างกลูโคส

ที่มา: <https://citelighter-cards.s3.amazonaws.com> สืบค้นวันที่ 21 พฤษภาคม 2559

โดยทั่วไปจะมีวิธีในการตรวจวัดปริมาณกลูโคสในร่างกาย หรือที่เรียกว่า การตรวจวัดระดับกลูโคสในเลือด ได้หลากหลายวิธี เช่น วิธีเบเนดิกต์ วิธีวิเคราะห์ด้วยเอนไซม์เฮกไซโคเนส และวิธีวิเคราะห์ด้วยเอนไซม์ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะเลือกศึกษาเฉพาะวิธีวิเคราะห์ด้วยเอนไซม์ โดยมีรายละเอียดในการตรวจวัดดังต่อไปนี้

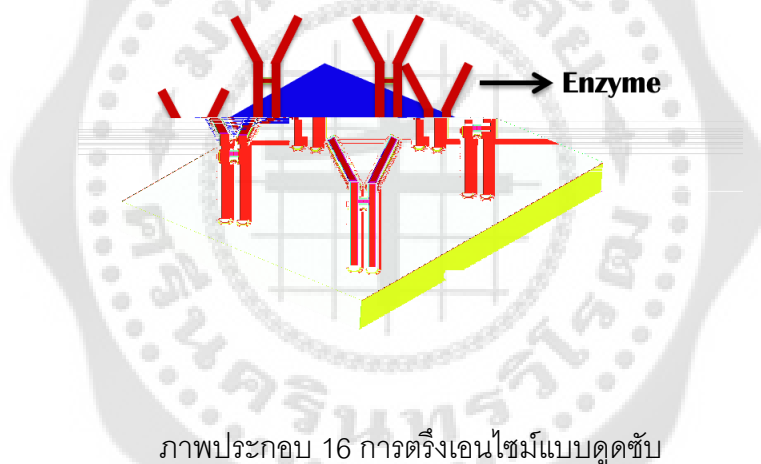
2.3.3.1 ส่วนประกอบในวิธีวิเคราะห์ด้วยเอนไซม์ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สารจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ และตัวแปลงสัญญาณ ดังภาพประกอบ 8

สารจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์หรือส่วนของสารชีวภาพ ซึ่งเป็นสารนี้จะต้องมีความไวทางชีวภาพสูง และที่สำคัญคือ จะต้องมีความจำเพาะเจาะจง ตอบสนองเฉพาะสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์เท่านั้น ซึ่งสารชีวภาพเหล่านี้สามารถจำแนกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ เอนไซม์ (enzyme) แอนติบอดี (antibody) กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) และรีเซพเตอร์ (receptors) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเอนไซม์ เนื่องจาก เป็นสารชีวภาพที่มีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์เป็นอย่างมาก สามารถนำมาตรึงบนตัวตรวจวิเคราะห์ได้ง่าย ที่สำคัญคือเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกับสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการตรวจวิเคราะห์กลูโคส ดังนั้น สารชีวภาพที่ใช้จะต้องเป็นเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase; GOx) เป็นต้น

2.3.3.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยเอนไซม์

2.3.3.2.1 การตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส เป็นการทำให้เอนไซม์อยู่ในขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการตรึงเอนไซม์มีความสำคัญมาก เนื่องจากเอนไซม์ที่ถูกตรึงมีความสามารถในการคัดเลือก (selectivity) ความคงตัว (stability) และความถูกต้องในการวัดหรือความน่าเชื่อถือ (reliability)

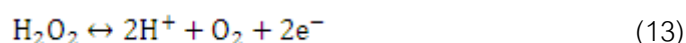
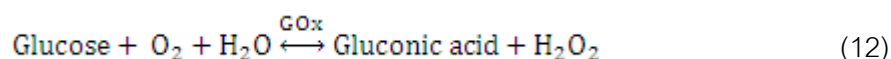
การตรึงแบบดูดซับ เป็นกระบวนการตรึงโดยเอนไซม์จะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุพาหะหรือสารดูดซับ (adsorbents) โดยเป็นการยึดเกาะอย่างหลวมๆ ด้วยด้วยแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ระหว่างเอนไซม์กับตัวดูดซับ ดังภาพประกอบ 16 บางครั้งอาจเป็นพันธะไฮโดรเจน มีสารจำนวนมากมายที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับดูดซับเอนไซม์ เช่น อะลูมินา (alumina) ผงถ่าน (charcoal) ดินเหนียว (clay) เซลลูโลส (cellulose) ดินขาว (kaolin) ซิลิกาเจล (silica gel) คอลลาเจน (collagen) และเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resins) สารเหล่านี้ต้องมีคุณสมบัติที่ไม่มีการละลายในตัวทำละลาย และจะต้องไม่ทำให้เอนไซม์เสียสภาพ หรือมีผลกระทบน้อยมากในการทำให้เกิดการสูญเสียกิจกรรมของเอนไซม์



ภาพประกอบ 16 การตรึงเอนไซม์แบบดูดซับ

2.3.3.2.2 ปฏิกริยาเคมีการตอบสนองของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสต่อกลูโคส⁽¹³⁾

เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจะไปสลายกลูโคสให้เปลี่ยนเป็นกรดกลูโคนิก (gluconic acid) แต่จากการทำงานของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส จะมีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนไปให้ออกซิเจน จึงเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการ (12) และ (13)



¹³ Ji, Y. K; et. al. (2014). Tailoring the surface area of ZnO nanorods for improved performance in glucose sensors. Sensors and Actuators B. 192 (2014): pp(216– 220).

จากสมการ (13) แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ผลสรุปออกมาเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 17 และเกิดเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบ 17 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสต่อกลูโคส

2.4 หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM)⁽¹⁴⁾

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ โดยมีหลักการทำงานดังภาพประกอบ 18 ซึ่งเริ่มจากการยิงลำอิเล็กตรอนด้วยปืนยิงอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกมาจะเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) ถูกเร่งให้เคลื่อนที่ในสภาวะที่เป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV หรือบางเครื่องอาจจะทำได้สูงถึง 50 kV ซึ่งอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด และปริมาณของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูก

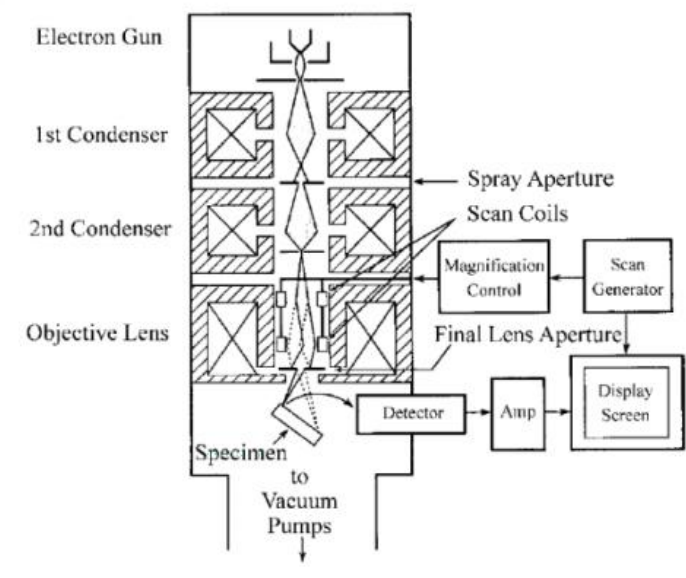
¹⁴อดิพล สว่างอารมย์. (2014). การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก. ปรินุญยานิพนธ์ วท.ม. (วัสดุศาสตร์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.

ควบคุมโดย ช่องเปิด (aperture) สำหรับเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก (first condenser lens) ซึ่งเป็นเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสำคัญมากต่อการควบคุมแสงอิเล็กตรอนปฐุมภูมิ (electron optics) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนปฐุมภูมิที่วิ่งลงมาจากปืนยิงอิเล็กตรอนให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (demagnification)

2. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดที่สอง (second condenser lens) ทำหน้าที่เหมือนเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกโดยบีบลำอิเล็กตรอนและบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนปฐุมภูมิให้ผ่านลงมายังขดลวดแม่เหล็ก (scanning coils)

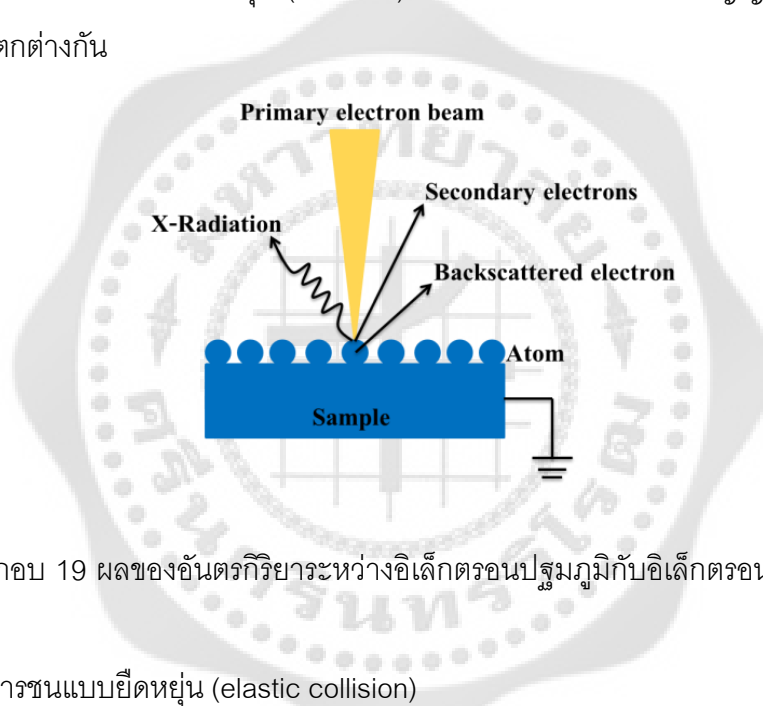
ลำอิเล็กตรอนปฐุมภูมิที่ถูกบีบและบังคับทิศทางโดยเลนส์แม่เหล็กทั้งสองชุดจะเคลื่อนที่ผ่านไปยังเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดที่สาม (final lens) หรือส่วนเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเลนส์แม่เหล็กชนิดนี้จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนปฐุมภูมิให้ไปตกบนผิวของชิ้นงาน โดยมีขดลวดแม่เหล็ก (scanning coils) ทำหน้าที่กวาดยิงอิเล็กตรอนปฐุมภูมิไปยังพื้นผิวของชิ้นงาน อิเล็กตรอนปฐุมภูมิจะไปทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมของชิ้นงาน จากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนทั้งสองจะทำให้เกิดสัญญาณ (signal) ต่างๆขึ้นหลายชนิด ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกัน โดยเกิดจากความลึกของชิ้นงานที่ต่างกันและพลังงานของอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมา อุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (detector) ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแล้วส่งต่อไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพ (TV scanner)



ภาพประกอบ 18 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: http://www.neutron.rmutphysics.com/teaching-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=3973&Itemid=5 สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558

สำหรับอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิและอิเล็กตรอนในอะตอมของชิ้นงานก่อให้เกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) รังสีเอ็กซ์ (X-ray radiation) อิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงกลับ (backscattered electron) ดังภาพประกอบ 19 ซึ่งผลจากการเกิดอันตรกิริยาดังกล่าวสามารถนำมาศึกษาลักษณะของชิ้นงานได้ อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของชิ้นงาน สามารถแบ่งได้ 2 แบบตามลักษณะของการชนอิเล็กตรอนปฐมภูมิ คือ การชนแบบยืดหยุ่น (elastic) และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะให้สัญญาณ (signal) ที่จะนำมาใช้งานแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 19 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนในอะตอมสาร

1. การชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision)

เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบลงบนชิ้นงานและเกิดการชนแบบยืดหยุ่น ไม่มีการสูญเสียพลังงาน แต่ส่งผลให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมา เรียกอิเล็กตรอนที่กระเจิงนี้ว่า Backscatter electron สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวตัวอย่าง

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

เมื่อกลุ่มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิชนกับอะตอมของชิ้นงานแล้วเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นวงในของอะตอมชิ้นงานที่ต้องวิเคราะห์ ถ้าพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรกับนิวเคลียสของอะตอมของชิ้นงานจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรหลุดออกมา เราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ

ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron image)

2.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD)⁽¹⁵⁾

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ สามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิด ปริมาณ คุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชิ้นงานได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ผ่านระบบในโครงผลึกที่มีการจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงผลึกจะเกิดขึ้นเมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงผลึกจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (bragg's law) ในปี 1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวความคิดการเลี้ยวเบนโดยรังสีเอกซ์ไว้ว่าผลึกมีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) โดยแต่ละชั้นคือระนาบของอะตอม (plane of atoms) และระนาบเหล่านี้สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ถ้าความแตกต่างระหว่างวิถีทางเดิน (path difference) ของคลื่นสะท้อนที่อยู่ใกล้เคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบจะทำให้คลื่นสะท้อนมีการรวมกันแบบเสริมและทำให้มีความเข้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นสะท้อนเดี่ยว

แม้ว่า แบบจำลองที่กล่าวมานี้จะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่น แต่วิธีคิดแบบนี้ใช้ได้ทางเรขาคณิตและทำให้เราได้สมการที่ดูง่ายและถูกต้องในการศึกษาดังนี้

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบในโครงผลึกด้วยมุม θ จะเกิดการเลี้ยวเบนผ่านระนาบผลึกและสะท้อนออกมาจากโครงผลึกด้วยมุม θ ดังภาพประกอบ 20 รังสีเอกซ์เข้าตกกระทบระนาบของอะตอมและเกิดการเลี้ยวเบนออกมามีค่าเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่น

$$XG + GY = n\lambda \quad (14)$$

หรือ
$$XGY = n\lambda \quad (15)$$

$$XG = GY = d_{hkl} \sin \theta \quad (16)$$

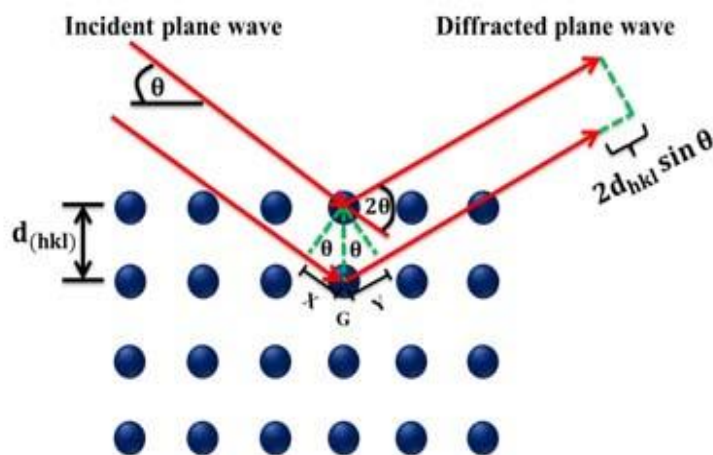
ดังนั้น
$$XGY = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (17)$$

แทนสมการที่ (15) ลงในสมการที่ (17) จะได้ว่า

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (18)$$

¹⁵บัญชา ธนบุญสมบัติ. (2543). การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน. หน้า 25.

- เมื่อ n คือ อันดับการสะท้อน (order of reflection) เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
- d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
- θ คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก



ภาพประกอบ 20 หลักการของเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์

จากสมการที่ (16) เรียกว่า กฎของแบรกก์ ในทางผลึก (crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆ โดยการระบุระนาบจะใช้ $(h \ k \ l)$ ซึ่งค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) เป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 0, 1, 2,... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์และค่าคงที่ของโครงผลึก $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

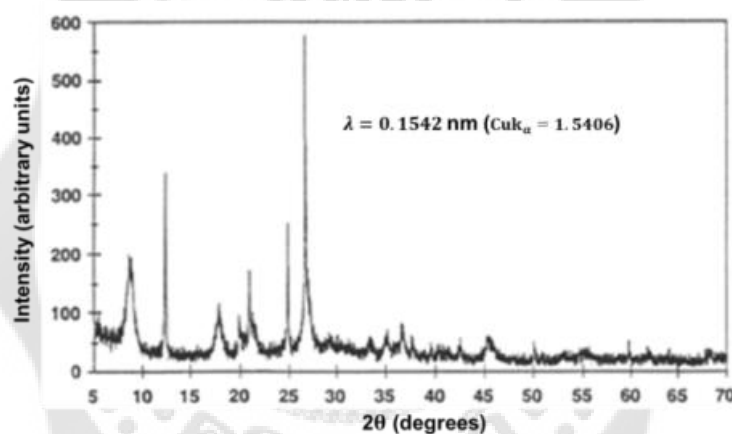
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (19)$$

จากสมการที่ (17) เมื่อ $n = 1$ แทนในสมการที่ (18) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (20)$$

- เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ
- λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
- θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

ระนาบต่างๆในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วจะจึงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (bragg plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อน เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมไปวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆจะถูกตรวจวัด ค่าทั้งสองสามารถนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่วัดได้เรียกว่า แบบอย่างการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ดังภาพประกอบ 21 ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวมาแล้วก็จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้



ภาพประกอบ 21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ที่มา: http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html

สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2009 สุณานดาน บารัว และคณะ (Sunandan Baruah; et al.2009: 456-465) ได้ศึกษาชั้นล่องลึกบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เพื่อดูความเป็นผลึกของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้การสังเคราะห์ในสารละลายที่ผสมระหว่างซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรตและเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน ณ อุณหภูมิ 95 °C โดยชั้นล่องลึกซิงค์ออกไซด์จะถูกทำขึ้นก่อนจะสังเคราะห์อุณหภูมิซิงค์ออกไซด์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-7 นาโนเมตร เช่นเดียวกับการ

เติบโตของผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์บนแผ่นรองรับที่ได้จากการทับถมของฟิล์มซิงค์อะซีเตท การปลูกแท่งนาโนบนชั้นล่อผลึกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีความสม่ำเสมอ แต่ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะไม่ตั้งตรงจากแผ่นรองรับและสังเกตเห็นแท่งนาโนมีลักษณะเหมือนดอกไม้ การสังเคราะห์แท่งนาโนบนแผ่นรองรับให้มีความเป็นผลึกที่ดี จะต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ บนชั้นล่อผลึกก่อนจะไปสังเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การเติบโตของแท่งนาโนที่ตั้งตรง ทำให้มีพื้นที่ผิวมากเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานทางด้านแก๊สเซนเซอร์

ในปี ค.ศ. 2009 เตา คอง และคณะ (Tao Kong; et al.2009: 344-350) ได้ศึกษาไบโอเซนเซอร์ตรวจจับกลูโคสโดยการตรึงเอนไซม์กลูโคสบนท่อนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเชื่อมไขว้ ท่อนาโนซิงค์ออกไซด์จะถูกสังเคราะห์มาจากระบวนการกัดกร่อนทางเคมีของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวทอง ท่อนาโนซิงค์ออกไซด์ถูกนำไปใช้ทางไบโอเซนเซอร์เพื่อทำการตรวจจับกลูโคสจากความเข้มข้น $50\text{ }\mu\text{M}$ ถึง $12\text{ }\mu\text{M}$ กับเวลาตอบสนอง 3 วินาที ซึ่งพบว่ามีค่าความไวในการตรวจจับเป็น $21.7\text{ }\mu\text{A}/\text{mM cm}^2$ ยิ่งไปกว่านั้นที่ความจำกัดในการทดลองตรวจจับเป็น $1\text{ }\mu\text{M}$ สามารถคำนวณค่าคงที่มิเคลิส เมนเทน ได้เป็น 19 mM หากจะเปรียบเทียบกับไบโอเซนเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบแบนราบและแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่าไบโอเซนเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีความไวในการตรวจจับมากกว่า จึงยืนยันได้ว่าท่อนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่สามารถปรับปรุงไบโอเซนเซอร์และประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆทางด้านชีวภาพ

ในปี ค.ศ. 2011 ฮาน ซีอ็อก คอยช์ และคณะ (Han-Seok Choi; et al.2011: 25-31) ได้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์บนแผ่นรองรับซิลิกอน กระจุกลวด และโพลีเอไมด์ จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารละลายของซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรตและเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน เพื่อศึกษาอิทธิพลของโพลีเอทิลีนเอมีน (PEI) ต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยพบว่าโพลีเอทิลีนเอมีนส่งผลต่อการควบคุมค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ สำหรับลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ถูกศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการสังเคราะห์จาก $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

ในปี ค.ศ. 2014 จี หยาง คิม และคณะ (Ji Yeong Kim; et al.2014: 216-220) ได้ศึกษาการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อนำไปใช้สำหรับตรึงเอนไซม์ในเซนเซอร์กลูโคส โดยพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับการปรับแต่งโดยการใช้น้ำล่อผลึกซิงค์ออกไซด์หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้น โดยเซนเซอร์กลูโคสขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ จากผลการทดลองยืนยันชัดเจนว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีความสำเร็จในการนำไปประยุกต์บนขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจจับกลูโคส นอกจากนี้ยังได้รับเงื่อนไข

การเติบโตของแท่งนาโนซึ่งต้องการคือมีความสูงและผอมเพื่อส่งผลต่อการมีพื้นที่ผิวในการตรึง
เอนไซม์กลูโคสมากยิ่งขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) มีวิธีการดำเนินงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$)

โปแตสเซียม เพอร์โรซยานาไนด์ ($\text{K}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$)

โปแตสเซียม เฮกซะไซยาไนด์เฟอร์เรต ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$)

โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase)

นาฟิออน (nafion)

กลูโคส (glucose)

น้ำปราศจากไอออน (deionized or DI)

3.1.2 อุปกรณ์

แผ่นซิลิกอน (silicon wafer)

แผ่นกระจกสไลด์ (glass slide)

พาราฟิล์ม (para film)

เทปทนความร้อน

แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (magnetic bar)

ขวดแก้วขนาด 100 ml

บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50, 100 และ 250 ml

เครื่องชั่งสารเคมีความละเอียด 0.0001 กรัม

เครื่องกวนสารเคมี (stirrer)

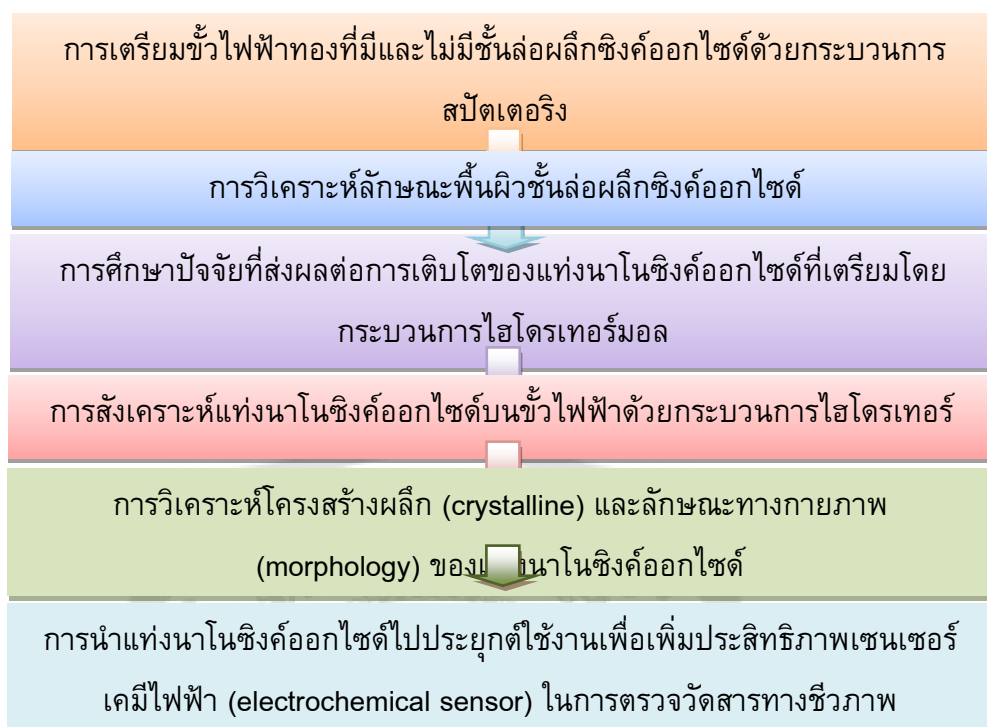
เครื่องให้ความร้อน (hot plate)

เครื่องสับตัดเตอริง (AJA interantional, ATC 2000-F)

เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat)

เตาอบไฟฟ้า (autoclave)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง



งานวิจัยนี้มีความจำเป็นต้องสร้างเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำการสร้างขั้วไฟฟ้าใช้งานก่อนนำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ไปสังเคราะห์บนขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งวัสดุที่เลือกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต้องมีคุณสมบัติเบื้องต้นคือ นำไฟฟ้าได้ดี และสามารถเป็นชั้นล่อผลึกสำหรับการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ ในงานวิจัยนี้จะเลือกสร้างขั้วไฟฟ้า 2 แบบ คือ (1) ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ทำจากทอง (gold: Au) หรือที่เรียกว่าขั้วไฟฟ้าทอง และ (2) ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ทำจากทองพร้อมทั้งเคลือบชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (ZnO seed layer) ด้านบน หรือที่เรียกว่า ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ โดยมีวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้ง 2 แบบ ซึ่งจะขอกล่าวในหัวข้อ 3.2.1

3.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทองที่มีและไม่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

3.2.1.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทองที่ไม่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (Au electrode)

ขั้วไฟฟ้าทองหรือฟิล์มบางทองบนแผ่นรองรับซิลิคอน (silicon wafer) ขนาด 0.5×2 cm ถูกเตรียมด้วยกระบวนการสปัตเตอริง จากเครื่องรุ่น AJA INTERNATIONAL, ATC 2000 - F แสดงดังภาพประกอบ 22 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 22 เครื่องสเป็คเตอรืกรุ่น AJA INTERNATIONAL, ATC 2000 – F

(1) ทำความสะอาดแผ่นรองรับซิลิกอนด้วยพลาสมา (plasma cleaning) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของฟิล์มดีซีเอ็น ซึ่งทำภายใต้เงื่อนไขการเตรียมดังตาราง 3

ตาราง 3 เงื่อนไขในการทำความสะอาดแผ่นรองรับซิลิกอนด้วยพลาสมา

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
แก๊สอาร์กอน (Ar)	50 sccm
กำลังไฟฟ้า (power)	30 วัตต์
ความดันขณะเคลือบ (operate pressure)	10 มิลลิทอร์
เวลา (time)	5 นาที

(2) ทำการเคลือบโครเมียมลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของฟิล์มทองบนแผ่นรองรับได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งทำภายใต้เงื่อนไขการเตรียมดังตาราง 4

ตาราง 4 เงื่อนไขในการเคลือบโครเมียม

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
แก๊สอาร์กอน (Ar)	20 sccm
กำลังไฟฟ้า (power)	100 วัตต์
ความดันขณะเคลือบ (operate pressure)	5 มิลลิทอร์
เวลา (time)	15 วินาที

(3) ทำการเคลือบทองบนแผ่นรองรับซิลิกอนที่ผ่านการเคลือบโครเมียม ซึ่งทำการเคลือบภายใต้เงื่อนไขการเตรียมดังตาราง 5

ตาราง 5 เงื่อนไขในการเคลือบทอง

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
แก๊สอาร์กอน (Ar)	20 sccm
กำลังไฟฟ้า (power)	100 วัตต์
ความดันขณะเคลือบ (operate pressure)	5 มิลลิทอร์
เวลา (time)	15 นาที

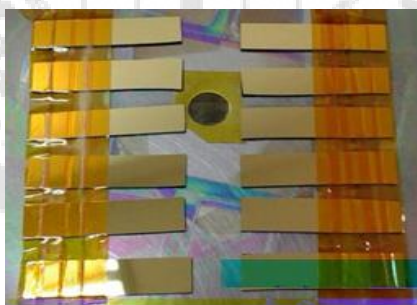
ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางทองบนแผ่นรองรับซิลิกอน จะได้ลักษณะ
ขั้วไฟฟ้าทองดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 ลักษณะขั้วไฟฟ้าทองที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการสัปดาห์

3.2.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (ZnO seed layer/Au electrode)

นำขั้วทองที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1.1 (ภาพประกอบ 23) ปิดด้วยเทปทึบความร้อนโดย
เหลือพื้นที่สำหรับเคลือบฟิล์มบางหรือชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ขนาดประมาณ 0.5×1 cm ดัง
ภาพประกอบ 24 ก่อนนำไปเคลือบด้วยกระบวนการสัปดาห์ โดยทำการเคลือบภายใต้เงื่อนไขการ
เคลือบดังตารางที่ 6



ภาพประกอบ 24 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทองสำหรับเคลือบชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์

ตาราง 6 เงื่อนไขในการเคลือบชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าทอง

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
แก๊สอาร์กอน (Ar)	40 sccm
แก๊สออกซิเจน (O_2)	80 sccm
กำลังไฟฟ้า (power)	98 วัตต์
ความดันขณะเคลือบ (operate pressure)	3.6 มิลลิทอร์
เวลา (time)	1.20, 2.40, 4 และ 5.20 นาที

เมื่อได้ขั้วไฟฟ้าใช้งานตามหัวข้อ 3.2.1.2 เรียบร้อย ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าใช้งานบางส่วนจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวด้วยเทคนิคการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมต่อไป

3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์

นำขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์จากขั้นตอนที่ 3.2.1.2 ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) รุ่น SPA 400 ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมรุ่น SPA 400

3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เป็นกระบวนการที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายหลักภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันคงตัว โดยงานวิจัยนี้เลือกศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 ชนิดของชั้นล่อผลึกโดยเลือกใช้ชั้นล่อผลึกทอง (ขั้วไฟฟ้าทอง) และชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์) เป็นแผ่นรองรับ

3.2.3.2 ความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ โดยทำการแปรค่าความหนาของชั้นล่อผลึกเป็น 10, 20, 30 และ 40 นาโนเมตร (nm) ตามลำดับ

3.2.3.3 เวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ โดยทำการแปรค่าเวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์เป็น 30 min, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง (h) ตามลำดับ

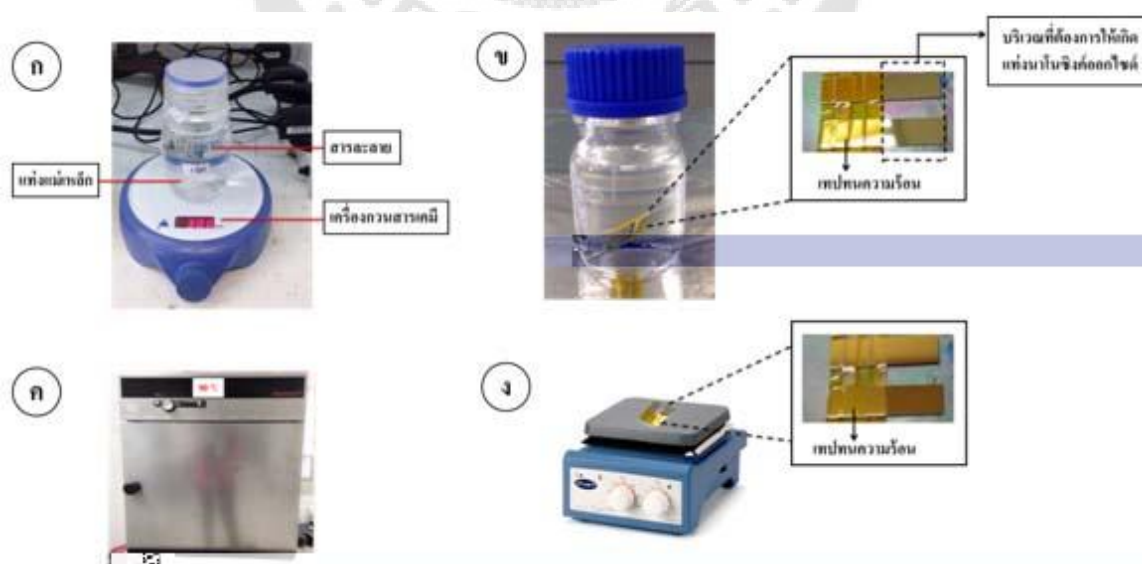
3.2.3.4 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยทำการแปรค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 มิลลิโมลาร์ (mM) ตามลำดับ

ทั้งนี้กระบวนการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ทดลองงานวิจัยสามารถทำได้ดังหัวข้อ

3.2.4

3.2.4 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 กระบวนการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (ก) การเตรียมสารละลาย (ข) การเตรียมชิ้นงานเป็นแผ่นรองรับ (ค) การอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 °C และ (ง) การทำความสะอาดชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ (1) เตรียมสารละลายซึ่งคั้นในเตรตเฮกซะไฮโดรตและเฮกซะเมทิลีนเตตระมาดัมผสมกับน้ำปราศจากไอออน นำแท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารใส่ในสารละลายและปิดขวดแก้วด้วยพาราฟิล์ม ก่อนนำไปวางบนเครื่องกวนสารเคมี ปรับอัตราการหมุนของแท่งแม่เหล็ก 300 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ดังภาพประกอบ 26 (ก)

ขั้นตอนที่ (2) เตรียมขั้วไฟฟ้าที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1 เป็นแผ่นรองรับสำหรับสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยนำขั้วไฟฟ้าติดบนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งใช้เทปทนความร้อนปิดขั้วไฟฟ้าให้เหลือเพียงด้านเดียว (บริเวณที่ไม่ได้ปิดเทปทนความร้อนคือ บริเวณที่ต้องการให้เกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์) จากนั้นจุ่มลงในสารละลายที่ผ่านการกวนสารเคมีจากขั้นตอนที่ 1 และปิดฝาขวดแก้วให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย ดังภาพประกอบ 26 (ข)

ขั้นตอนที่ (3) นำขวดแก้วที่ใส่แผ่นรองรับสำหรับสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จากขั้นตอนที่ 2 เข้าตู้อบซึ่งปรับอุณหภูมิไว้ที่ 90°C ตั้งไว้ตามระยะเวลาที่ต้องการ ดังภาพประกอบ 26 (ค)

ขั้นตอนที่ (4) นำแผ่นรองรับที่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อล้างคราบที่ตกค้างออก ก่อนนำไปวางบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ดังภาพประกอบ 26 (ง) รอให้ชิ้นงานแห้งสนิทก่อนนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้นต่อไป

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขดังต่อไปนี้

3.2.4.1 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดชั้นล่อผลึกเป็นชั้นล่อผลึกทองและซิงค์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ดังตาราง 7

ตาราง 7 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดชั้นล่อผลึก

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
ชนิดแผ่นรองรับ	แผ่นซิลิกอน (silicon wafer)
ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	10 mM
เวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์	6 h
อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์	90°C
ความหนาชั้นล่อผลึก	40 nm
ชนิดชั้นล่อผลึก	ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ ทอง (Au)

3.2.4.2 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ดังตาราง 8

ตาราง 8 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นล่อผลึก

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
ชนิดแผ่นรองรับ	แผ่นซิลิกอน
ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	10 mM
เวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์	6 h
อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์	90 °C
ความหนาชั้นล่อผลึก	10, 20, 30 และ 40 nm

3.2.4.3 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ดังตาราง 9

ตาราง 9 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
ชนิดแผ่นรองรับ	แผ่นซิลิกอน
ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	10 mM
อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์	90 °C
ความหนาชั้นล่อผลึก	30 nm
เวลาที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์	0.5, 2, 4 และ 6 h

3.3.5.4 การสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ดังตาราง 10

ตาราง 10 เงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ชนิดของตัวแปร	ช่วงในการควบคุม
ชนิดแผ่นรองรับ	แผ่นซิลิกอน
เวลาสำหรับการสังเคราะห์	6 h
อุณหภูมิสำหรับการสังเคราะห์	90 °C
ความหนาชั้นล่อผลึก	30 nm
ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	1, 10, 20, 30 และ 40 mM

3.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystalline) และลักษณะทางกายภาพ (morphology) ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

3.2.5.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAX III ดังภาพประกอบ 27 โดยมีเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 11



ภาพประกอบ 27 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAX III

ตาราง 11 เงื่อนไขการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

เงื่อนไขการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	ค่าที่ใช้
มุมเริ่มต้น (start [deg.])	20
มุมสิ้นสุด (end [deg.])	60 และ 80
ระดับการปรับค่ามุม (step [deg.])	0.0200
อัตราเร็ว (speed [deg./min])	3.00

3.2.5.2 ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น 4700 ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น 4700

3.2.6 การนำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) ในการตรวจวัดสารทางชีวภาพ

ภายหลังจากได้ขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำขั้วไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการตรวจวัดคุณภาพทางไฟฟ้าด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท ดังภาพประกอบ 11 ซึ่งจะทดสอบปริมาณการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวขั้วไฟฟ้าเป็นหลัก โดยมีกระบวนการทดสอบดังต่อไปนี้

3.2.6.1 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ โพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-/-3-}$ ความเข้มข้น 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.1 M ในน้ำปราศจากไอออน

200 ml และสารละลายกลูโคสปริมาณ 10 และ 20 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งปริมาณสารที่ใช้ถูกแสดงดังตาราง 12

ตาราง 12 ปริมาณสารเคมีที่ใช้สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ชื่อสาร	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
โปแตสเซียม เฟอร์โรไซยาไนด์	0.3292
โปแตสเซียม เฮกซะไซยาไนด์เฟอร์เรต	0.4224
โพแทสเซียมคลอไรด์	1.49
กลูโคส	0.09 และ 0.18

3.2.6.2 การตรึงเอนไซม์บนขั้วไฟฟ้า

เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสปริมาณ 20 μ l ถูกหยด (drop) บนขั้วไฟฟ้าและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 h ก่อนจะหยดสารละลายนาฟิออนความเข้มข้น 5% ปริมาณ 10 μ l และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 h ก่อนนำไปตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทม (cyclic voltammetry: CV)

3.3.6.3 ตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทม

สำหรับการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทม จะถูกควบคุมภายใต้เงื่อนไขดังตาราง 13

ตาราง 13 เงื่อนไขการตรวจวัดด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทมเมตรี

เงื่อนไข	ช่วงในการควบคุม
ช่วงศักย์ไฟฟ้า	-0.6 V ถึง +1.0 V
อัตราการสแกน (scan rate)	0.05 mV/s
จำนวนรอบการวิเคราะห์	10
ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver/silver chloride)
ขั้วไฟฟ้าช่วย	โลหะแพลทินัม (Pt)
ขั้วไฟฟ้าใช้งาน	ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่เตรียมได้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือศึกษาลักษณะทางกายภาพ (morphology) ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs) ที่ได้รับการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal process) และการประยุกต์ใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาดังต่อไปนี้

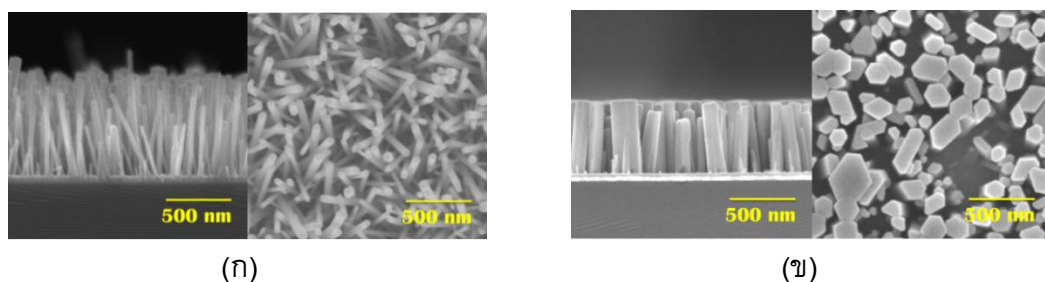
- 4.1 การศึกษาอิทธิพลของชั้นล่อผลึกที่มีต่อการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์
- 4.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์
- 4.3 การทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวัดสารชีวภาพ

4.1 การศึกษาอิทธิพลของชั้นล่อผลึกที่มีต่อการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

ชั้นล่อผลึกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนสำคัญในการใช้เป็นฐานรองรับการเกิดนิวเคลียสและผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ดังนั้น ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จึงมีอิทธิพลต่อการเตรียมชั้นล่อผลึกซึ่งแสดงถึงผลการทดลองต่อไปนี้

4.1.1 ผลการศึกษาชนิดของชั้นล่อผลึกทอง (Au seed layer) และชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ (ZnO seed layer) ที่มีต่อลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

ชั้นล่อผลึกทองและซิงค์ออกไซด์ถูกเตรียมด้วยวิธีการเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC magnetron sputtering) บนแผ่นรองรับซิลิกอนระนาบ (100) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.1 ก่อนนำไปสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10 mM อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 6 h และนำไปศึกษาลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM)



ภาพประกอบ 29 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะภาคตัดขวาง (cross - section) และพื้นผิว (surface) ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์บนชั้นล่อผลึก (ก) ซิงค์ออกไซด์ และ (ข) ทอง ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารตั้งต้น 10 mM เวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ 6 h ที่อุณหภูมิ 90 °C

ภาพประกอบ 29 แสดงลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งภาพลักษณะภาคตัดขวางสามารถหาขนาดความสูง (length) และภาพลักษณะพื้นผิวสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้จากการวัดค่าที่ได้จากภาพถ่าย จากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ยจากวิธีการกระจายตัวแบบเกาส์ (gaussian distribution) ซึ่งขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถนำไปหาอัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหรือที่เรียกว่าค่าเอสเปกต์เรโช (aspect ratio: AR) ได้ดังสมการ (21) ในขณะที่ความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ขอเรียกว่า ความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (density of ZnO NRs) นั้น สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังสมการที่ (22) โดยค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดจะแสดงดังตาราง 14

$$AR = \frac{\text{ความสูงแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (nm)}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (nm)}} \quad (21)$$

$$\text{ความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์} = \frac{\text{จำนวนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (rods)}}{\text{หน่วยพื้นที่ (nm}^2\text{)}} \quad (22)$$

ตาราง 14 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรเปลี่ยนชนิดชั้น
ล่อผลึกเป็นชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และทอง ตามลำดับ

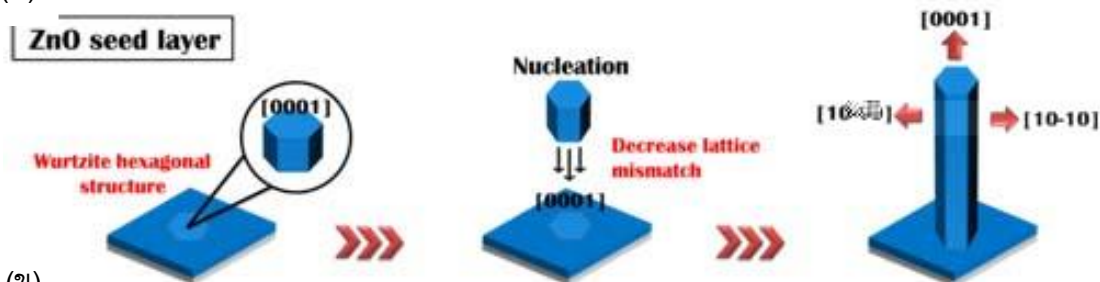
ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์	แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ สังเคราะห์บนชั้นล่อ ผลึกซิงค์ออกไซด์	แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์บนชั้นล่อ ผลึกทอง
ความสูง (nm)	732	530
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	61	116
ความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (per μm^2) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	53	35
อัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	11.66	4.57
พื้นที่ผิวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (μm^2)	7.20	6.81

จากตาราง 14 พบว่า ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เหมือนกันแต่เปลี่ยนแปลงชนิดชั้นล่อผลึกเป็นซิงค์ออกไซด์และทองนั้น ขนาดความสูงของแท่งนาโนที่สังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มีค่ามากกว่าแท่งนาโนบนชั้นล่อผลึกทองประมาณ 202 nm ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซึ่งสังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มีค่าน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนที่สังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกทองเป็น 55 nm ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 2 เท่า ส่งผลให้ลักษณะแท่งนาโนที่สังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มีค่าความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ อัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ และพื้นที่ผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มากกว่าลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกทอง

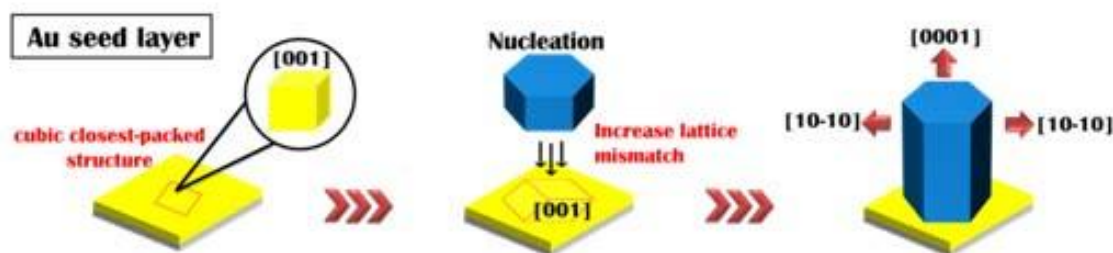
จากผลการทดลอง พบว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ตกผลึกบนแผ่นรองรับซิงค์ออกไซด์ ผลึกซิงค์ออกไซด์นั้นมีการกระจายทั่วทั้งพื้นผิว และมีความหนาแน่นมากดังภาพประกอบ 29 (ก) เนื่องจากชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างชนิดเดียวกันกับซิงค์ออกไซด์ที่ตกผลึก จึงช่วยลดปัญหาการไม่เข้ากันของแลตทิซ (lattice mismatch) ระหว่างนิวเคลียสผลึกและชั้นล่อผลึก (Z. H. Ibupoto.; et al. 2013: 3584-3597) ในขณะที่ ซิงค์ออกไซด์ที่ตกผลึกบนแผ่นรองรับทอง ซึ่งมีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (cubic closest-packed structure (ccp)) เกิดความไม่เข้ากันของโครงสร้าง แต่เนื่องจากโครงสร้างทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน จึงยังสามารถส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์เติบโตเป็นแบบโครงสร้างเฮกซะโกนอลได้

ทั้งนี้ กระบวนการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นเกิดจากการแข่งขันการเติบโตในระนาบ (0001) หรือระนาบตามแกน c และระนาบ (10 $\bar{1}$ 0) หรือ ระนาบตามแกน a หากเปรียบเทียบอัตราการแข่งขันการเติบโตของผลึกซิงค์ออกไซด์ทั้ง 2 ระนาบ จะพบว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีการเติบโตตามระนาบแกน c มากกว่า แกน a เนื่องจาก พลังงานอิสระเชิงพื้นผิวของระนาบแกน c ซึ่งมีค่าเป็น 2.0 J/m² มากกว่าค่าพลังงานอิสระเชิงพื้นผิวของระนาบแกน a ที่มีค่าเป็น 1.16 J/m² (P. Kasamechongchun; et al. 2015: 394-400) ส่งผลให้ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีขนาดความสูงมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างเห็นได้ชัด ท้ายที่สุด ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติบโตบนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์จึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยแต่ขนาดความสูงมาก ดังแบบจำลองในภาพประกอบ 30 (ก) ในขณะที่ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งเติบโตบนชั้นล่อผลึกทองจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากแต่ขนาดความสูงน้อย ดังภาพประกอบ 30 (ข)

(ก)



(ข)



ภาพประกอบ 30 แบบจำลองอิทธิพลของ (ก) ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ และ (ข) ชั้นล่อผลึกทองต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

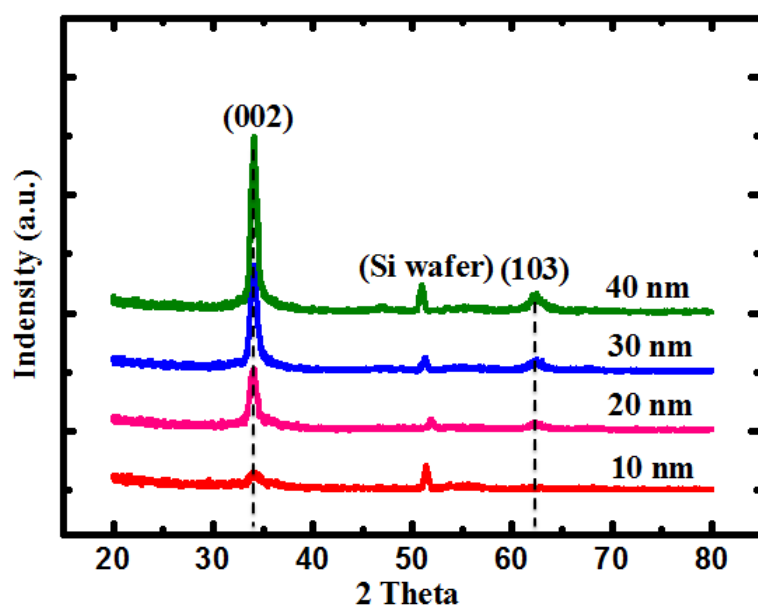
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เป็นแผ่นรองรับที่ใช้ในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อไป

4.1.2 ผลการศึกษาความหนาแน่นของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

จากหัวข้อ 4.1.1 เป็นการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนชั้นล่อผลึกทองและซิงค์ออกไซด์ ซึ่งพบว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถตกผลึกบนชั้นล่อผลึกทั้งสองชนิดได้ แต่เนื่องจากชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าได้ค่อนข้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นล่อผลึกทองที่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้น หากจะนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกขนาดความหนาของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ให้น้อยที่สุดในขณะที่ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ยังสามารถเป็นแผ่นรองรับการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะของแท่งนาโนที่ตั้งตรง (alignment vertical) และมีความสม่ำเสมอ (uniform) มากที่สุด ดังนั้นหัวข้อนี้ จะทำการศึกษาความหนาแน่นของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยการแปรค่าความหนาแน่นของผลึกเป็น 10, 20, 30 และ 40 nm ซึ่งแต่ละความหนาแน่นของผลึกซิงค์ออกไซด์จะถูกเตรียมด้วยวิธีการเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ภายใต้สภาวะที่เป็นสุญญากาศ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 98 วัตต์ ความดันขณะทำการเคลือบ 3.7 มิลลิทอร์ และใช้อัตราการเคลือบ เป็น 0.125 นาโนเมตรต่อวินาที

4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีความหนาต่างกัน

ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction) แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบ 31 จากภาพประกอบ พบว่า ลักษณะพีค (peak) ปรากฏเด่นชัดที่ตำแหน่งมุม 2 Theta (2θ) เป็น 34.4 และ 63 องศา ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS พบว่า ตรงกับโครงสร้างเวทซ์ไฮท์เฮกเชโกนอลเลขที่ 36-1451 โดยมีมุมที่ปรากฏมีระนาบ (002) และ (103) ตามลำดับ เมื่อความหนาแน่นของผลึกซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมที่พื้นผิวมีความเป็นผลึก (crystallinity) สูงยิ่งขึ้น โดยพิจารณาจากความกว้างพีคที่แคบลง เมื่อนำค่าความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง (full-width at half maximum: FWHM) ของระนาบ (002) มาทำการคำนวณหาขนาดเกรนของผลึกซิงค์ออกไซด์ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (23)



ภาพประกอบ 31 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เมื่อความหนาเป็น 10, 20, 30 และ 40 nm ตามลำดับ

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos \theta$$

(23)

เมื่อ

D คือ ขนาดเกรน

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ตกกระทบบ สำหรับ $\text{CuK}\alpha$

θ คือ ตำแหน่งมุมหักเหของคลื่นตกกระทบบ (กราฟ XRD จะให้ค่ามุมเป็น 2θ)

β คือ ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง (เรเดียน)

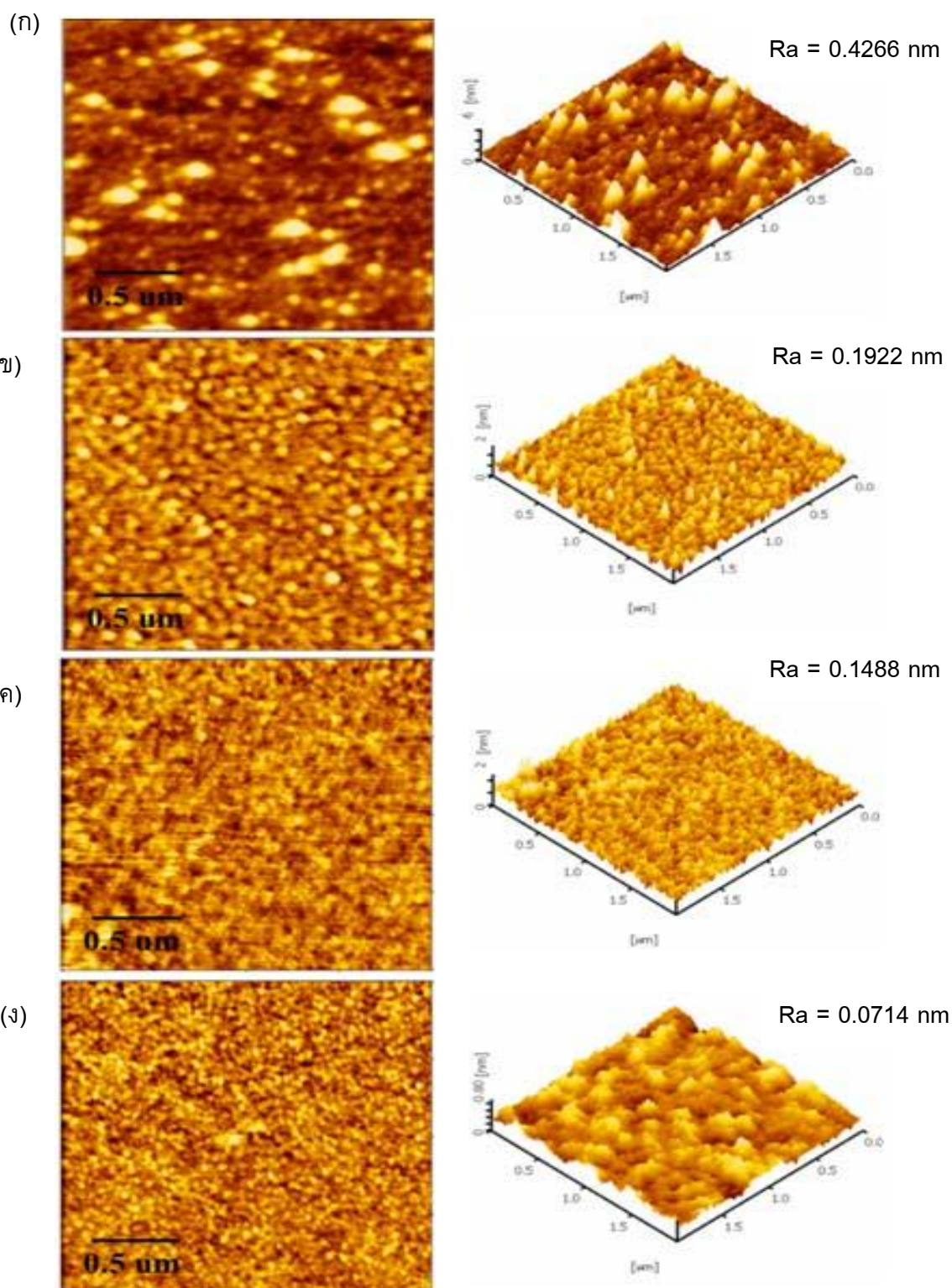
ผลการคำนวณดังสมการ (23) แสดงดังตารางที่ 15 จากตารางพบว่าเมื่อความหนาของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดเกรนของระนาบ (002) สูงมากขึ้นตามลำดับ

ตาราง 15 ขนาดความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง และเกรนเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์

ความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์	FHMW (°)	Grain size (nm)
10	1.178	9.76
20	0.994	11.57
30	0.783	14.69
40	0.774	14.86

4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ความหนาต่างกัน

จากการนำชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) แสดงดังภาพประกอบ 32 พบว่า เมื่อความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 10 nm ถึง 40 nm ส่งผลให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวชั้นล่อผลึก (Roughness average: Ra) ลดลง โดยขนาดความขรุขระของพื้นผิวชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ความหนา 10, 20 และ 30 nm มีค่าเป็น 0.4266, 0.1922 และ 0.1488 nm ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ 40 nm มีความขรุขระเป็น 0.0714 nm ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ความหนา 40 nm มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นผลึกมากกว่าชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ความหนาอื่นๆ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ยืนยันว่า ความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ 40 nm มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นผลึกที่ดีขึ้น

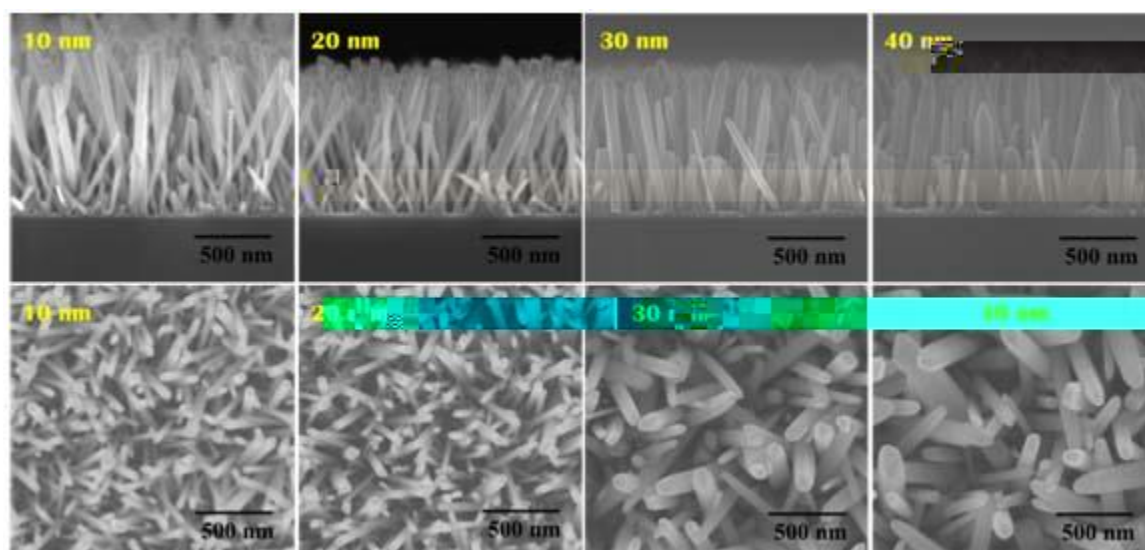


ภาพประกอบ 32 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมแสดงลักษณะพื้นผิว

ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีความหนาเป็น (ก) 10 nm (ข) 20 nm (ค) 30 nm และ (ง) 40 nm

4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ต่างกัน

แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขที่มีความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 mM อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 6 h บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ความหนาต่างๆเป็น 10, 20, 30 และ 40 nm จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพประกอบ 33



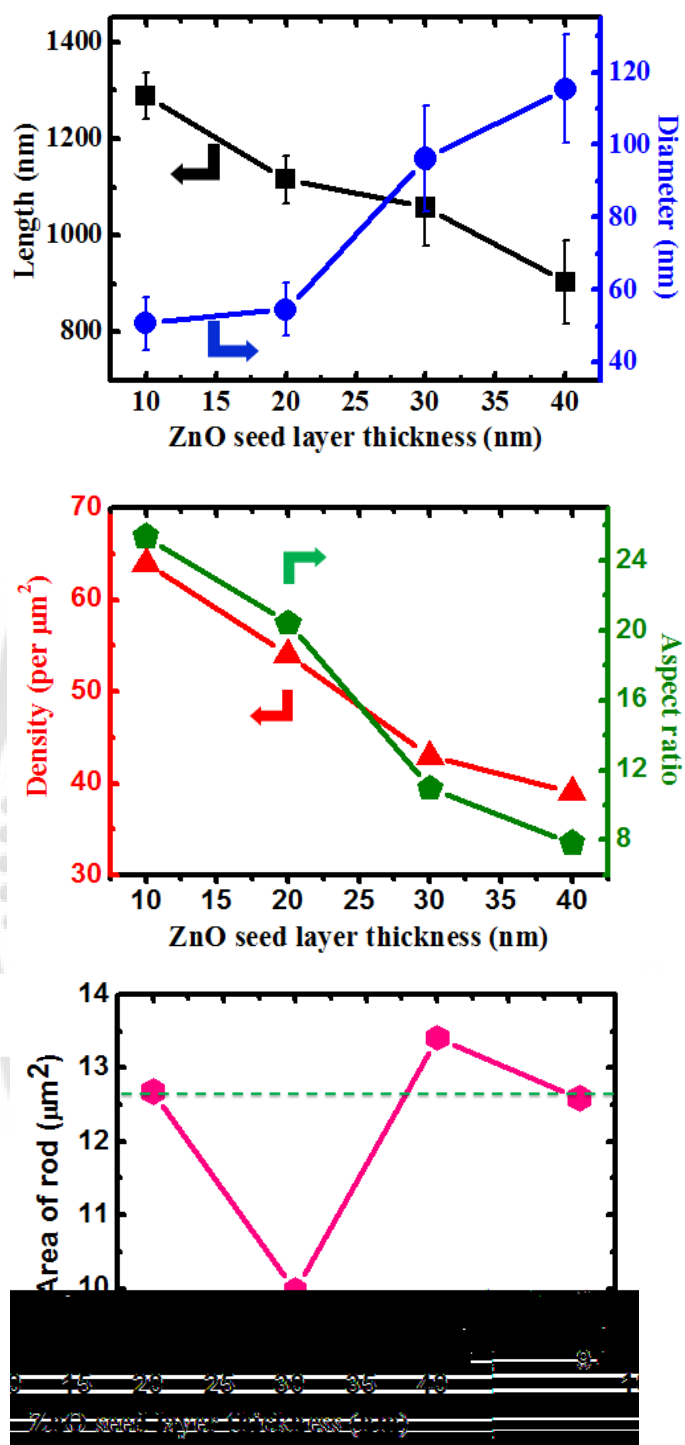
ภาพประกอบ 33 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะภาคตัดขวาง และพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารตั้งต้น 10 mM เวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ 6 h ที่อุณหภูมิ 90 °C เมื่อความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 nm ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 33 แสดงลักษณะภาพภาคตัดขวางและภาพพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เมื่อนำมาหาขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง รวมถึงค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้จากสมการ (21) และ (22) ตามลำดับ โดยข้อมูลที่คำนวณได้แสดงดังตาราง 16

ตาราง 16 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าความหนา
ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์

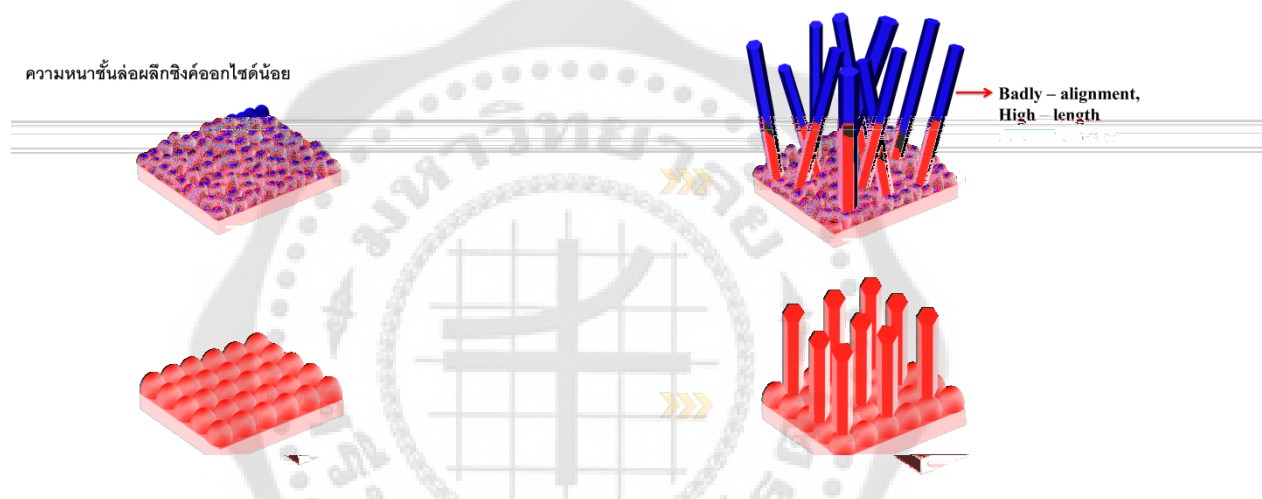
ลักษณะทางกายภาพแท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์	ความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์			
	10 nm	20 nm	30 nm	40 nm
ความสูง (nm)	1288	1115	1057	903
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	50	55	96	115
ความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออก ไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (per μm^2)	64	54	43	39
อัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์	25.37	20.43	11	7.83
พื้นที่ผิวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (μm^2)	12.68	9.98	13.41	12.59

จากตาราง 16 หากเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อ
สังเคราะห์โดยการแปรค่าความหนาของชั้นล่อผลึกนั้น พบว่า เมื่อความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์
เพิ่มขึ้น ขนาดความสูงของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ลดลง ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งนาโน
ซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 34 (ก) ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนแท่งนาโนซิงค์ออก
ไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มี
ค่าลดลง ดังภาพประกอบ 34 (ข) ตามลำดับ ในขณะที่ พื้นที่ผิวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งได้จากการ
สังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ความหนา 10 ถึง 40 nm มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันในช่วง 12.5
ถึง 13.5 μm^2 ดังภาพประกอบ 34 (ค)



ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง (ข) ความหนาแน่นของนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และอัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และ (ค) พื้นที่ผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์กับความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 nm

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า การเพิ่มความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ ส่งผลโดยตรงต่อขนาดเกรนของพื้นผิวชั้นล่อผลึกที่เพิ่มมากขึ้น (H. Ghayour.; et al. 2011: 101-105) (ตารางที่ 15) ดังนั้นลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ขนาดความสูงลดลง และหากพิจารณาถึงลักษณะการตั้งตรง (well - aligned) ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า เมื่อความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อพลังงานสะสมบนพื้นผิว (cumulative energy) ชั้นล่อผลึกที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้น พื้นผิวชั้นล่อผลึกจึงมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น (high crystallinity) ลักษณะของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จึงมีความตั้งตรงมากยิ่งขึ้น ดังแบบจำลองการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แบบจำลองอิทธิพลของความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

4.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

จากหัวข้อที่ 4.1 เป็นการศึกษาชนิดและความหนาชั้นล่อผลึก ซึ่งพบว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งบนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และทอง โดยแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีความหนาสูงเหมาะสมจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ แต่ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่หนานั้นอาจส่งผลต่อการนำไฟฟ้าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า ในหัวข้อนี้จึงต้องการหาเงื่อนไขในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะตั้งตรง และมีความหนาแน่นมากที่สุด โดยพบว่า ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีความหนา 30 nm (จากในหัวข้อ 4.1.2) สามารถนำมาใช้เป็นแผ่นรองรับที่สอดคล้องกับความต้องการในงานวิจัยนี้ และนอกจากการเตรียมชั้นล่อผลึกที่เหมาะสมแล้วยังต้องทำการหาเงื่อนไขใน

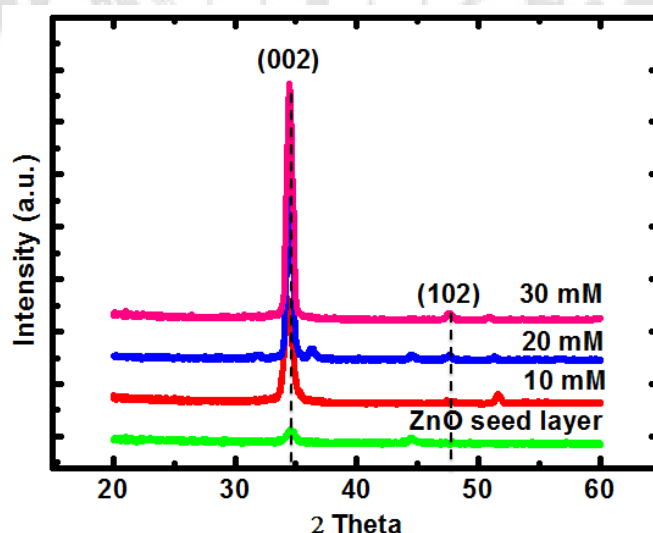
การเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยการแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้น และเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อลักษณะทางกายภาพและพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยตรง โดยมีรายละเอียดผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นสารตั้งต้นที่มีต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

การทดลองนี้ ทำการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ความหนา 30 nm ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 h และความเข้มข้นที่แปรเปลี่ยนเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 mM ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้น

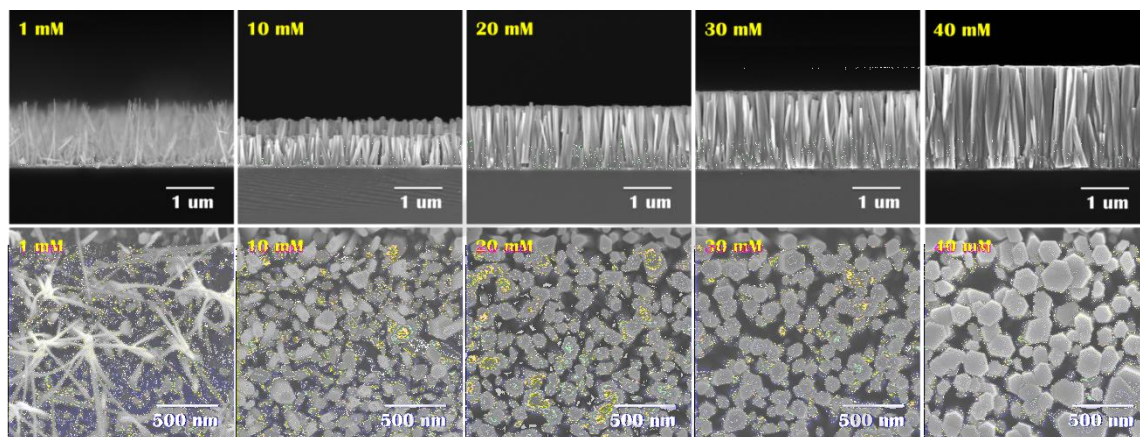
โครงสร้างผลึกของตัวอย่างวิเคราะห์โดย เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังภาพประกอบ 36 พบว่า ลักษณะพีคปรากฏเด่นชัดที่ตำแหน่งมุม 34.4 และ 47.54 องศา ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS ตรงกับโครงสร้างเวทท์ไซต์เฮกซะโกนอลเลขที่ 36-1451 โดยมุมที่ปรากฏตรงกับระนาบ (002) และ (102) ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่แปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้นสามารถใช้เตรียมซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลได้



ภาพประกอบ 36 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่มีการแปรค่าเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10, 20, และ 30 mM ตามลำดับ

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้น

ภายหลังการนำชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพประกอบ 37



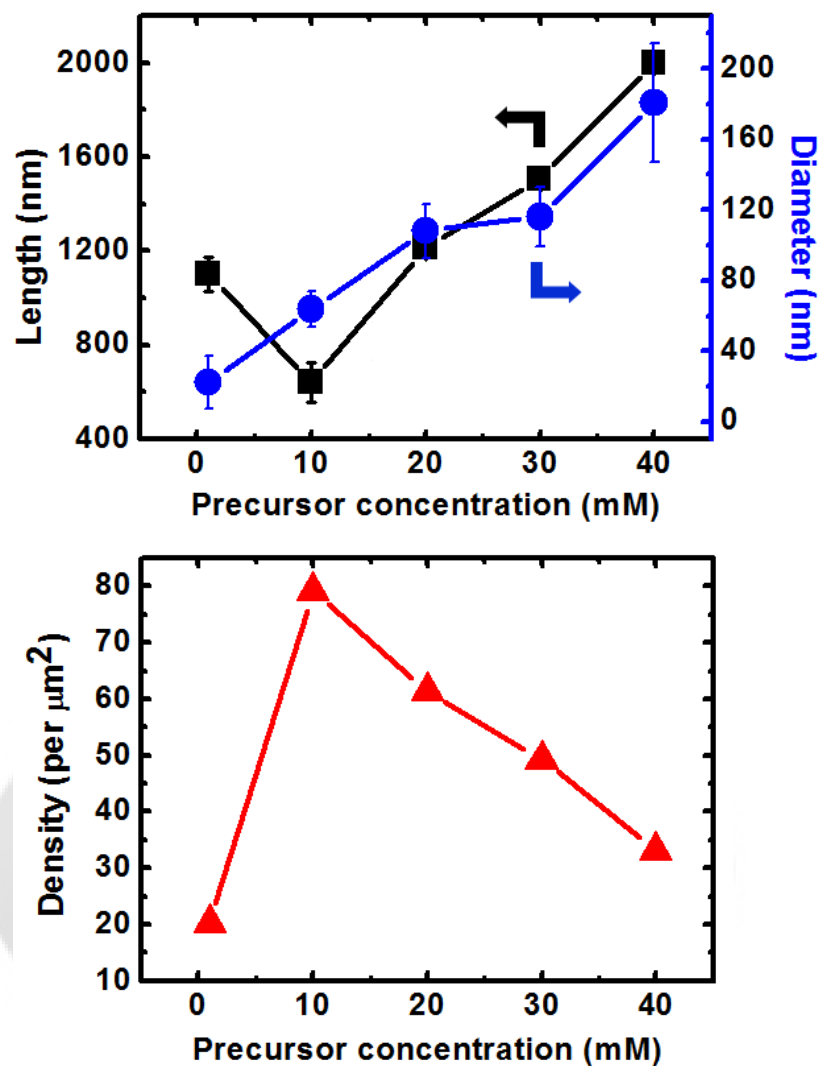
ภาพประกอบ 37 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะภาคตัดขวางและพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ 6 h ที่อุณหภูมิ 90 °C เมื่อแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 mM ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 37 แสดงลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งภาพลักษณะภาคตัดขวางและลักษณะพื้นผิว สามารถนำมาหาขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง รวมถึงค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้จากสมการ (21) และ (22) ตามลำดับ โดยข้อมูลที่คำนวณได้แสดงดังตาราง 17

ตาราง 17 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้น

ลักษณะทางกายภาพแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	ความเข้มข้นสารตั้งต้น				
	1 mM	10 mM	20 mM	30 mM	40 mM
ความสูง (nm)	1100	640	1214	1504	2000
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	22	63	108	115	180
ความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (per μm^2)	20.22	79.11	61.33	49.33	31.11
อัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	48.88	10.04	11.25	12.96	11.08
พื้นที่ผิวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (μm^2)	2.23	9.92	22.67	26.32	34.45

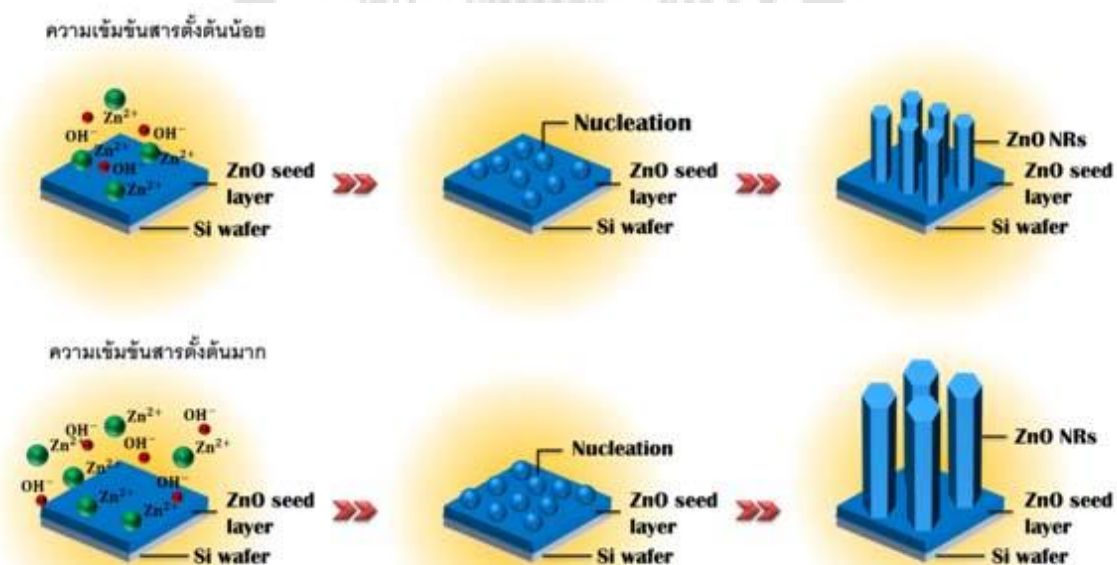
จากการนำข้อมูลดังตาราง 17 มาทำการหาลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้น พบว่า ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 1 mM สามารถสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีความสูงถึง 1100 nm ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงแค่ 22 nm เท่านั้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10 ถึง 40 mM พบว่า ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 17 จึงได้ทำการสร้างเป็นความสัมพันธ์ของกราฟความเข้มข้นสารตั้งต้นเทียบกับความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แสดงดังภาพประกอบ 38 (ก) และเทียบกับความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แสดงดังภาพประกอบ 38 (ข)



ภาพประกอบ 38 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง และ (ข) ความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับการแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 mM ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 38 พบว่า ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 1 mM มีค่าความเข้มข้นของสารละลายมากกว่าความเข้มข้นวิกฤติที่ใช้ควบคุมการเติบโตตามแนวแกน c หรือค่า c^* แต่น้อยกว่าความเข้มข้นวิกฤติที่ใช้ควบคุมการเติบโตตามแนวแกน a หรือค่า a^* (P. Kasamechonchung.; et al. 2015: 394-400) ส่งผลให้ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีขนาดความสูงมาก ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอัตราส่วนระหว่างจำนวนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่น้อยที่สุด แต่หากพิจารณาในช่วงความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 ถึง 40 mM พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารละลายมีมากกว่าความเข้มข้นวิกฤติที่ใช้ควบคุมการเติบโตตามแนวแกน c และแกน a ส่งผลให้ลักษณะแท่งนาโนซิงค์

ออกไซด์ที่ได้มีขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสารตั้งต้น แต่หากพิจารณาที่ความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ พบว่า เมื่อความเข้มข้นสารตั้งต้นเพิ่มจาก 10 mM ถึง 40 mM ความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ก็ลดลง ทั้งนี้เกิดจากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้น ส่งผลให้ศักย์ทางเคมีของซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 1 (บทที่ 2) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การตกผลึกของนิวเคลียสผลึก (nucleation) มีจำนวนมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อรักษาสสมดุลศักย์ทางเคมีระหว่างซิงค์ไอออนในสารละลาย ส่งผลให้ความหนาแน่นของนิวเคลียสผลึกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากขึ้นตามความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากในช่วงการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นการแข่งขันกันเติบโตระหว่างระนาบแกน c (ขนาดความสูง) และระนาบแกน a (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสารตั้งต้น ความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงลดลง ดังแบบจำลองในภาพประกอบ 39 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกความเข้มข้นที่ 10 mM เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อไป



ภาพประกอบ 39 แบบจำลองอิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

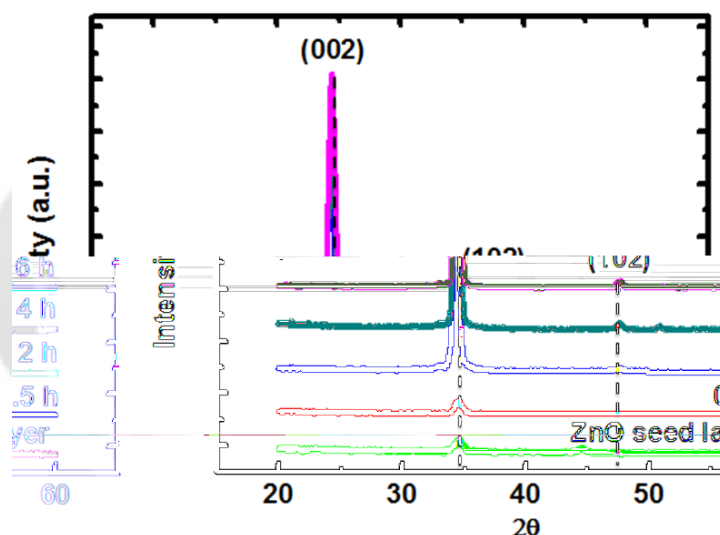
4.2.2 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่มีต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

การทดลองนี้ ทำการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่มีความหนา 30 nm ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขที่มีความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 mM

อุณหภูมิ 90°C และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แปรเปลี่ยนเป็น 30 min, 2, 4 และ 6 h ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

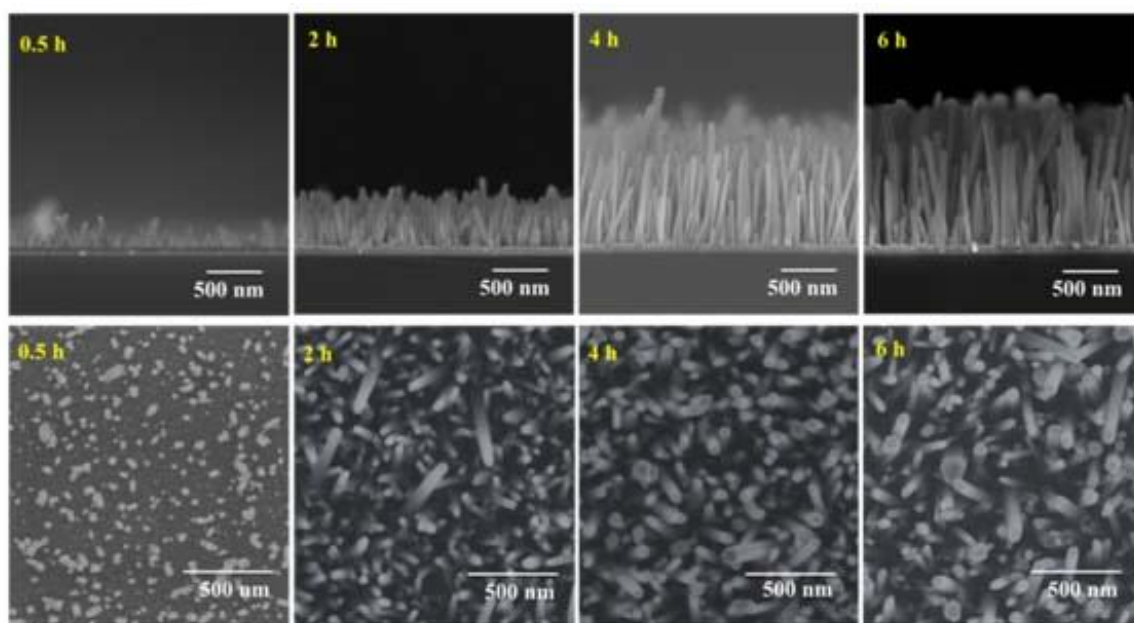
โครงสร้างผลึกของตัวอย่างวิเคราะห์โดย เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังภาพประกอบ 40 พบว่า ลักษณะพีคปรากฏเด่นชัดที่ตำแหน่งมุม 34.4 และ 47.54 องศา ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS ตรงกับโครงสร้างเวทซ์ไฮท์เฮกเชโกนอนเลขที่ 36-1451 โดยมีมุมที่ปรากฏตรงกับระนาบ (002) และ (102) ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่แปรค่าเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์สามารถใช้เตรียมซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอนได้



ภาพประกอบ 40 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่มีการแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 30 min, 2, 4 และ 6 h ตามลำดับ

4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

ภายหลังการนำชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยการแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพประกอบ 41



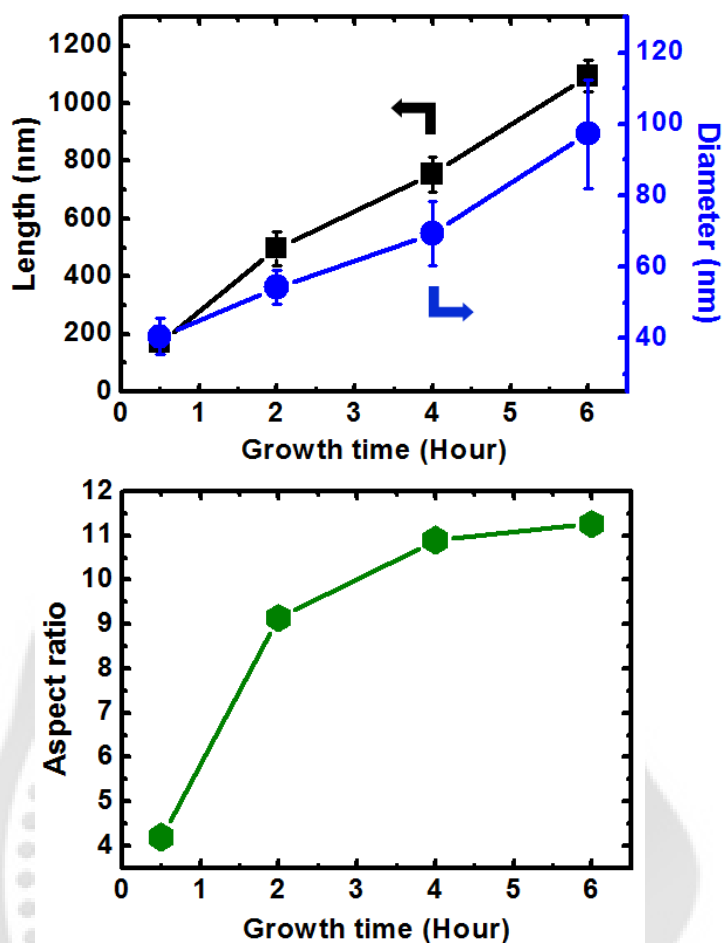
ภาพประกอบ 41 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะภาคตัดขวางและพื้นผิวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10 mM อุณหภูมิ 90 °C และแปรค่าเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เป็น 30 min (0.5 h), 2, 4 และ 6 h ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 41 แสดงลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งภาพลักษณะภาคตัดขวางและลักษณะพื้นผิว สามารถนำมาหาขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง รวมถึงค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้จากสมการ (21) และ (22) ตามลำดับ โดยข้อมูลที่คำนวณได้แสดงดังตาราง 18

ตาราง 18 ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	เวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์			
	30 min	2 h	4 h	6 h
ความสูง (nm)	169	496	754	1094
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	40	54	69	97
อัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์	4.19	9.14	10.89	11.26
ความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (per μm^2)	33	97	84	63
พื้นที่ผิวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (μm^2)	0.71	8.16	13.48	23.83

นำข้อมูลดังตาราง 18 มาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์จาก 30 min ถึง 6 h ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 18 จึงได้ทำการสร้างเป็นความสัมพันธ์ของกราฟเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เทียบกับความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แสดงดังภาพประกอบ 42 (ก) และเทียบกับอัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ แสดงดังภาพประกอบ 42 (ข)



ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง (ข) อัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์กับการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เป็น 30 min, 2, 4 และ 6 h ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 42 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์จาก 30 min จนถึง 6 h ขนาดความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนระหว่างขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นปัจจัยที่ควบคุมระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารละลายตามสมการที่ (1) – (5) (บทที่ 2) และการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ตามแนวแกน c และแกน a

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 6 h เพื่อให้ได้ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าเอสเปคต์เรโช (aspect ratio: AR) สูงที่สุดเป็นเงื่อนไขในการเตรียมเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อไป

4.3 การทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวิเคราะห์สารชีวภาพ

สำหรับหัวข้อนี้ จะนำเสนอประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้กับขั้วไฟฟ้าใช้งาน 3 แบบ ประกอบด้วย (1) ขั้วไฟฟ้าทองเปล่า (Au blank electrode) (2) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs/ Au blank electrode) และ (3) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs/ ZnO seed layer/Au blank electrode) งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างกลูโคสเป็นสารทางชีวภาพที่ใช้สำหรับตรวจวัด โดยการทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้ง 3 แบบนั้น เริ่มจากการตรวจวัดสัญญาณเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้ง 3 แบบเพื่อวิเคราะห์ผลสัญญาณก่อนนำไปตรึงสารชีวภาพ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าใช้งานเหล่านี้ไปตรึง (Immobilization) ด้วยสารทางชีวภาพที่มีความจำเพาะเจาะจงกับกลูโคส ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส โดยใช้วิธีการตรึงแบบการดูดซับบนพื้นผิว (absorption) แล้วนำขั้วไฟฟ้าใช้งานเหล่านี้ไปตรวจวัดสัญญาณเคมีไฟฟ้าอีกครั้ง แต่เนื่องจากการเกาะติดของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสบนขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้ง 3 แบบ นั้นเป็นการยึดเกาะโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) หากนำไปใช้งานจริงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสอาจจะหลุดจากขั้วไฟฟ้าใช้งานได้ง่าย ทำให้ประสิทธิภาพในการนำไปการตรวจวัดปริมาณกลูโคสของขั้วไฟฟ้าใช้งานเหล่านี้ลดน้อยลง จึงจำเป็นต้องทำการตรึงสารละลายที่เป็นเนื้อเยื่อพอลิเมอร์หรือเรียกว่าสารละลายนาฟิออน (nafion) บนเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส เพื่อรักษาสภาพความเสถียรภาพและเพิ่มการเกาะติดระหว่างเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสกับพื้นผิวขั้วไฟฟ้าใช้งาน⁽¹⁾ ก่อนนำไปตรวจวัดสัญญาณทางเคมีไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อเก็บผลในส่วนนี้เป็นข้อมูลเอาไว้ใช้เปรียบเทียบผลการวัดที่เกิดขึ้นหลังจากนำไปทดสอบกับสารกลูโคสจริงในภายหลัง ทั้งนี้ ผลการทดลองจะขอเรียงลำดับตามที่กล่าวไปข้างต้นดังนี้

4.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าใช้งานก่อนนำไปทดสอบกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การทดลองนี้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้ง 3 แบบ ด้วยกระบวนการเคลือบแบบ ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์บนแผ่นรองรับซิลิกอนระนาบ (100) ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบดังตารางที่ 3 – 6 (บทที่ 3) ในขณะที่แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ภายใต้เงื่อนไขของความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 mM อุณหภูมิ 90 °C และเวลาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ 6 h ซึ่ง

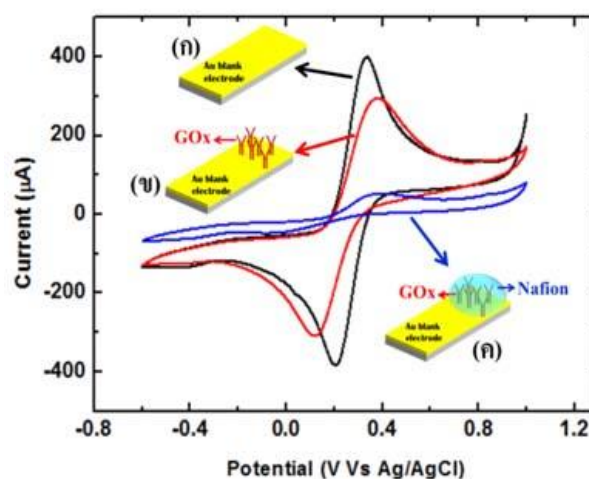
¹ Che, W; & Gou, J. W. (2014). *Highly sensitive glucose biosensor based on Au–Ni coaxial nanorods array having high aspect ratio*. Biosensors and Bioelectronics. 56(2014); pp(204–209).

ขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้งหมดสามารถทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานได้จากการพิจารณาสัญญาณเคมีไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และแสดงผลทดสอบได้ดังต่อไปนี้

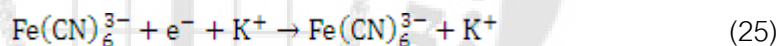
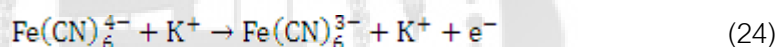
4.3.1.1 ผลการทดสอบสัญญาณเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านและไม่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การทดลองนี้ จะทดสอบสัญญาณเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทองเปลวด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยทำการจุ่มขั้วไฟฟ้าทองเปลวก่อนและหลังจากตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออนในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s ซึ่งแต่ละขั้นตอนของการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออน สามารถตรวจสอบสัญญาณเคมีไฟฟ้าและแสดงค่าที่ได้ในโวลแทมโมแกรมดังภาพประกอบที่ 43

จากภาพประกอบ 43 พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกที่ได้รับจากขั้วไฟฟ้าทองเปลวก่อนตรึงสารชีวภาพมีค่าสูงที่สุด (ภาพประกอบ 43 (ก)) เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทองเปลวไม่มีสารชีวภาพใดมาเกาะ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ดังสมการที่ (24) และ (25) ส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าได้ดีที่สุด แต่เมื่อทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส ค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกลดลงเล็กน้อย (ภาพประกอบ 43 (ข)) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าทองเปลวส่งผลให้สารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองเปลวได้น้อยลง และเมื่อทำการตรึงสารละลายนาฟิออนบนเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส พบว่า ขั้วไฟฟ้างด่งกล่าวให้ค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกน้อยที่สุด (ภาพประกอบ 43 (ค)) ทั้งนี้เกิดจาก สารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ยากขึ้น เพราะมีชั้นของสารละลายนาฟิออนซึ่งมีสภาพการนำไฟฟ้าได้น้อยเกาะอยู่บนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ดังนั้นขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออนจึงมีประสิทธิภาพในการนำไปเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อตรวจวัดกลูโคสได้ต่อไป



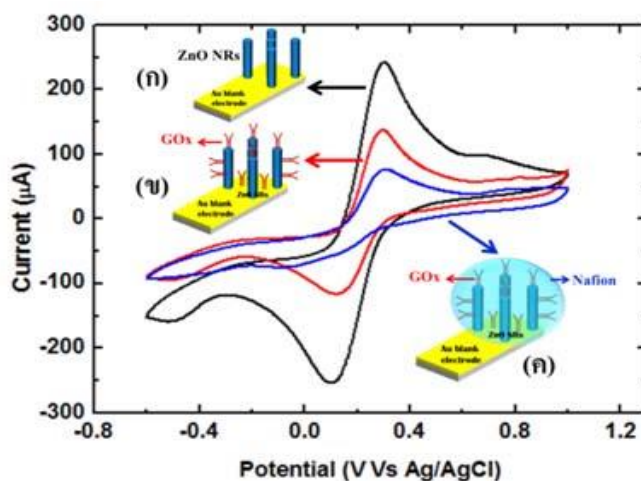
ภาพประกอบ 43 โวลแทมโมแกรมของ (ก) ขั้วไฟฟ้าทองเปลว (ข) ขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และ (ค) ขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s



4.3.1.2 ผลการทดสอบสัญญาณเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านและไม่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การทดลองนี้ จะทำการจุ่มขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านและไม่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และสารละลายนาฟิออนในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s และตรวจวัดโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยผลการทดลองพบว่า ลักษณะสัญญาณเคมีไฟฟ้าที่ได้คล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 4.3.1.1 คือภายหลังจากตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออนค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกลดลงตามลำดับ กราฟโวลแทมโมแกรมแสดงดังภาพประกอบ 44 (ก) - (ค) แต่หากจะเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทองเปลวและขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ให้ค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าทองเปลว ทั้งนี้เนื่องจาก แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าส่งผลต่อการส่งผ่านของอิเล็กตรอนจากสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ได้จึงน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามลักษณะสัญญาณเคมีไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดโดยขั้วไฟฟ้าที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ก็ยังบ่งบอกได้ว่าการเกาะติดของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และสารละลายนาฟิออน ดังนั้นจึงเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการนำไปเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อตรวจวัดกลูโคสได้ต่อไป

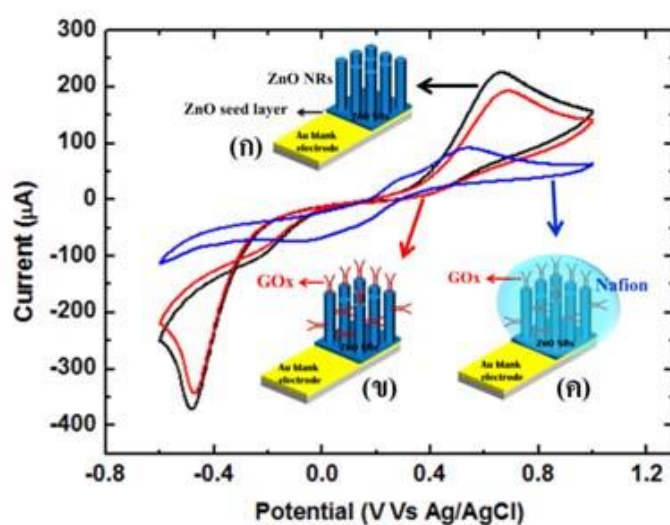


ภาพประกอบ 44 โวลแทมโมแกรมของ (ก) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ข) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และ (ค) ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s

4.3.1.3 ผลการทดสอบสัญญาณเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านและไม่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การทดลองนี้ จะทำการจุ่มขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านและไม่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และสารละลายนาฟิออนในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s และตรวจวัดโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยผลการทดลองพบว่า ลักษณะสัญญาณเคมีไฟฟ้าที่ได้คล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 คือภายหลังจากตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออนค่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิกและแคโทดิกลดลง

ตามลำดับ กราฟโวลแทมโมแกรมแสดงดังภาพประกอบ 45 (ก) - (ค) แต่หากเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกและแอโนดิกกับข้อไฟฟ้าอื่นๆ พบว่า ข้อไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกและแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ให้ค่ากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด เนื่องจากชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ขัดขวางการส่งผ่านของอิเล็กตรอนจากสารละลายไปยังพื้นผิวหน้าข้อไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จึงน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะสัญญาณเคมีไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดโดยข้อไฟฟ้าที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ก็ยังมีประสิทธิภาพพอที่จะนำไปใช้ในการทำเป็นข้อไฟฟ้าใช้งานเพื่อตรวจวัดกลูโคสได้ต่อไป



ภาพประกอบ 45 โวลแทมโมแกรมของ (ก) ข้อไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์(ข) ข้อไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และ (ค) ข้อไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M อัตราเร็วสแกน 50 mV/s

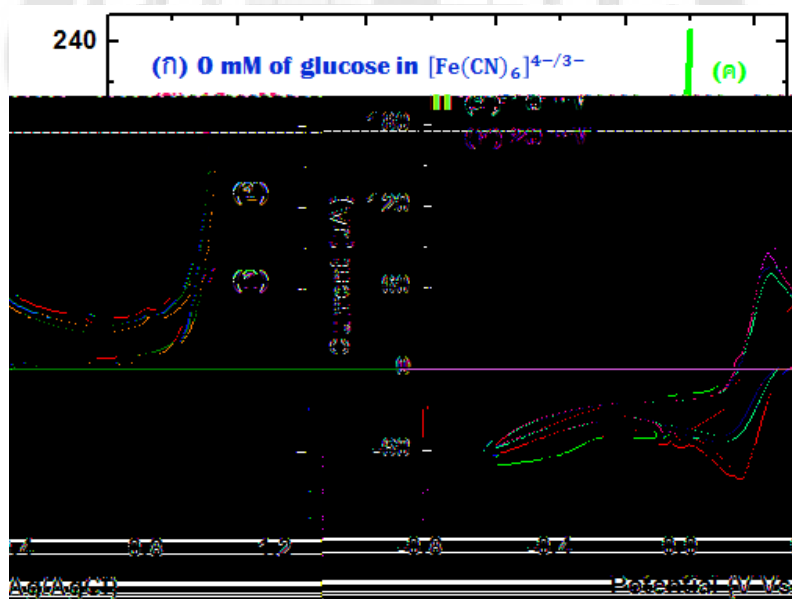
4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพข้อไฟฟ้าใช้งานหลังนำไปทดสอบกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การทดลองนี้จะนำข้อไฟฟ้าใช้งานทั้ง 3 แบบ ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและสารละลายนาฟิออน และผ่านการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจากหัวข้อ 4.3.1 แล้วมาทำการตรวจวัดปริมาณกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยการจุ่มข้อไฟฟ้าใช้งานทั้งหมดใน

สารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M ซึ่งมีและไม่มีส่วนผสมของกลูโคส โดยให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง +1.0 V อัตราเร็วสแกน 50 mV/s ผลการทดลองทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

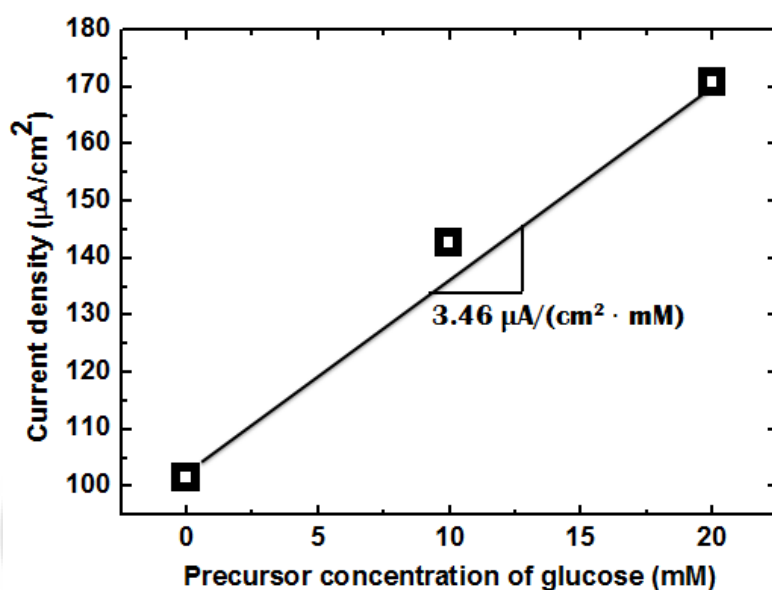
4.3.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าทองเปล่าภายหลังนำไปทดสอบกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

จากการพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกของขั้วไฟฟ้าทองเปล่าที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ พบว่ามีค่าสูงสุดเป็น $50.72 \mu\text{A}$ (ภาพประกอบ 46(ก)) แตกต่างจากค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุดภายหลังจุ่มขั้วไฟฟ้าทองเปล่าในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ที่มีปริมาณกลูโคส 10 mM ซึ่งมีค่าเป็น $72.26 \mu\text{A}$ (ภาพประกอบ 46(ข)) และเมื่อเพิ่มปริมาณกลูโคสเป็น 20 mM พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุดเป็น $87.34 \mu\text{A}$ (ภาพประกอบ 46(ค)) ซึ่งหากพิจารณาถึงผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุดของขั้วไฟฟ้าทองเปล่าในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ที่มีและไม่มีกลูโคส พบว่า เมื่อใส่กลูโคส 10 mM และ 20 mM ค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกจะเพิ่มขึ้นเป็น $21.54 \mu\text{A}$ และ $36.62 \mu\text{A}$ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 46 โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทองเปล่าที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสและสารละลายนาฟิออน ซึ่ง (ก) จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M (ข) เติมกลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ (ค) กลูโคสความเข้มข้น 20 mM อัตราเร็วสแกน 50 mV/s

หากพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกของขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสและสารละลายนาฟิออน ในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ที่มีและไม่มีกลูโคสปริมาณ 10 mM และ 20 mM จะสามารถประมาณค่าการตอบสนองต่อกลูโคสของขั้วไฟฟ้าได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ขั้วไฟฟ้า หรือเรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคสที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพประกอบ 47



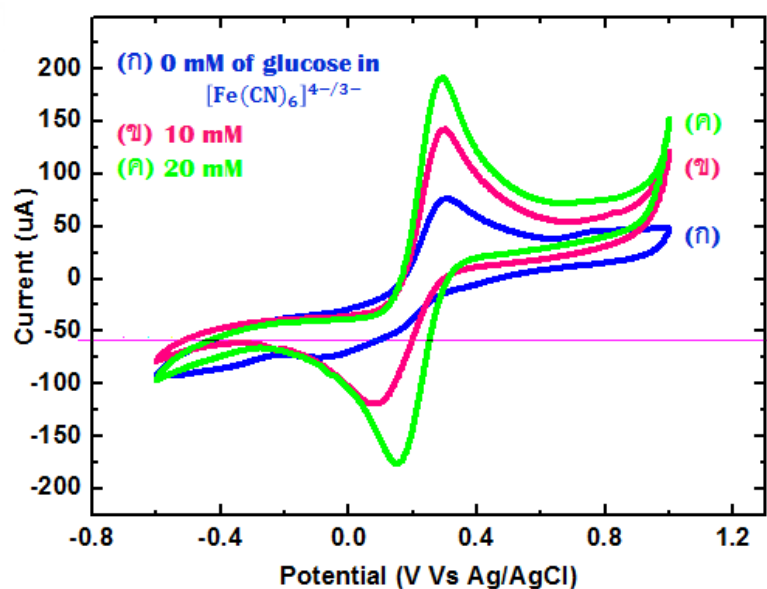
ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส

จากภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคสที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการตอบสนองต่อกลูโคสของขั้วไฟฟ้าทองเปลว จะเห็นได้ว่า เมื่อจุ่มขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสและสารละลายนาฟิออน ในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ซึ่งไม่มีกลูโคส (0 mM of glucose) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด เนื่องจาก ไม่มีการตอบสนองของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสต่อปริมาณกลูโคสในสารละลาย ดังนั้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเกิดจากสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนดังสมการ (24) และ (25) ไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเพียงเท่านั้น แต่เมื่อใส่กลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ 20 mM พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจาก เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสบนขั้วไฟฟ้าเกิดการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคส โดยเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจะไปสลายกลูโคสให้เปลี่ยนเป็นกรดกลูโค

นิก (gluconic acid) แต่จากการทำงานของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจะมีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนไปให้ออกซิเจนจึงเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (ดังสมการ (12) และ (13) (บทที่ 2)) และสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้นโดยการส่งผ่านของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นสามารถหาค่าความชันของกราฟ (slope) หรือค่าการตอบสนองต่อกลูโคสของขั้วไฟฟ้าทองที่ผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสและสารละลายนาฟิออนได้เป็น $3.46 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$

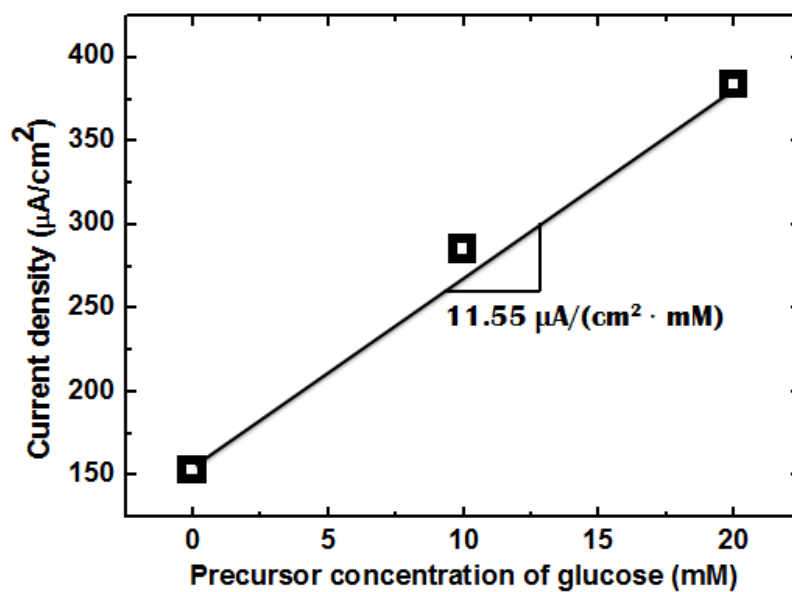
4.3.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าทองเปล้าที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ภายหลังนำไปทดสอบกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

จากการพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกของขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ พบว่า มีค่าสูงสุดเป็น $76.23 \mu\text{A}$ (ภาพประกอบ 48(ก)) แตกต่างจากค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุด ภายหลังจุ่มขั้วไฟฟ้าทองเปล้าในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ที่มีปริมาณกลูโคส 10 mM ซึ่งมีค่าเป็น $142.46 \mu\text{A}$ (ภาพประกอบ 48(ข)) และเมื่อเพิ่มปริมาณกลูโคสเป็น 20 mM พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุดเป็น $191.74 \mu\text{A}$ (ภาพประกอบ 48(ค)) ซึ่งผลต่างค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุดของขั้วไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์โดยไม่มีและมีกลูโคสปริมาณ 10 และ 20 mM มีค่าเป็น $66.23 \mu\text{A}$ และ $115.50 \mu\text{A}$ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 48 โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสและสารละลายนาฟิออน (ก) จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M (ข) เติมกลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ (ค) กลูโคสความเข้มข้น 20 mM โดยให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง +1.0 V อัตราเร็วสแกน 50 mV/s

จากภาพประกอบ 48 สามารถนำค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกสูงสุดของข้าวไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ที่ไม่มีและมีกลูโคสปริมาณ 10 และ 20 mM คำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้และประมาณค่าการตอบสนองต่อกลูโคสของข้าวไฟฟ้าได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคสที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพประกอบ 49

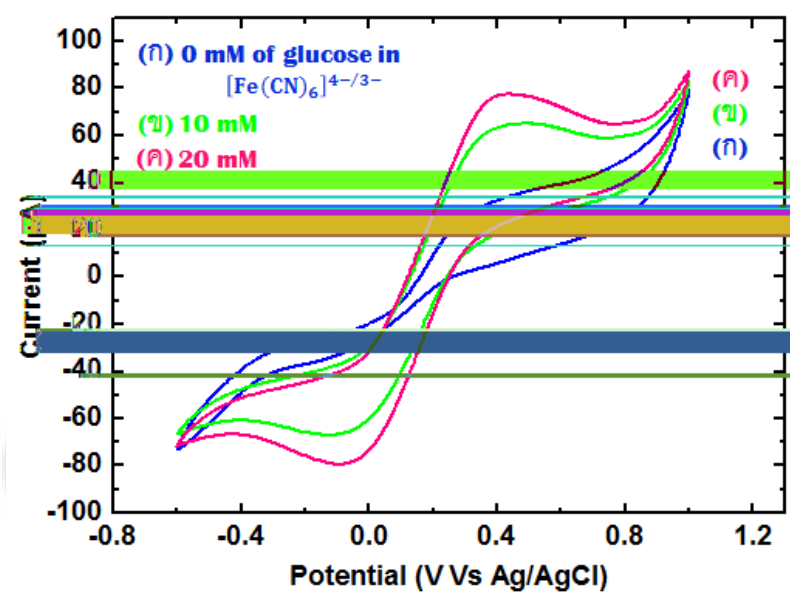


ภาพประกอบ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส

จากภาพประกอบ 49 พบว่า ข้าวไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ซึ่งไม่มีปริมาณกลูโคสให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแคโทดิกน้อยที่สุด เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าที่ได้เกิดจากอิเล็กตรอนของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์เพียงอย่างเดียว ดังนั้น ข้าวไฟฟ้าให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแคโทดิกที่ได้จากข้าวไฟฟ้าซึ่งจุ่มในสารละลายที่มีปริมาณกลูโคสเป็น 10 และ 20 mM ทั้งนี้ เกิดจากข้าวไฟฟ้ามีการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคส ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส โดยสามารถหาปริมาณการตอบสนองของข้าวไฟฟ้าต่อปริมาณกลูโคสได้จากค่าความชันของกราฟ ซึ่งพบว่าปริมาณการตอบสนองต่อกลูโคสหรือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น $11.55 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$

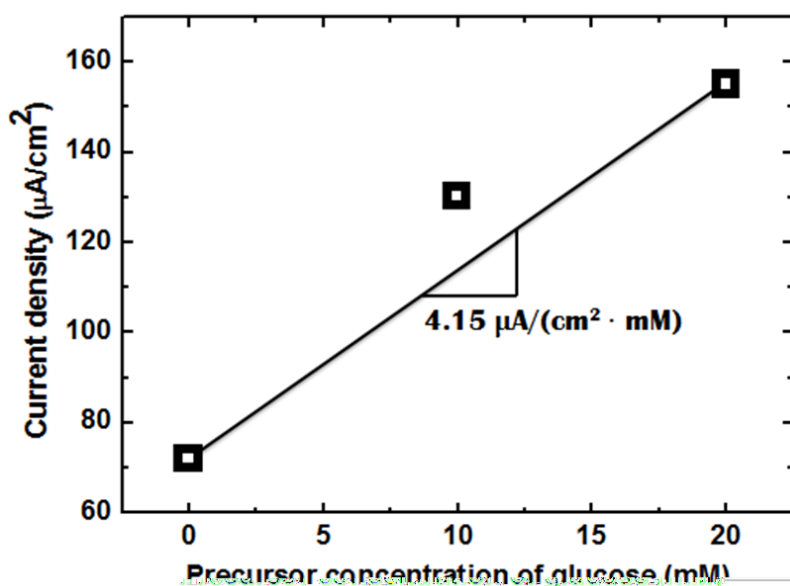
4.3.2.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าของเปล้าที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายหลังจากนำไปทดสอบกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

จากการพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกของขั้วไฟฟ้าของที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ก่อนแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกของขั้วไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์โดยไม่มีและมีกลูโคสปริมาณ 10 และ 20 mM มีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 50(ก) - (ค)



ภาพประกอบ 50 โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าของที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งผ่านการตรึงเอนไซม์กลูโคสและสารละลายนาฟิออน (ก) จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ 5 mM ในโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 M (ข) เติมกลูโคสความเข้มข้น 10 mM และ (ค) กลูโคสความเข้มข้น 20 mM โดยให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 ถึง +1.0 V อัตราเร็วสแกน 50 mV/s

จากภาพประกอบ 50 สามารถนำค่ากระแสไฟฟ้าแคโทดิกของขั้วไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ที่ไม่มีและมีกลูโคสปริมาณ 10 และ 20 mM คำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้และประมาณค่าการตอบสนองต่อกลูโคสของขั้วไฟฟ้าได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคสที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพประกอบ 51

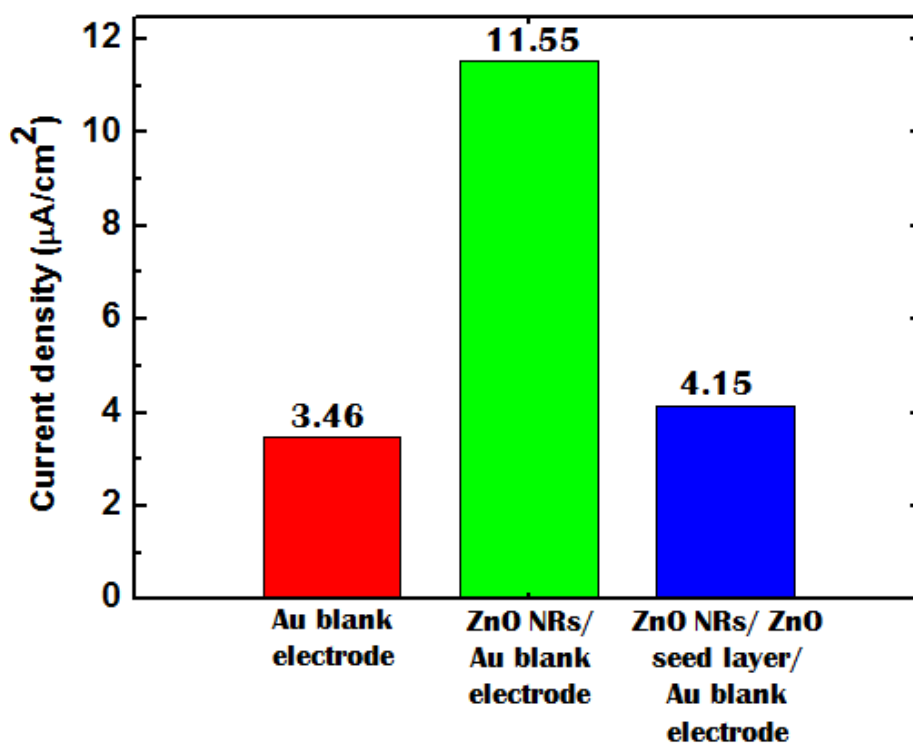


ภาพประกอบ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของปริมาณกลูโคส

จากภาพประกอบ 51 พบว่า ขั้วไฟฟ้ามีการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคส ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และสามารถหาปริมาณการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาณกลูโคสได้จากค่าความชันของกราฟ โดยพบว่าปริมาณการตอบสนองต่อกลูโคสมีค่าเป็น $4.15 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$

เพื่อให้ง่ายสำหรับการพิจารณาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสของขั้วไฟฟ้าใช้งานทั้ง 3 แบบ จึงได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อตารางเซนติเมตรเทียบกับขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ แสดงดังภาพประกอบ 52 พบว่า ขั้วไฟฟ้าทองเปลวสามารถตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสได้เป็น $3.46 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ซึ่งน้อยกว่าการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสบนขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ และขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีค่าเป็น $11.55 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ และ $4.15 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะพื้นผิวขั้วไฟฟ้าทองเปลวมีลักษณะแบนราบ ซึ่งมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะเอนไซม์น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ประสิทธิภาพการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าทองเปลวจึงน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าอื่นๆ แต่หากพิจารณาค่าการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสของขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์และขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสมากกว่าขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เนื่องจาก ขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็น

สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ทำให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ไปยังพื้นผิวขั้วไฟฟ้าเกิดได้ยากขึ้น สัญญาณการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสที่ตรวจวัดได้จึงน้อย



ภาพประกอบ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อตารางเซนติเมตรเทียบกับขั้วไฟฟ้าทองคำเปลว (Au blank electrode) ขั้วไฟฟ้าทองคำที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs/ Au blank electrode) และ ขั้วไฟฟ้าทองคำที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์และแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NRs/ ZnO seed layer/Au blank electrode)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 อิทธิพลของชนิดและความหนาชั้นล่อผลึกที่มีต่อการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

จากผลการศึกษาพบว่า ในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ชนิดและความหนาชั้นล่อผลึกคือปัจจัยแรกที่ควรให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นแผ่นรองรับการตกผลึกของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจากการพิจารณาชนิดของชั้นล่อผลึกเป็นซิงค์ออกไซด์และทองพบว่า ชั้นล่อผลึกทั้งสองชนิดสามารถใช้เป็นแผ่นรองรับการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ แต่หากพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ส่งผลให้ได้ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการกระจายตัว และความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่มากเป็น 53 ต่อตารางไมโครเมตร ในขณะที่ บนชั้นล่อผลึกทองมีเพียงแค่ 35 ต่อตารางไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจาก ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างลักษณะเดียวกับซิงค์ออกไซด์ที่ตกผลึกจึงช่วยลดปัญหาการไม่เข้ากันของแลตทิซได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นเงื่อนไขสำหรับการเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์นี้ต่อไป สำหรับการพิจารณาความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ พบว่า เมื่อเพิ่มขนาดความหนาชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ ลักษณะการจัดเรียงของอะตอมในผลึกมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เป็นชั้นล่อผลึกที่สามารถสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ตั้งตรงมากที่สุด (well-aligned) สอดคล้องกับงานวิจัยของ H. Ghayour และคณะ (H. Ghayour.; et al. 2011: 101-105) ที่พบว่า เมื่อทำการเพิ่มขนาดความหนาของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์จะส่งผลต่อลักษณะความเป็นผลึกของพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

5.2 อิทธิพลของความเข้มข้นสารตั้งต้นและเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

ในกระบวนการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 1, 10, 20, 30 และ 40 mM พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารตั้งต้นจาก 10 mM เป็น 20, 30 และ 40 mM ส่งผลให้ได้ลักษณะแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดความสูงน้อยลง ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเป็น 10 mM จึงให้ค่าความหนาแน่นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆ และในส่วนของ การทดลองสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 30 min, 2, 4 และ 6 h พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายก็มีมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเอสเปกตรัมเรโซ

(aspect ratio: AR) ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยเราพบว่าที่เวลา 6 h ให้ค่าเอสเปคต์เรโซเป็น 11.26 ซึ่งมากกว่าค่าในช่วงเวลาอื่นๆ

5.3 การเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวัดปริมาณกลูโคส

แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 mM เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 6 ชั่วโมง ถูกสังเคราะห์บนขั้วไฟฟ้าทองเปลว และขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ก่อนนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับตรวจวัดปริมาณกลูโคสด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ซึ่งพบว่า ขั้วไฟฟ้าทองที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ และขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกและแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสได้เป็น $11.55 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ และ $4.15 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าสัญญาณการตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสของขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่สามารถตรวจวัดได้เพียงแค่ $3.66 \mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mM})$ ทั้งนี้เนื่องจากแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าสามารถเพิ่มพื้นที่การเกาะติดเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณกลูโคสเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ji Yeong Kim และคณะ (Ji Yeong Kim.; et al. 2014: 216-220) ดังนั้นขั้วไฟฟ้าใช้งานที่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จึงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าในการตรวจวัดกลูโคสได้จริงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

5.4 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

จากการวิจัยในครั้งนี้ทำให้เราทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นชนิดชั้นล่อผลึก ความหนาชั้นล่อผลึก ความเข้มข้นสารตั้งต้น และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ และสามารถนำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้บนขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับตรวจวัดปริมาณกลูโคสได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เราประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าทองเปลวที่มีและไม่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ก่อนนำไปตรวจวัดปริมาณกลูโคส โดยพบว่าขั้วไฟฟ้าทองทั้งสองแบบสามารถตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าทองเปลว (ไม่มีแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์) อย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้มีผลมาจากขนาดพื้นผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยหลัก และจากงานวิจัยนี้ยังพบว่าการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนขั้วไฟฟ้าทองที่มีชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ส่งผลต่อการเพิ่มพื้นผิวขั้วไฟฟ้าใช้งานมากที่สุด ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะสามารถตรวจวัดและตอบสนองต่อปริมาณกลูโคสได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าอื่นๆ แต่เนื่องจากสภาพการนำไฟฟ้าของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์อาจจะน้อยเกินไป ดังนั้น การเปลี่ยนแปลง

ขนาดความหนา การอบให้ความร้อน (annealing) ของชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์ หรือการเจือสารที่เพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าให้กับชั้นล่อผลึกซิงค์ออกไซด์มากยิ่งขึ้นอย่าง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป





บรรณานุกรม

- นรินทร์ สิริกุลรัตน์. (2554). *ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อ*. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์
ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ. (2543). *การศึกษาวัดโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
สสท.โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ธีระพงษ์ พวงมะลิ. ม.ป.พ. *นาโนฟิสิกส์*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ แมคกรอ-ฮิล.
- จงดี ธรรมเขต; และ เพรศพิชญ์ คณาธารณา. (2012). *วัสดุนาโนกับการพัฒนาเทคนิคการสกัดด้วยตัว
ดูดซับ*. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(2): 3.
- สุนทร มุลทา. *โครงสร้างผลึก การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ*. (เอกสารประกอบการ
สอน).
- ประเสริฐ สุทธิประสิทธิ์. (2525). *เคมีฟิสิกส์ 1*. ม.ป.พ.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. (2552). *เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลาวัลย์ ศรีพงษ์. (2543). *การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า*. นครปฐม: สำนักพิมพ์ คณะเภสัชศาสตร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วิทยา เงินแท้. (2555). *เทคนิคการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า*. ขอนแก่น: สำนักพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Mullin JS. Crystallization. A division of reed education and professional publishing
Ltd.2012;4:183. Jordan Hill.
- Sadia, A; et. al. (2013). *Low temperature grown ZnO nanotubes as smart sensing electrode
for the effective detection of ethanol amine chemical. Materials Letters*. 106: 254-
258.
- Zao, Y; et. al. (2010). *A rapid response time and highly sensitive Amperometric glucose
biosensor based on ZnO nanorods via citricacid-assisted annealing route. Physica
E* 42: 1830–1833
- D. Polsongkram; et. al. (2008). *Effect of synthesis conditions on the growth of ZnO
nanorods via hydrothermal method. Physica B*. 403: 3713– 3717.
- Kyung, H. K; et. al. (2014). *Growth of Zinc Oxide Nanorods Using Various Seed Layer
Annealing Temperatures and Substrate Materials. Int. J. Electrochem. Sci*. 9: 2080–
2089.

- Jaejin, S; & Sangwoo, L. (2007). Effect of Seed Layer on the Growth of ZnO Nanorods. J. Phys. Chem. C. 111:596-600.
- Panita, K; et. al. (2015). *Morphology-controlled seed-assisted hydrothermal ZnO nanowires via critical concentration for nucleation and their photoluminescence properties*. Phys.Status Solidi A. 2: 394-400.
- Sunandan(B; & Joydeep, D. (2009). *Effect of seeded substrates on hydrothermally grown ZnO nanorods*. J Sol-Gel Sci Technol 50: 456–464.
- Han, S.C; et. al. (2012). *Growth of high aspect ratio ZnO nanorods by solution process: Effect of polyethyleneimine*. Journal of Solid State Chemistry. 189: 25-31.
- D, Polsongkram; et. al. (2008). *Effect of synthesis conditions on the growth of ZnO nanorods via hydrothermal method*. Physica B. 403: 3713-3717.
- Francisco, S.P; et. al. (2011). *Growth of vertically aligned ZnO nanorods using textured ZnO films*. Nanoscale Research Letters. 6: 524.
- Ji, Y. K; et. al. (2014). *Tailoring the surface area of ZnO nanorods for improved performance in glucose sensors*. Sensors and Actuators B. 192: 216– 220.
- Zafar, H. I; et. al. (2013). *Hydrothermal Growth of Vertically Aligned ZnO Nanorods Using a Biocomposite Seed Layer of ZnO Nanoparticles*. Materials. 6: 3584-3597.
- H, Ghayour; et. al. (2011). *The effect of seed layer thickness on alignment and morphology of ZnO nanorods*. Vacuum. 86: 101-105.
- Tao, K; et. al. (2009). *An amperometric glucose biosensor based on the immobilization of glucose oxidase on the ZnO nanotubes*. Sensors and Actuators B. 138: 344-350.
- Che, W; & Joydeep, D. (2014). *Highly sensitive glucose biosensor based on Au–Ni coaxial nanorods array having high aspect ratio*. Biosensors and Bioelectronics. 56; 204-209.



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวสุภาวดี โภคัย
วันเดือนปีเกิด	23 มีนาคม พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	39/1 หมู่ 2 ตำบลบ้านท่าเียน อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84180
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2551	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนบ้านตาขุนวิทยา
พ.ศ. 2555	ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยบูรพา
พ.ศ. 2559	ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ