



KKU SCIENCE JOURNAL

Journal Home Page : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ>

Published by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand



การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งแสงซึ่งค่ออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีการจุ่มเคลือบแบบโซล-เจล

Study of the Properties of Transparent Conducting Zinc Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Dip Coating Method

วรารณ นิลสภา¹ กรกช วิภาหัทสน์² อุกกฤษณ์ ลิมปรังษี² และ ชัญญา เสริมศรีทอง^{2*}Waraporn Nisspa¹, Korakod Wiphahat², Aukkrit Limparangsee² and Chanya Sermsrithong^{2*}¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี 76000²สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000¹Department of Physics and Technology, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi, 76000, Thailand²Department of Physics and General Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซึ่งค่ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล และด้วยวิธีการเคลือบจุ่ม ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นในการเคลือบที่แตกต่างกันเป็น 1 3 และ 5 ชั้น เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางซึ่งค่ออกไซด์ให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมตรงตามจุดประสงค์การใช้งาน และการประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงและตัวนำโปร่งแสง จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าฟิล์มบางซึ่งค่ออกไซด์มีลักษณะสัณฐานวิทยาที่มีอนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และจากการทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มมามาน (FT-Raman) พบว่ามีความเป็นผลึกที่ดีมีพีคหลักที่สอดคล้องกับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ จากการศึกษาสมบัติทางแสงโดยทดสอบการส่องผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) พบว่าฟิล์มบางซึ่งค่ออกไซด์มีค่าการส่องผ่านแสงอยู่ในช่วง 85% ถึง 95% ซึ่งค่าการส่องผ่านแสงจะลดลงเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.27 eV ถึง 3.29 eV และจากการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นด้วยวิธีวัด 4 จุด (Four point probe) พบว่าฟิล์มบางซึ่งค่ออกไซด์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นอยู่ในช่วง $1.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ ถึง $2.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ โดยมีค่าลดลง เมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าจำนวนชั้นในการจุ่มเคลือบฟิล์มบางมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางและสามารถนำไปพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบางซึ่งค่ออกไซด์เพื่อนำประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงและเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงต่อไปได้

*Corresponding Author, E-mail: chanya14.th@gmail.com

Received date: 11 February 2025 | Revised date: 4 April 2025 | Accepted date: 5 April 2025

doi: 10.14456/kkuscij.2025.6

ABSTRACT

This research aims to study the structural, optical, and electrical properties of ZnO thin films prepared by the sol-gel process and dip-coating method under varying coating layer conditions of 1, 3 and 5 layers. The objective was to improve the properties of the ZnO thin films in order to get the proper performance according to the purpose of use and applications in optical electronics and translucent conductors. The analysis of scanning electron microscopy (SEM) showed that the surface morphology of the ZnO films became more uniform in particle distribution with an increasing number of coating layers. The analysis of X-ray diffraction (XRD) and FT-Raman spectroscopy showed that the dominant crystal structure matches the hexagonal wurtzite crystal structure. The optical properties were studied by using UV-Vis spectroscopy, where the films had a light transmittance ranging from 85% to 95%. The transmittance decreased as the number of coating layers increased. The bandgap was found to range from 3.27 eV to 3.29 eV. The sheet electrical resistance analysis using the four-point probe method showed that the films had sheet resistance values ranging from $1.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ to $2.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$, with sheet resistance decreasing as the number of coating layers increased. The results of this study indicated that the number of coating layers in the dip-coating process affected various properties of the thin film. This understanding can be applied to further develop and enhance the properties of ZnO thin films for optoelectronic applications and their use as transparent electrodes.

คำสำคัญ: ซิงค์ออกไซด์ กระบวนการโซล-เจล การเคลือบจุ่ม ฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งแสง

Keywords: ZnO, Sol-Gel Method, Dip Coating, Transparent Conducting

บทนำ

การดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบันมีการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้อย่างเป็นประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ มีหน้าที่ใหม่ ๆ และมีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทำให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ และเนื่องจากประสิทธิภาพที่เห็นได้ชัดเจนด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับแต่งมาโดยเฉพาะคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพ วัสดุนาโนรูปแบบต่าง ๆ ได้รับความสนใจอย่างมากกับการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น อนุภาคนาโน (Sharma *et al.*, 2012) จุดควอนตัม (Garcia de Arquer *et al.*, 2021) เส้นลวดนาโน (Ding and Wang, 2009) ฟิล์มบาง (Muchuweni *et al.*, 2017) ท่อนาโน (Madlol, 2017) เป็นวัสดุที่มีประโยชน์สำหรับการค้นคว้าและวิจัย ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงอย่างแพร่หลาย เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีแถบพลังงานที่กว้างและเป็นแบบตรงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.37 eV (Lokhande and Uplane, 2000) ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางแสงต่าง ๆ เช่น ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Muslih and Kim, 2017) ชั้นวินโดว์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (Husna *et al.*, 2020) จอภาพผลึกเหลว (Mustapha *et al.*, 2021) โดยงานวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel) และเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีการเคลือบจุ่ม (Dip coating method) (Marlon *et al.*, 2012; Bari *et al.* 2019; Toubane *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีการเคลือบที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มบาง เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่จำนวนชั้นในการเคลือบแตกต่างกัน

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารละลายโซล-เจลซิงค์ออกไซด์

นำสารซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AR grade) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ละลายในเอทานอลบริสุทธิ์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมไดเอทานอลเอมายด์ (DEA) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนให้เข้ากันละลายด้วยเครื่องกวนให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

2. การเตรียมด้วยวิธีการเคลือบจุ่ม

ทำการเคลือบจุ่มฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกสไลด์ขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร โดยกำหนดอัตราความเร็วในการดึงกระจกสไลด์ขึ้นในอัตรา 60 รอบ/นาที ทำการจุ่มเคลือบจำนวน 1 ชั้น (ZnO_D1) จุ่มเคลือบจำนวน 3 ชั้น (ZnO_D3) และจุ่มเคลือบจำนวน 5 ชั้น (ZnO_D5) เมื่อทำการเคลือบจุ่มเสร็จแต่ละชั้นนำกระจกสไลด์ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่ทำการเคลือบจุ่มแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส (กัญจน์ชญาและคณะ, 2559) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

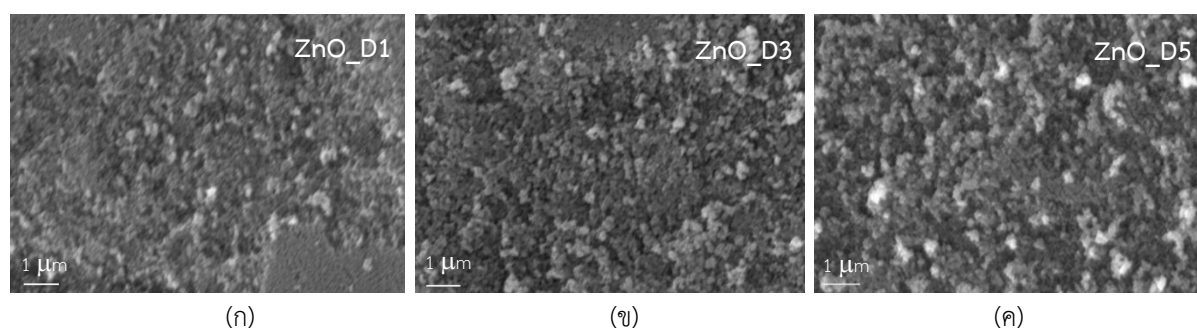
3. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ทำการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยการทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) และทดสอบการกระเจิงของแสงด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มมามาน (FT-Raman) ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการทดสอบการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectroscopy) และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four point probe)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

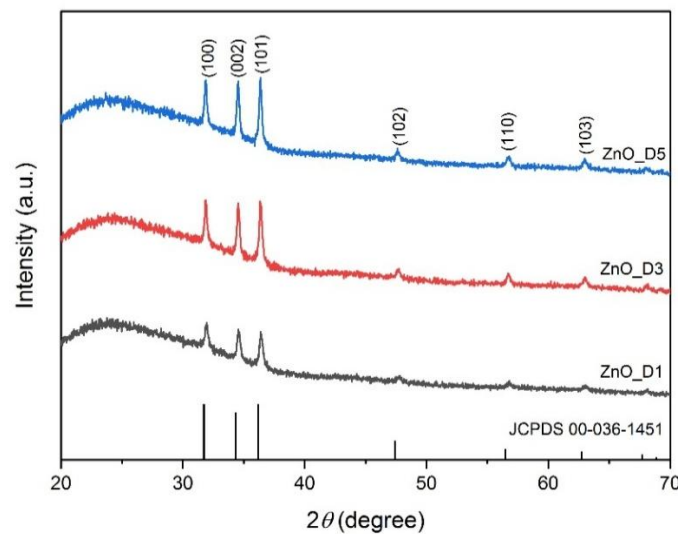
นำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ไปทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มบางด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น VEGA พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคที่กระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้นอนุภาคของซิงค์ออกไซด์จะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น ช่องว่างระหว่างเกรนลดลงและมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น เนื่องมาจากเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้นจะมีการก่อตัวสะสมของอะตอมเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่สมบูรณ์มากขึ้น (วัชชัยและคณะ, 2563) และคาดการณ์ว่าเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบฟิล์มบางมากขึ้นนั้นส่งผลให้ความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์; จุ่มเคลือบจำนวน 1 ชั้น (ก) จุ่มเคลือบจำนวน 3 ชั้น (ข) จุ่มเคลือบจำนวน 5 ชั้น (ค)

2. ผลการทดสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 phaser ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ปรากฏพิคการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ เท่ากับ 31.9° 34.5° 36.3° 47.7° 56.7° และ 62.9° สัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบน (100) (002) (101) (102) (110) และ (103) ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับมาตรฐาน JCPDS No. 00-036-1451 (Islam *et al.*, 2019) แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งพิคที่ปรากฏมีความสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบนของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ (Hexagonal wurtzite) และเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้นความเข้มของพิคการเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาของฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีการก่อตัวสะสมของอะตอมซิงค์ออกไซด์เป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น มีโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบมากขึ้นและขนาดเกรนโตขึ้น (รัชชัยและคณะ, 2563; Siti *et al.*, 2019)



รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากรูปที่ 2 เป็นกราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถคำนวณหาขนาดเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้ Scherrer's equation ดังสมการที่ (1) (Siti *et al.*, 2019)

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

โดยที่ D คือ ขนาดของเกรน, λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.5406 Å), β คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (FWHM) และ θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก โดยในงานวิจัยนี้ทำการหาค่า FWHM จาก 3 พิค ได้แก่ ระนาบ (100) (002) และ (101) แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าเมื่อจุ่มเคลือบฟิล์มเป็นจำนวน 1 3 และ 5 ชั้น ค่า FWHM เฉลี่ยมีค่าลดลง และขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น (Siti *et al.*, 2019) โดยมีขนาดเกรนเท่ากับ 26.51 30.00 และ 30.60 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและสอดคล้องกับการทดลองของ รัชชัยและคณะ (2563) ที่ได้ทำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟสเป็คเตอริ่งที่เมื่อระยะเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นค่า FWHM ลดลงส่งผลให้ขนาดเกรนโตขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย (Grain size, D) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

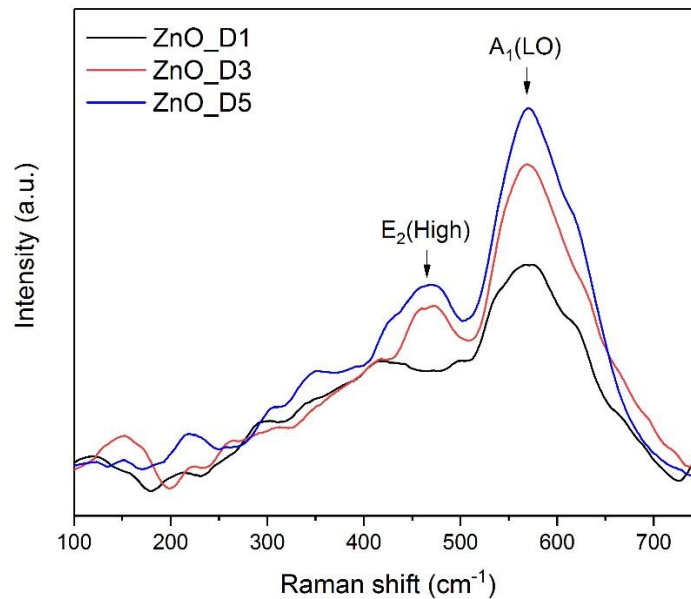
ตัวอย่าง	ระนาบ (hkl)	2θ (degree)	FWHM	Grain size, D (nm)
ZnO_D1	100	31.9	0.30293	28.49
	002	34.5	0.29204	29.75
	101	36.3	0.40981	21.31
	ค่าเฉลี่ย		0.33493	26.51
ZnO_D3	100	31.9	0.24794	33.47
	002	34.5	0.25986	31.93
	101	36.3	0.33738	24.59
	ค่าเฉลี่ย		0.28173	30.00
ZnO_D5	100	31.9	0.25028	33.15
	002	34.5	0.25401	32.67
	101	36.3	0.31707	26.17
	ค่าเฉลี่ย		0.27379	30.66

3. ผลการทดสอบโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การทดสอบการกระเจิงของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มมรามา (FT-Raman) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Vertex 70 + RAM II ลักษณะรามานสเปกตรัมของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าปรากฏเพียงโหมด $E_2(\text{High})$ และ $A_1(\text{LO})$ เท่านั้น เป็นไปตามทฤษฎีของรามาน (Curcio *et al.*, 2024) ลักษณะรามานสเปกตรัมมีความเข้มของพีกเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเมื่อจำนวนชั้นในการจุ่มเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น มีโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบมากขึ้น ข้อบกพร่องลดลงจึงทำให้การกระเจิงของแสงเพิ่มขึ้น โดยโหมด $E_2(\text{High})$ ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นช่วง $428 - 468 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นี้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์สอดคล้องกับผลที่ได้จาก XRD และจากรูปที่ 3 จะพบว่าพีก $E_2(\text{High})$ ของฟิล์มบางที่จุ่มจำนวน 1 ชั้นมีการเลื่อนไปทางความถี่ต่ำ (Rad shift) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากที่ขนาดเกรนที่เล็กและฟิล์มมีความบางมากจึงทำให้เกิดความแรงดึงในฟิล์มบาง ส่วนโหมด $A_1(\text{LO})$ ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นช่วง $558 - 563 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งความเข้มของพีกเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องของฟิล์มลดลงเมื่อจำนวนในการจุ่มเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 2 โดยปกติแล้ว ZnO ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์จะมีโหมด Optical phonon จำนวน 6 โหมด คือ $A_1 + 2B_1 + E_1 + 2E_2$ โดยโหมดของ A_1 E_1 และ E_2 จะตอบสนองกับรามาน ส่วนโหมด B_1 จะไม่ตอบสนองกับรามาน และโหมด A_1 และ E_1 เป็น Polar phonon แยกเป็นการสั่นแบบ Transverse optical (TO) และ Longitudinal optical (LO) ส่วน E_2 เป็น Non-polar phonon (Siti *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2019; Gultekin and Akbulut, 2016)

ตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งเลขคลื่นของโหมดการสั่นของโฟนอนของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

Mode	Raman shift (cm^{-1})		
	ZnO_D1	ZnO_D3	ZnO_D5
$E_2(\text{High})$	428	468	466
$A_1(\text{LO})$	558	563	560



รูปที่ 3 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

4. ผลการวิเคราะห์ค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การทดสอบการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 360 - 1000 นาโนเมตร โดยมีขอบการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นระหว่าง 369 - 371 นาโนเมตร มีค่าการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (กัญจน์ชญาและคณะ, 2559) อยู่ในช่วง 85% - 95% ซึ่งค่าการส่องผ่านแสงนั้นลดลงเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น จากที่คาดการณ์ได้ว่าความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นในการเคลือบฟิล์มที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้การส่องผ่านแสงลดลง และค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางมีค่าอยู่ระหว่าง 3.27 eV ถึง 3.29 eV แสดงดังตารางที่ 3

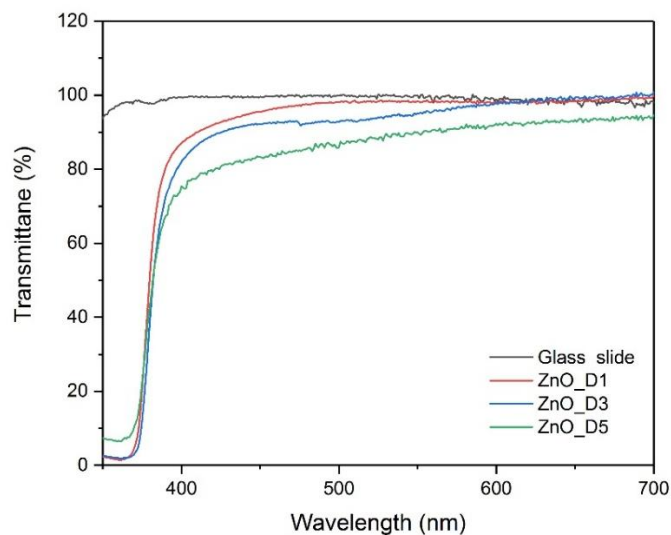
การหาค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ซึ่งหาได้จากค่าดูดกลืนแสงตามสมการที่ (2) (Muchuweni *et al.*, 2017)

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

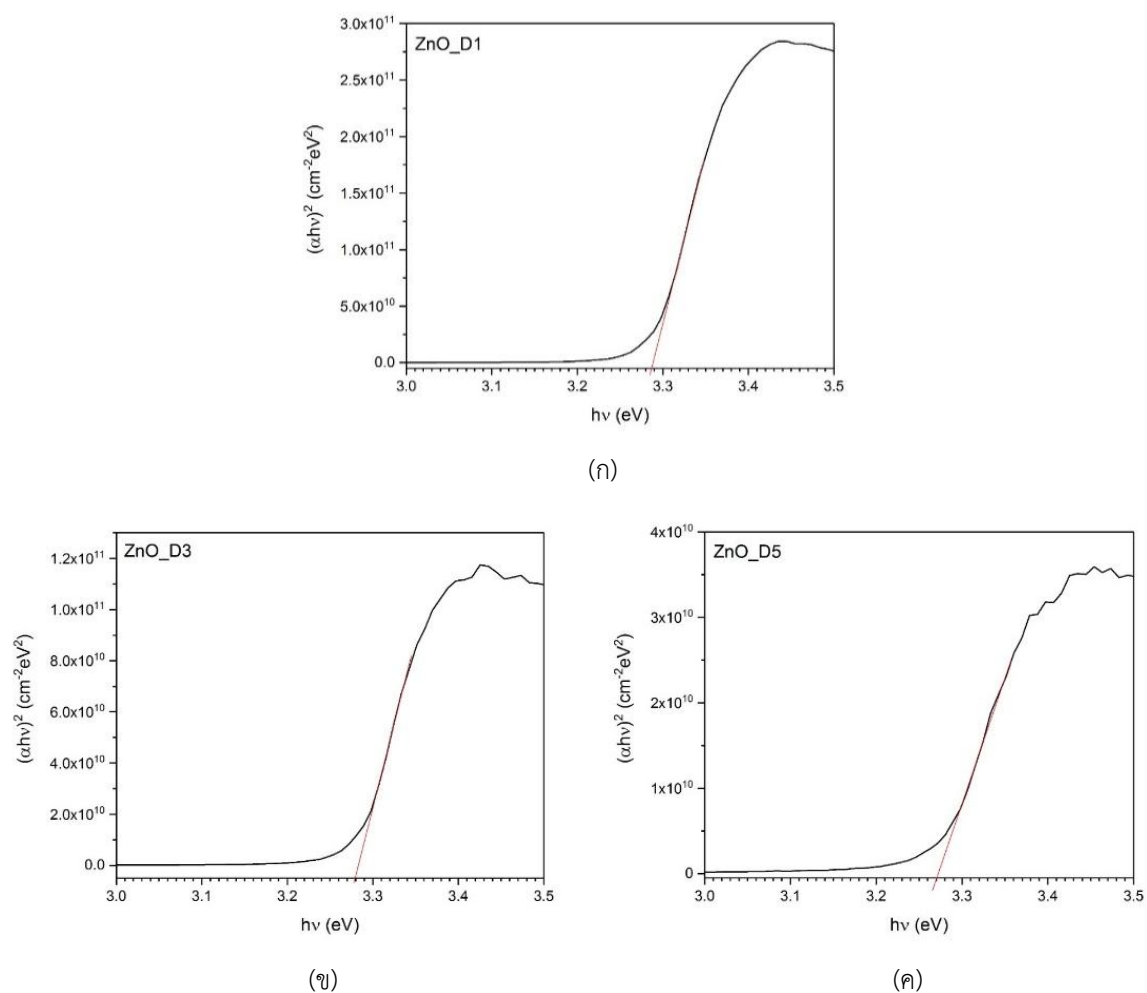
และแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมนแบบตรงสามารถหาได้ตามสมการที่ (3) (Klein *et al.*, 2023)

$$(\alpha h\nu)^2 = k(h\nu - E_g) \quad (3)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง, d คือ ความหนา T คือ ค่าการส่องผ่านแสง k คือค่าคงที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ν คือ ความถี่ของโฟตอน และ E_g คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถประมาณได้จากจุดตัดแกนนอนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ตามวิธีการของทอซ (Tauc's plot) (Zhong *et al.*, 2023) แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ค่าการส่องผ่านแสง (%T) ของกระจกสไลด์และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ตามวิธีการของทอช (Tauc's plot); จุ่มเคลือบจำนวน 1 ชั้น (ก) จุ่มเคลือบจำนวน 3 ชั้น (ข) จุ่มเคลือบจำนวน 5 ชั้น (ค)

ตารางที่ 3 แสดงค่าการส่องผ่านแสง (%T) ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) และค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (R_s) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

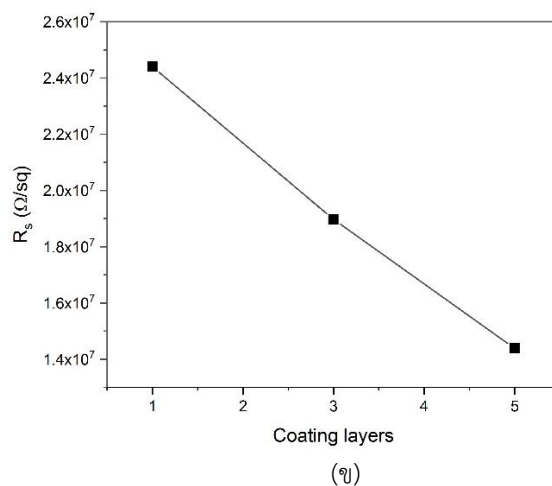
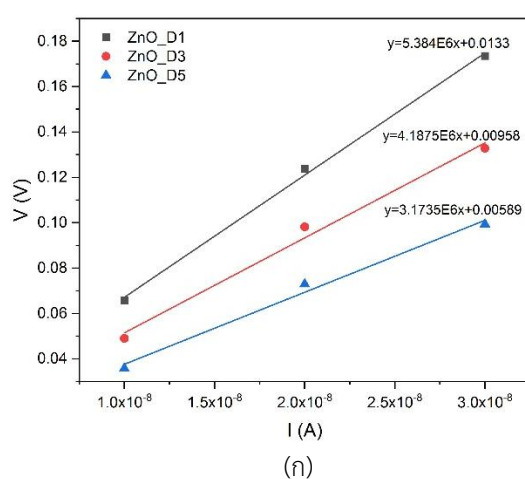
ตัวอย่าง	%T ที่ความยาวคลื่น 550 nm	E_g (eV)	R_s (Ω/sq)
ZnO_D1	95	3.29	2.44×10^7
ZnO_D3	92	3.28	1.90×10^7
ZnO_D5	85	3.27	1.44×10^7

5. ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ทำการทดสอบด้วยวิธีวัด 4 จุด (Four-point probe) ยี่ห้อ Jandel รุ่น RM3-AR โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1×10^{-8} 2×10^{-8} และ 3×10^{-8} แอมแปร์ จากนั้นหาความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 6 (ก) เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์มบางตามสมการที่ (4) (Naftaly *et al.*, 2021)

$$R_s = 4.532 \times \frac{V}{I} \quad (4)$$

โดยที่ R_s คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และ I คือ กระแสไฟฟ้า พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เคลือบฟิล์มเป็นจำนวน 1 3 และ 5 ชั้น มีค่าความต้านไฟฟ้าเชิงแผ่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.44×10^7 1.90×10^7 และ $1.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3 และจากรูปที่ 6 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น จะมีความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นลดลง ซึ่งคาดการณ์ได้ว่าจำนวนชั้นในการเคลือบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นและช่องว่างระหว่างเกรนลดลงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นด้วย จึงทำให้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าได้ดีขึ้นตามจำนวนชั้นในการเคลือบ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (R_s) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ข)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล และเคลือบบนกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการเคลือบจุ่มเป็นจำนวน 1 3 และ 5 ชั้น พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ มีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 26.51 นาโนเมตร ถึง 30.66 นาโนเมตร และมีค่าการส่องผ่านแสงอยู่ในช่วง 85% ถึง 95% ซึ่งค่าการส่องผ่านแสงจะลดลงเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าอยู่ในช่วง 3.27 eV ถึง 3.29 eV และค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นอยู่ในช่วง $1.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ ถึง $2.44 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนชั้นในการเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีส่งผลให้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าได้ดีขึ้นตามจำนวนชั้นในการเคลือบ และจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าจำนวนชั้นในการจุ่มเคลือบฟิล์มบางมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีความเป็นผลึกสูง มีเกรนขนาดใหญ่และมีค่าการส่องผ่านแสงที่ดี แต่ยังคงมีความต้านทานที่สูงเมื่อเทียบกับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงของธนชัยและคณะ (2566) ดังนั้นสามารถนำไปพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อนำประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี อุปกรณ์การทดลอง สถานที่และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ไพโรจน์ ใจเดี่ยว ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องเคลือบจุ่ม (Dip-coating) ในการเคลือบฟิล์มบาง และงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ประจำปีงบประมาณ 2567

เอกสารอ้างอิง

- กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล, จิราภรณ์ พงษ์โสภา, ภัททิรา หอมหวาน และดุสิต งามรุ่งโรจน์ (2559). การสังเคราะห์และการวิเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ธนชัย พลเคน, พรนภา ช้วน, สุภารัตน์ กระแสโสม, พรชัย ชินสา และวิเชษฐ์ พลหาญ (2566). การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบสองขั้วไม่สมมาตร. วารสารวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม 2(1): 1 - 16.
- ธวัชชัย จันท์ทอง, ธนศ ญ วิเชียร, วีรวัฒน์ อินทรทัต, ศักดิ์ชาย เพชรช่วย และณัฐพงศ์ ถือดำ (2563). สมบัติเชิงโครงสร้างและไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปัตเตอริง. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ 23(2): 95 - 103.
- Bari, A.R., Bari, P.A. and Bari, R.H. (2019). Studies on sol-gel dip-coated nanostructured ZnO thin films. Journal of Nanostructures 9(2): 326 - 330. doi: 10.22052/JNS.2019.02.014.
- Curcio, A.L., Franco de Godoy, M.P., and Rodrigues, A.D.G. (2024). Raman spectroscopy as a method for structural characterization of ZnO-based systems at the nanoscale. Applied Nanoscience 14: 269 - 275. doi: 10.1007/s13204-023-02978-0.
- Ding, Y. and Wang, Z.L. (2009). Structures of planar defects in ZnO nanobelts and nanowires. Micron 40(3): 335342. doi: 10.1016/j.micron.2008.10.008.

- Garcia de Arquer, F.P., Talapin, D.V., Klimov, V.I., Arakawa, Y., Bayer, M. and Sargent, E.H. (2021). Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges. *Science Journal* 373(6555). doi: 10.1126/science.aaz8541.
- Gultekin, D. and Akbulut, H. (2016). Raman studies of ZnO products synthesized by solution based methods. *ACTA Physica polonica A* 129: 803 - 805. doi: 10.12693/APhysPolA.129.803.
- Husna, J., Sibuea, S.R., Sulaiman, O.K., Rafiq, Y.M., Suhardi, N., Nasution, A.H., Haramaini, T., Nasution, M.K., Ambri, M. and Rifqi, M.Z.A. (2020). The prospects of zinc oxide (ZnO) for window layer cigs solar cells. *ICMR 2019 8th International conference on Multidisciplinary research. European proceedings of Social and behavioural science* doi: 10.15405/epsbs.2020.03.03.85.
- Islam, M.R., Rahman, M., Farhad, S.F.U. and Podder, J. (2019). Structural, optical and photocatalysis properties of sol-gel deposited Al-doped ZnO thin films. *Surfaces and Interfaces* 16: 120 – 126. doi: 10.1016/j.surfin.2019.05.007.
- Klein, J., Kampermann, L., Mockenhaupt, B., Behrens, M., Strunk, J. and Bacher, G. (2023). Limitations of the Tauc Plot Method. *Advance function materials* 33: 2304523. doi: 10.1002/adfm.202304523.
- Lokhande, B.J. and Uplane, M.D. (2000). Structural, optical and electrical studies on spray deposited highly oriented ZnO films. *Applied Surface Science* 167(3 - 4): 243 – 246. doi: 10.1016/S0169-4332(00)00533-X.
- Madloli, R.A.A. (2017). Structural and optical properties of ZnO nanotube synthesis via novel method. *Results in Physics* 7: 1498 - 1503. doi: 10.1016/j.rinp.2017.04.018.
- Muchuweni, E., Sathiaraj, T.S. and Nyakoty, H. (2017). Synthesis and characterization of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Heliyon* 3(4) doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00285.
- Muslih, E.Y., and Kim, K.H. (2017). Preparation of Zinc Oxide (ZnO) Thin Films as Transparent Conductive Oxide (TCO) from Zinc Complex Compound on Thin Film Solar Cells: A Study of O₂ Effect on Annealing Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 214: 012001.
- Mustapha, N., Abdel Rafea, M., Aldaghri, O., Abdelaziz, B.B., and Ibnaouf, K.H. (2021). Influence of ZnO nanoparticles on the performance of LED based on oligomer thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32: 5479-5481. doi: 10.1007/s10854-021-05269-y.
- Naftaly, M., Das, S., Gallop, J., Pan, K., Alkhalil, F., Kariyapperuma, D., Constant, S., Ramsdale, C. and Hao, L. (2021). Sheet Resistance Measurements of Conductive Thin Films: A Comparison of Techniques. *Electronics* 10(8). doi: 10.3390/electronics10080960.
- Sharma, A., Singh, B.P., Dhar, S., Gondorf, A. and Spasova, M. (2012). Effect of surface groups on the luminescence property of ZnO nanoparticles synthesized by sol-gel route. *Surface Science* 606 (3 - 4): L13 - L17. doi: 10.1016/j.susc.2011.09.006
- Silva, M.N., Santilli, C.V. and Pulcinelli, S.H. (2012). Wettability and Photodegradation activity of sol-gel dip-coated zinc oxide films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 63: 230 – 234. doi: 10.1007/s10971-012-2721-y.

- Siti, H.R., Che Abdullah, C.A. and Mohannad Yusoff, M.Z. (2019). Investigations of structural and optical properties of zinc oxide thin films growth on various substrates. Results in Physics 13: 102146. doi: 10.1016/j.rinp.2019.02.082
- Song, Y., Zhang, Sh., Zhang, Ch., Yang, Y. and Lv, K. (2019). Raman Spectra and Microstructure of Zinc Oxide irradiated with Swift Heavy Ion. Crystals 9(8): 395. doi: 10.3390/cryst9080395.
- Toubane, M., Tala-Ighil, R., Bensouici, F., Bououdina, M., Souier, M., Liu, S., Cai, W. and Iratni, A. (2017). Sol concentration effect on ZnO nanofibers photocatalytic activity synthesized by sol-gel dip coating method. Materials Research Express 4(3). doi: 10.1088/2053-1591/aa61cf
- Zhong, H., Pan, F., Yue, Sh., Qin, Ch., Hadjiev, V., Tian, F., Lui, X., Lin, F., Wand, Zh. and Bao, J. (2023). Idealizing Tauc Plot for Accurate Bandgap Determination of Semiconductor with Ultraviolet-Visible Spectroscopy: A case Study for Cubic Boron Arsenide. The journal of Physical chemistry letters 14(9): 6702 - 6708. doi: 10.1021/acs.jpcclett.3c01416.

