

# สมบัติเชิงโครงสร้างและไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

## Structural and Electrical Properties of ZnO Thin Film Prepared by RF Sputtering Technique

ธวัชชัย จันทร์ทอง<sup>1</sup> ธนศ ณ วิเชียร<sup>2</sup> วีรวัดน์ อินทรทัต<sup>1\*</sup>

ศักดิ์ชาย เพชรช่วย<sup>3</sup> และณัฐพงษ์ ถ้อยคำ<sup>4</sup>

Thawatchai Chanthong<sup>1</sup>, Thanate Na Wichean<sup>2</sup>, Weerawat Intaratat<sup>1\*</sup>,

Sakchai Phethchuai<sup>3</sup> and Nattapong Thuedam<sup>4</sup>

### บทคัดย่อ

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สามารถเตรียมได้หลากหลายเทคนิคซึ่งเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจใช้กันมากคือเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง (RF Sputtering) โดยผู้วิจัยได้มุ่งสนใจศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เวลาในการเคลือบแตกต่างกัน (15 30 45 และ 60 นาที) บนวัสดุฐานรองแก้วด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน การศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ทุกตัวอย่างที่เวลาในการเคลือบต่างกันมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ตไซต์ (Hexagonal Wurtzite) ในระนาบ (002) ที่ตำแหน่งมุม 2 $\theta$  เท่ากับ 34.4 °C ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (002) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีขนาดเกรนเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเคลือบ และที่เวลาในการเคลือบ 60 นาที มีขนาดเกรนใหญ่ที่สุด และมีการกระจายของเกรนอย่างสม่ำเสมอ และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด (2.68  $\Omega$ .m) ซึ่งวัดด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Van der Pauw) แบบ 4 จุด ผลการศึกษายืนยันได้ว่าโครงสร้างผลึก ขนาดเกรน และการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริงสามารถใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ให้เหมาะสมได้

**คำสำคัญ:** ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ อาร์เอฟสปีดเตอร์ริง สภาพต้านทานไฟฟ้า

<sup>1</sup> อ., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 83000

<sup>2</sup> นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

<sup>3</sup> ผศ.ดร., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 83000

<sup>4</sup> อ.ดร., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 83000

<sup>1</sup> Lecturer, Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket, 83000, Thailand

<sup>2</sup> Researcher, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand

<sup>3</sup> Asst. Prof. Dr., Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket, 83000, Thailand

<sup>4</sup> Lecturer, Dr., Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket, 83000, Thailand

\* Corresponding author: E-mail address: weerawat.i@pkru.ac.th

## Abstract

Zinc oxide (ZnO) thin film can be prepared by many techniques. One of the most popular techniques is the RF sputtering technique. The researchers were interested to study the structural and electrical properties of zinc oxide thin film with different coating times (15, 30, 45 and 60 minutes) on the glass substrate by using RF sputtering technique in argon gas atmosphere. This study used X-ray diffraction (XRD) technique; the results found that every zinc oxide thin film with different coating times had hexagonal wurtzite crystal structure, with the presence of the plane (002) at the  $2\theta$  angle of  $34.4^\circ$ . The X-rays in the plane (002) intensity increased as the coating time increased. The analysis of the scanning electron microscopy (SEM) showed that the ZnO grain size increased with coating time. The ZnO sample with 60 minutes coating time showed the largest grain size, evenly distributed grain and presented the lowest electrical resistivity ( $2.68 \Omega.m$ ), which was measured by the four - point Van der Pauw technique. The results confirmed that the crystal structure, grain size and electrical conductivity of the zinc oxide thin film synthesized by RF sputtering technique can be enhanced by optimizing time to coat the film.

**Keywords:** ZnO Thin Films, RF-sputtering, Electrical Resistivity

## บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านวัสดุศาสตร์ได้สังเคราะห์วัสดุใหม่ขึ้นมากมายและมีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ปัจจุบันวัสดุนาโนได้รับความนิยมอย่างสูงในเชิงอุตสาหกรรม และเชิงวิชาการ โดยเฉพาะสารประกอบซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารประกอบที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีสมบัติที่มีค่าแถบพลังงานกว้างประมาณ 3.37 อิเล็กตรอน โวลต์ [1-2] มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูง (60 meV) ที่อุณหภูมิห้อง [3-5] และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่เรียกว่า เวิร์ตไซต์ มีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางแสง ทางไฟฟ้า และทางเคมีที่ดีมากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ถูกนำไปใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น ฟิล์มนำไฟฟ้าที่โปร่งใสและวัสดุในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากการส่งผ่านแสงสูงในช่วงแสงที่มองเห็น [6] และมีการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่หลากหลาย เช่น ระบบเซนเซอร์ ไดโอดชนิดเปล่งแสง นาโนเจนเนอเรเตอร์ ทรานซิสเตอร์ เพียร์โซอิเล็กทริก ทรานดิวเซอร์ เป็นต้น [7]

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้มีโครงสร้างระดับนาโนสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย และหลากหลายวิธี เช่น การตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) [3] การตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยใช้สารตั้งต้นเมทัล-ออร์แกนิก (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD) การเคลือบด้วยเลเซอร์พัลส์ (Pulsed Laser Deposition: PLD) [8] การเคลือบด้วยลำแสงโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE), การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Reaction E-Beam Evaporation) ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering) [9-10] และโซล-เจล (Sol-Gel) [11-12] ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นสามารถปรับโครงสร้างแถบพลังงานฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ตามสมบัติที่ต้องการได้

อีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการเคลือบฟิล์มบางคือ เทคนิคอาร์เอฟสปัตเตอริง [6, 13] ซึ่งฟิล์มบาง ZnO ที่ผลิตได้จากเทคนิคนี้มีข้อดีบางประการ เช่น ความบริสุทธิ์สูง เป็นเนื้อเดียวกัน ความขรุขระน้อยและฟิล์มบาง

มีโครงสร้างระดับนาโน โดยปกติเทคนิคดังกล่าวสามารถทำได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการใช้เลเซอร์ ZnO สำเร็จรูป และกระบวนการออกซิเดชันของ Zn ที่ต้องใช้การผสมก๊าซในการทำงาน เช่น ผสม Ar และ O<sub>2</sub> ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิคอาร์เอฟสเป็คเตอริง กระบวนการใช้เลเซอร์ ZnO สำเร็จรูปในการผลิตฟิล์มบาง ZnO ที่เวลาในการเคลือบแตกต่างกันบนวัสดุฐานรองแก้ว เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

## วิธีดำเนินการ

### 1. การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

เครื่องสเป็คเตอริง UNIVEX รุ่น 300 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายความต่างศักย์แบบ RF-Generator ความถี่ 13.5 MHz ภายในภาชนะสุญญากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.3 เซนติเมตร และสูง 31.5 เซนติเมตร เป้าซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ 98 % มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร ความหนา 0.635 เซนติเมตร และวัสดุฐานรองแก้วสไลด์ขนาดความกว้าง 2.54 เซนติเมตร ความยาว 7.62 เซนติเมตร ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะทำความสะอาดวัสดุฐานรองให้ปราศจากฝุ่นละอองด้วยน้ำ DI ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที แล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง นำวัสดุฐานรองเข้าไปในภาชนะสุญญากาศที่มีความสูงระหว่างเป้าและวัสดุฐานรอง 3.8 เซนติเมตร แล้วเตรียมระบบสุญญากาศให้มีความดันอากาศ  $4.3 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ และความดันก๊าซอาร์กอน  $1.11 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 51.20 ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐานต่อนาที (Standard Cubic Centimeters Per Minute) และกำลังไฟฟ้า คงที่ 200 วัตต์ ก่อนเคลือบฟิล์ม จะทำความสะอาดผิวหน้าของวัสดุฐานรองให้เหมาะสมอีกครั้ง โดยการยิงด้วยลำไอออนของก๊าซเฉื่อยในการสเป็คเตอริงเป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้หืออะตอมของซิงค์ออกไซด์มีการยึดติดกับฐานรองได้ดี และเพื่อให้ระบบสุญญากาศปราศจากสิ่งปนเปื้อนจะส่งผลต่อคุณสมบัติที่ดีของฟิล์ม หลังจากนั้นเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ระยะเวลาในการเคลือบที่แตกต่างกัน คือ 15 30 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

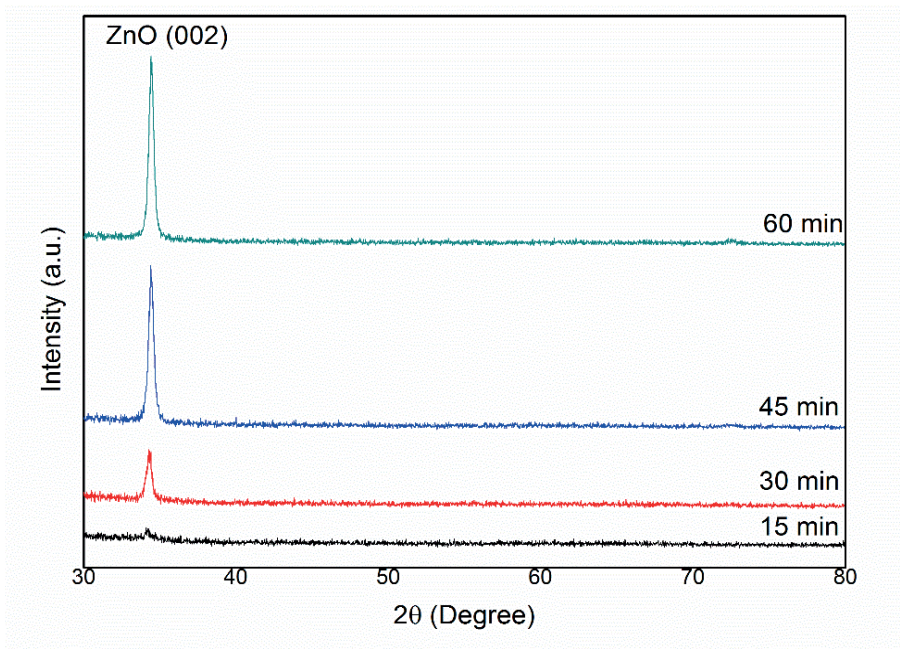
### 2. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและพื้นผิวของตัวอย่างใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'pert Pro MPD (40kV, 35 mA) ด้วยเป้าทองแดงความยาวคลื่น 0.154065 nm และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Apreo ส่วนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้เทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Van der Pauw) แบบ 4 จุด โดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ LakeShore 120 จ่ายกระแสในย่าน 1  $\mu$ A – 10 mA พร้อมวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัลยี่ห้อ KYORITSU รุ่น 1009

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง ZnO บนวัสดุฐานรองแก้วที่ระยะเวลาเคลือบ 15 30 45 และ 60 นาที ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังภาพที่ 1

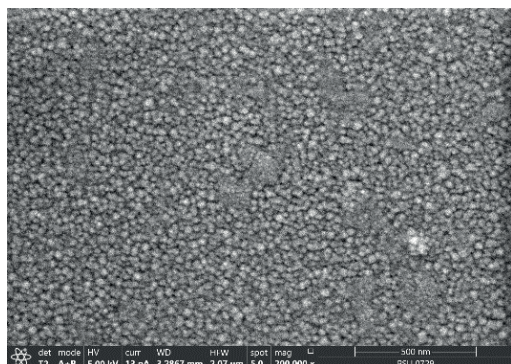


ภาพที่ 1 ผลการทดสอบด้วย XRD ของฟิล์มบาง ZnO ที่ระยะเวลาในการเคลือบต่าง ๆ

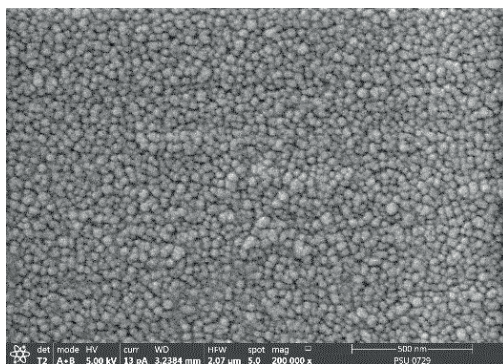
จากผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ZnO ที่ระยะเวลาในการเคลือบต่าง ๆ ดังภาพที่ 1 พบว่าฟิล์มบาง ZnO ทุกตัวอย่างมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 34.4 องศา [3, 14] และความเป็นผลึกของ ZnO จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเคลือบ โดยฟิล์มบาง ZnO ที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมีโครงสร้างเฟสของผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ตซ์ไสต์ ที่ระนาบ (002) ตามแกน c (c-axis) มีค่าคงที่ของแลตทิซ a = 0.3004 nm และ c = 0.5203 nm โดยค่าคงที่ของแลตทิซโครงสร้างเวอร์ตซ์ไสต์คำนวณได้จากความสัมพันธ์  $c = \frac{\lambda}{\sin \theta}$ ,  $a = \sqrt{\frac{1}{3}} \frac{\lambda}{\sin \theta}$  เมื่อ λ คือความยาวคลื่นการแผ่รังสีของ Cu-K<sub>α</sub>, θ คือมุมการเลี้ยวเบนของ Bragg [7] และในสเปกตรัมของ XRD ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเฟสอื่น [7, 15] ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะผลึกเดี่ยวของ ZnO และที่ระนาบ (002) ของฟิล์มบาง ZnO มีความเข้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเคลือบ และไม่พบสเปกตรัมอื่นเพิ่มเติมแสดงให้เห็นว่าผลึกของ ZnO มีการเติบโตขึ้นตามระยะเวลาในการเคลือบที่เพิ่มขึ้น

## 2. สมบัติเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

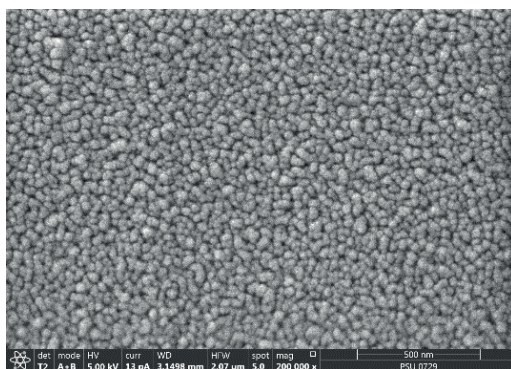
ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงพื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO บนวัสดุฐานรองแก้วที่ระยะเวลาในการเคลือบ 15 30 45 และ 60 นาที ด้วยเทคนิค SEM แสดงดังภาพที่ 2



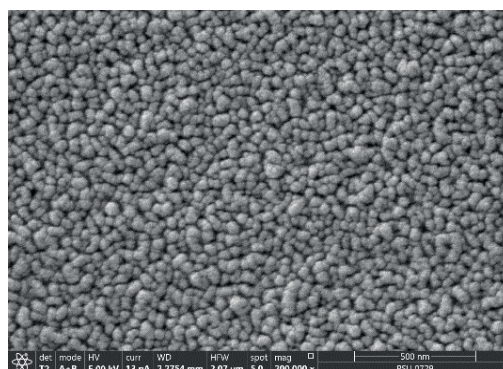
ก) 15 นาที



ข) 30 นาที



ค) 45 นาที



ง) 60 นาที

### ภาพที่ 2 ภาพจาก SEM ของฟิล์มบาง ZnO ที่ระยะเวลาในการเคลือบต่าง ๆ กัน

ก) 15 นาที ข) 30 นาที ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที

จากผล SEM พบว่าขนาดของเกรนจะโตขึ้นตามระยะเวลาในการเคลือบฟิล์ม เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นอะตอมของ ZnO จะมีการก่อตัวสะสมของอะตอมเพิ่มขึ้น และทำให้ก่อตัวเป็นผลึกของ ZnO สมบูรณ์ขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ขณะเดียวกันก็ทำให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการเคลือบ 15 นาที ดังภาพที่ 2(ก) พบว่าเกรนจะมีขนาดเล็กที่สุด ขนาดของเกรนไม่สม่ำเสมอ และมีช่องว่างระหว่างเกรนมาก ผลึกบางส่วนมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนที่เวลาในการเคลือบ 60 นาที ภาพที่ 2(ง) ขนาดของเกรนจะใหญ่ที่สุด และมีการกระจายสม่ำเสมอ ในขณะที่เวลาในการเคลือบ 30 และ 45 นาที ดังภาพที่ 2(ข) และ (ค) ตามลำดับ ขนาดของเกรนจะใกล้เคียงกัน โดยที่เวลาเคลือบ 45 นาที เกรนมีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย และการกระจายของเกรนค่อนข้างสม่ำเสมอ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการก่อตัวเป็นโครงสร้างลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมได้โดยการเปลี่ยนระยะเวลาในการเคลือบ เนื่องจากกระบวนการเคลือบในช่วงเริ่มต้นอะตอมของ ZnO ก่อตัวเป็นเกรนขนาดเล็กมีช่องว่างระหว่างเกรนมาก และบางส่วนจะเป็นกลุ่มก้อน เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นอะตอมของ ZnO จะสะสมเพิ่มขึ้น ทำให้เกรนใหญ่ขึ้น และมีช่องว่างลดลงทำให้พื้นผิวสม่ำเสมอมากขึ้น ถ้าเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นอีกอะตอมของ ZnO จะต่อกัน และขยายออกมีโครงสร้างเป็นคอลัมน์สังเกตได้จากเวลาเคลือบ 60 นาที ในภาพที่ 2(ง)

**ตารางที่ 1** ความสัมพันธ์ของระยะเวลาเคลือบกับขนาดเกรนของฟิล์มบาง ZnO ที่คำนวณจาก เทคนิค XRD

เวลาในการเคลือบฟิล์ม ZnO (นาทีก)	FWHM ( ° )	Grain Size (nm)
15	-	-
30	0.55182	15.07
45	0.46416	17.92
60	0.43760	19.01

ตารางที่ 1 แสดงค่า FWHM ของสเปกตรัม XRD และขนาดเกรนของฟิล์มบาง ZnO ที่เวลาในการเคลือบฟิล์มต่างกัน โดยใช้สูตรของ Scherrer ดังสมการ (1) [12, 14, 16]

$$D = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \Theta} \tag{1}$$

โดยที่  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของการแผ่รังสี Cu-K $\alpha$ ,  $\Theta$  คือมุมการเลี้ยวเบนของ Bragg และ  $\beta$  คือความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของพีกสูงสุด (FWHM) ของ ZnO ที่ระนาบ (002)

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้นค่า FWHM ที่ระนาบ (002) มีค่าลดลงซึ่งส่งผลให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลของ SEM

### 3. สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ศึกษาด้วยเทคนิคแวน เดอร์ เพาว์ แบบ 4 จุด และคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ของฟิล์มบาง ZnO โดยใช้สมการ (2) [14]

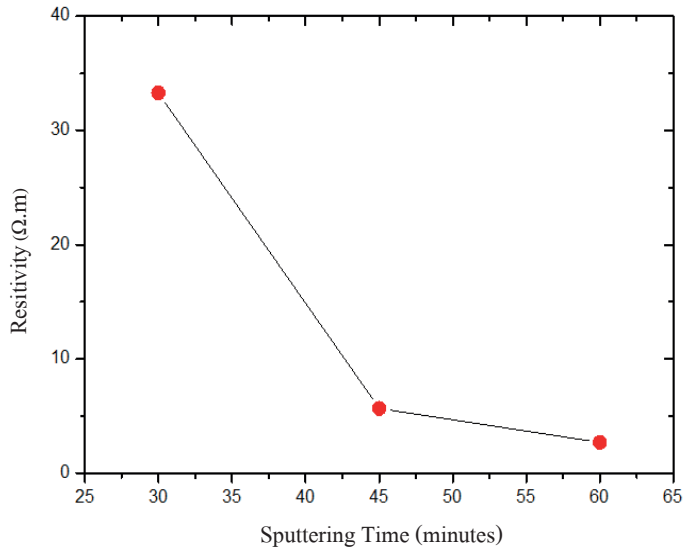
$$\rho = 2\pi s \left(\frac{V}{I}\right) \tag{2}$$

โดย  $s$  คือ ระยะห่างระหว่างโพรบ (เมตร)

$V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 โพรบด้านใน (โวลต์)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน 2 โพรบด้านนอก (แอมแปร์)

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ที่เวลาเคลือบต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคแวน เดอร์ เพาว์ แบบ 4 จุด แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ที่เวลาเคลือบต่างกัน

จากภาพที่ 3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ที่เวลาในการเคลือบต่างกัน สังเกตพบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ลดลง เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มบาง ZnO ที่เวลาในการเคลือบ 30 นาที มีค่าสภาพต้านไฟฟ้าสูงที่สุด (33.28 Ω.m) รองลงมาที่เวลาในการเคลือบ 45 นาที (5.67 Ω.m) และ 60 นาที (2.68 Ω.m) และยังพบว่าในช่วงเวลาเคลือบ 30 - 45 นาที ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากเวลาในการเคลือบ 45 นาที ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงอย่างช้าๆ จากข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO แสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนและความสมบูรณ์ของผลึกมีผลต่อการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM และ XRD โดยเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นเมื่อผลึกของ ZnO สมบูรณ์ขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีมีผลให้ฟิล์มบาง ZnO นำไฟฟ้าได้ดี ขณะที่เวลาในการเคลือบ 15 นาที พบว่าฟิล์มบาง ZnO เกรนมีขนาดเล็ก ระยะห่างระหว่างเกรนมาก และความสมบูรณ์ของผลึกน้อยจึงมีผลทำให้ฟิล์มบาง ZnO ไม่นำไฟฟ้าซึ่งสันนิษฐานว่ามีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงมาก เมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 30 45 และ 60 นาที ทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น เกรนใหญ่ขึ้น ระยะห่างระหว่างเกรนลดลง และความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้นจึงทำให้ฟิล์มบาง ZnO นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

### สรุปผลการทดลอง

ฟิล์มบาง ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ที่เวลาเคลือบต่างกัน (15 30 45 และ 60 นาที) ฟิล์มบาง ZnO ที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ตซ์ไฮต์ ในระนาบ (002) โดยผลึกของ ZnO มีการเติบโตขึ้นตามแกน c (c-axis) โดยขนาดเกรน ความสมบูรณ์ของผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้น ในขณะที่สภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงลดลงตามระยะเวลาเคลือบ แสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนและความสมบูรณ์ของผลึกมีผลต่อการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO เมื่อเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น และผลึกที่สมบูรณ์ขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีมีผลให้ฟิล์มบาง ZnO นำไฟฟ้าได้ดี

ผลการศึกษายืนยันได้ว่าโครงสร้างผลึก ขนาดเกรน และการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคอาร์เอฟสเป็คเตอริงสามารถปรับปรุงให้เหมาะสมได้ โดยการเปลี่ยนระยะเวลาในการเคลือบ ซึ่งสามารถจะนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนวิชัย จากสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต และสถานที่สำหรับการทำงานวิจัยจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### References

- [1] Lim, J. -H., Kang, C. -K., Kim, K. -K., Park, I, -K., Hwang, D. -K., & Park, S. -J. (2006). UV electroluminescence emission from ZnO light-emitting diodes grown by high-temperature radiofrequency sputtering. *Advance Material*, 18(20), 2720–2724.
- [2] Son, N. T., Noh, J.-S., & Park, S. (2016). Role of ZnO thin film in the vertical aligned growth of ZnO nanorods by chemical bath deposition. *Applied Surface Science*, 379, 440–445.
- [3] Alhadi, A., Zhi, Z., Gao, Y., Gao, S., Jiao, S., Wang, D., & Wang, J. (2018). Influence of different substrates on ZnO nanorod arrays properties. *Solid State Sciences*, 85, 21–25.
- [4] Pradhan, B., Batabyal, S. K., & Pal, A. J. (2007). Vertically aligned ZnO nanowire arrays in Rose Bengal-based dye-sensitized solar cells. *Solar Energy & Solar cell*, 91(9), 769–773.
- [5] Strano, V., Urso, R. G., Scuderi, M., Iwu, K. O., Simone, F., Ciliberto, E., Spinella, C., & Mirabella, S. (2014). Double role of HMTA in ZnO nanorods grown by chemical bath deposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(48), 28189–28195.
- [6] Ekem, N., Korkmaz, S., Pat, S., Balbag, M. Z., Cetin, E. N., & Ozmumcu, M. (2009). Some physical properties of ZnO thin films prepared by RF sputtering technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(12), 5218–5222.
- [7] Ammaih, Y., Lfakir, A., Hartiti, B., Ridah, A., Thevenin, P., & Siadat, M. (2014). Structural, optical and electrical properties of ZnO:Al thin films for optoelectronic applications. *Optical and Quantum Electronics*, 46(1), 229–234.
- [8] Dai, L.P., Deng, H., Mao, F. Y., & Zang, J. D. (2008). The recent advances of research on p-type ZnO thin film. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 19(8-9), 727–734.
- [9] Malik, G., Mourya, S., Jaiswal, J., & Chandra, R. (2019). Effect of annealing parameters on optoelectronic properties of highly ordered ZnO thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 100, 200–213.
- [10] Gerbreders, V., Sarajevs, P., Mihailova, I., & a Tamanis, E. (2015). The kinetic study of hydrothermal growth of ZnO nanorod array films. *Latvian Journal of Physics and Technical Science*, 52(5), 20–27.



- [11] Baradaran, M., Ghodsi, F. E., Bittencourt, C., & Llobet, E. (2019). The role of Al concentration on improving the photocatalytic performance of nanostructured ZnO/ZnO:Al/ZnO multilayer thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 788, 289–301.
- [12] Hjiri, M., Aida, M. S., Lemine, O. M., & El Mir, L. (2019). Study of defects in Li-doped ZnO thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 89, 149–153.
- [13] Khomchenco, V., Sopinsky, M., Mazin, M., Danko, V., Lytvyn, O., & Piryatinskii, Y. (2019). The violet luminescence band in ZnO & ZnO-Ag thin films. *Journal of Luminescence*, 213, 519–524.
- [14] Islam, M. R., Rahman, M., Farhad, S. F. U., & Podder, J. (2019). Structural, optical and photocatalysis properties of sol-gel deposition Al-doped ZnO thin films. *Surface and Interfaces*, 16, 120–126.
- [15] Zheng, Z., Lin, J., Song, X., & Lin, Z. (2018). Optical properties of ZnO nanorod films prepared by CBD method. *Chemical Physics Letters*, 712, 155–159.
- [16] Ghayour, H., Rezaie, H. R., Mirdamadi, Sh., & Nourbakhsh, A. A. (2011). The effect of seed layer thickness on alignment and morphology of ZnO nanorods. *Vacuum*, 86(1), 101–105.