

ผลกระทบในการเผาภายใต้แก๊สชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้าง
และสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการโซลเจล

Effect of Calcination under Different Gases on Structural and Optical Properties of Thin
Films of Zinc Oxide Prepared by Sol-gel Process

นารี โสรส* ปิยธิดา พรหมอ่อน เสาวลักษณ์ ชูทับ นรินทร์ สุขกรี และวัชรกร ศรีคำ

Naree Soros*, Piyatida Prom-on, Saowaluk Chutap, Narin Sukkree and Watcharakorn Srikom

สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Surat Thani

*Corresponding author e-mail: nareenaree.mi@gmail.com

(Received: October 25, 2020, Revised: December 17, 2020, Accepted: December 31, 2020)

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เตรียมด้วยเทคนิคโซลเจลโดยมีซิงค์อะซิเตทเป็นเป็นสารตั้งต้น แล้วนำไปเคลือบบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีหมุนเคลือบ (1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที) หลังจากนั้น นำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศที่แตกต่างกัน (อากาศ ไนโตรเจน และอาร์กอน) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เกิดผลึกได้ดี ก็ต่อเมื่อฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เกิดในบรรยากาศที่เป็นอากาศ และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีสมบัติทางแสงที่ดี โดยมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่าร้อยละ 90 ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น

คำสำคัญ: ซิงค์ออกไซด์ กระบวนการโซลเจล การหมุนเคลือบ การเผา

ABSTRACT

Zinc oxide thin films were prepared using a sol-gel technique with Zinc acetate as the substrate. It was then coated on a sliding glass by means of a rotating coating (1,500 rpm for 30 sec.). Then the Zinc oxide thin film was burned at 500 ° C for 2 hours under different atmospheres (air, nitrogen, and argon) to study the physical and optical properties of Zinc oxide thin films. The study found that Zinc oxide thin film produces good crystallization, only when the Zinc oxide thin film is formed in an air atmosphere. And the Zinc oxide thin film has good optical properties. With a light penetration greater than 90 % in the visible wavelength.

Keywords: ZnO, Sol-gel, spin coating, calcination

บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide:ZnO) เป็นที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก เนื่องจากซิงค์ออกไซด์แสดงสมบัติเฉพาะตัวโดดเด่น ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซด์ (wurtzite) ช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และมีพลังงานการเกาะเกี่ยวพันธะสูงประมาณ 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ (meV) ที่อุณหภูมิห้อง [1] ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติการดูดกลืนแสงหรือการเปล่งแสง การตอบสนองทางแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตถึงแสงสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ออป-

โพลีเอทิลีนไดออกไซด์ [2] แต่การนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์ยังไม่ดีพอ จึงมีการเพิ่มประสิทธิภาพของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการเจือสาร (doping) เข้าไป เช่น อลูมิเนียม แกลเลียม อินเดียม เงิน และฟลูออรีน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

กระบวนการเตรียมฟิล์มบางมีการศึกษาและวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เช่น วิธีการเคลือบแบบไอระเหย (evaporation) วิธีการสปัตเตอร์ (sputtering) และวิธีการเคลือบโดยสารละลายโซลเจล (Sol-gel) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเคลือบแบบไอระเหยและวิธีการสปัตเตอร์ มีขั้นตอนการทำยุ่งยาก ต้องทำในระบบสุญญากาศ ซึ่งมีต้นทุนสูงและแตกต่างกับวิธีการเคลือบโดยสารละลายโซลเจล โดยวิธีนี้มีขั้นตอนในการเตรียมสารที่ไม่ยุ่งยาก สามารถทำในระบบที่ไม่ใช่ระบบสุญญากาศได้ หรือเรียกอีกอย่างว่าระบบเปิด สามารถควบคุมปริมาณการเจือสารได้และใช้ต้นทุนต่ำ [3] ซึ่งมีงานวิจัยอื่น ๆ ได้ใช้วิธีการเคลือบโดยสารละลายโซลเจล เช่น งานวิจัยของ J. H. Tsai [4] โดยได้ทำการเคลือบแคโทดของพอลิเมอร์โซลาร์เซลล์ด้วย ZnO โดยวิธีโซลเจล และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน งานวิจัยของ S. Castro-Lopes [5] ทำการศึกษา ZnO ทั้งแบบบริสุทธิ์และเจือด้วยอนุภาคของเหล็กในระดับนาโนที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่มีต่อโครงสร้างระดับไมโครและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสาร งานวิจัยของ T. Ivanova [6] ทำการศึกษาฟิล์มบาง ZnO ซึ่งได้พร้อมกับไนโตรเจนและแกลเลียม ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง นอกจากนี้ ยังมีการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางสารละลาย (Solution Based Chemistry หรือ SBC) เช่น การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) การเคลือบแบบจุ่ม (dip coating) เป็นต้น การประดิษฐ์อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันได้คำนึงถึงความคุ้มค่าของต้นทุนการผลิตและต้นทุน [7]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลกระทบของแก๊สของบรรยากาศในการเผาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการโซลเจล ตลอดจนศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้แก๊สของบรรยากาศที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการวิจัยผลกระทบของบรรยากาศในการเผาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการโซลเจลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมโซลเจล

การเตรียมสารละลายในการทำโซลเจลโดยใช้ซิงค์อะซิเตตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เอทานอลบริสุทธิ์ 50 มิลลิลิตร และไดเอทานอลามีน 1 มิลลิลิตร นำซิงค์อะซิเตตกับเอทานอลบริสุทธิ์ผสมเข้าด้วยกันแล้วนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายแบบแท่งแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เมื่อสารละลายผสมกันแล้ว เกิดลักษณะเป็นสีขาว จากนั้นค่อย ๆ หยดเอทานอลเอมีนลงไปจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีใส จากนั้น กวนสารละลายอีกประมาณ 2 ชั่วโมง เมื่อได้โซลเจลแล้ว นำพาราฟิล์มและอลูมิเนียมฟอยล์มาปิดปากบีกเกอร์แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปผลิตฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบด้วยหมุนเคลือบ

2. ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองจากกระจกสไลด์

ตัดกระจกสไลด์ขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร² จากนั้น นำกระจกสไลด์มาล้างด้วยน้ำยาล้างจาน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด จากนั้น นำกระจกไปแช่ในน้ำปอลอดประจุ แล้วนำกระจกสไลด์มาล้างด้วยน้ำปอลอดประจุ (DI Water) อะซิโตน (acetone) เมทานอล (methanol) และไอโซโพรพานอล (isopropanol) โดยใช้เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง

(ultrasonic cleaner) ขั้นตอนละ 10 นาที ตามลำดับ หลังจากล้างกระจกสไลด์เสร็จแล้ว นำมาทำให้แห้งโดยวางบนเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

3. ขั้นตอนการหมุนเคลือบฟิล์ม

นำวัสดุฐานรองที่เตรียมไว้วางลงบนแป้นหมุนและเปิดระบบสุญญากาศ เพื่อยึดวัสดุฐานรองกับแป้นหมุน หยอดเจลที่เตรียมไว้ลงบนวัสดุฐานรอง โดยเคลือบด้วยการหมุนความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อเคลือบฟิล์มเสร็จในแต่ละแผ่นต้องนำไปให้ความร้อนโดยการวางไว้บนเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากกระบวนการที่กล่าวมา จึงได้ชิ้นงานหนึ่งชิ้น ลำดับถัดไป จึงทำชิ้นงานเพิ่มอีกรวมทั้งหมด 8 ชิ้น โดยกระบวนการเดิม เมื่อเคลือบเสร็จแล้ว นำไปเผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ เช่น บรรยากาศปกติ ไนโตรเจน และอาร์กอน เป็นต้น โดยเผาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) และอัตราการไหลของแก๊ส 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากนั้น วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างและทางแสง โดยวิเคราะห์จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และค่าการทะลุผ่านของแสง

4. ขั้นตอนศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction หรือ XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นสั้นในระดับอังสตรอม โดยวิธีการทดสอบนั้น ทำได้โดยนำชิ้นงานไปทดสอบกับเครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ โดยผลการทดสอบจะออกมาในรูปแบบกราฟ โดยลักษณะพีคของกราฟที่เกิดขึ้นสามารถบอกขนาดของเกรน (grain) หรือผลึกจำนวนมากจากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) [8]

5. ขั้นตอนศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-Visible

UV-VIS เป็นเทคนิคที่ใช้ในวิเคราะห์สมบัติและตรวจวัดปริมาณแสงของสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultra violet) และช่วงตามองเห็น (visible) โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 190-1,000 nm สารในธรรมชาติเมื่อถูกแสงตกกระทบในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น เครื่องมือที่ตรวจวิเคราะห์ปริมาณแสงเรียกว่า UV-VIS spectrophotometer หรือ UV-Vis [9] โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในงาน คือ Helios Gamma 110-240 Volts ซึ่งวิธีการทดสอบนั้น ทำได้โดยนำชิ้นงานไปทดสอบกับเครื่อง UV-Vis Spectrometer โดยผลการทดสอบจะออกมาในรูปแบบกราฟ ซึ่งแสดงระดับการทะลุผ่านของแสง ณ ความยาวคลื่นต่าง ๆ

ผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยการนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษามีรายละเอียด ดังนี้

1. ลักษณะของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ นั้น ได้แสดงไว้ในภาพที่ 1 เมื่อสังเกตลักษณะภายนอกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ เช่น บรรยากาศปกติ ไนโตรเจน และอาร์กอน เป็นต้น พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ มีลักษณะสีใส ซึ่งในเบื้องต้นไม่พบความแตกต่างกันจากการมองเห็นด้วยตา ดังนั้น จึงได้มีการวิเคราะห์ให้ละเอียดยิ่งขึ้น โดยทำการศึกษสมบัติต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และวิเคราะห์การทะลุผ่านแสง



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 1 ภาพฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ (ก) บรรยากาศปกติ (ข) บรรยากาศไนโตรเจน และ (ค) บรรยากาศอาร์กอน โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊ส 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

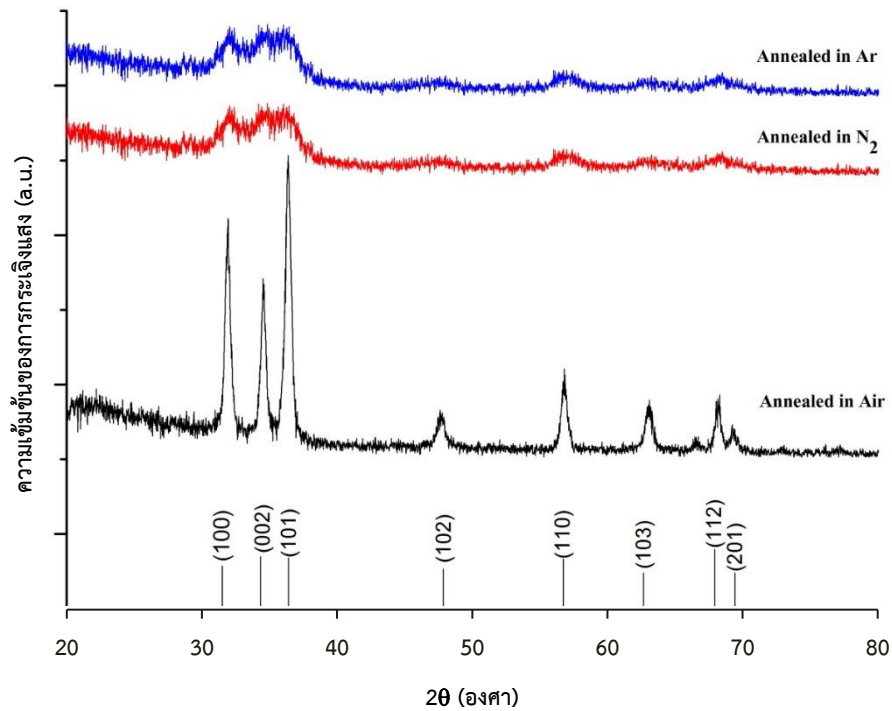
2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากภาพที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสี แสดงให้เห็นถึงความเป็นซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล (ICSD No. 157724) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้น มีระนาบผลึกที่ตำแหน่ง $2\theta = 31.78, 34.43, 36.27, 47.56, 56.62, 62.88, 67.98$ และ 69.12 องศา ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ตามลำดับ และพบระนาบการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดคือระนาบ (100), (002) และ (101) นอกจากนี้ พบว่าผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนกับอาร์กอนนั้น เกิดการก่อตัวเกิดเป็นผลึกได้ต่ำ ซึ่งแตกต่างจากการเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศนั้น พบการก่อตัวเกิดเป็นผลึกได้สูง ซึ่งดูได้จากกราฟการเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศ มีพีคสูงแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงการก่อตัวเป็นผลึกได้สูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงคาดการณ์ว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดผลึกซิงค์ออกไซด์ คือ ออกซิเจนในอากาศ เนื่องจากในอากาศนั้นมีส่วนประกอบของแก๊สหลัก คือ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน (สำหรับแก๊สชนิดอื่นไม่ได้พิจารณาเนื่องจากมีสัดส่วนปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับแก๊สหลัก) ซึ่งการทดลองฟิล์มที่เผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนกับอาร์กอนเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ที่สมบูรณ์ได้ยากและมีความเป็นผลึกที่ต่ำ นั้นหมายถึงไนโตรเจนกับอาร์กอนที่อยู่ในอากาศมีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกของซิงค์ออกไซด์ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้อย่างมากว่า สาเหตุของการเกิดผลึกซิงค์ออกไซด์ คือ ออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นหนึ่งในแก๊สประกอบหลักของอากาศเช่นเดียวกัน

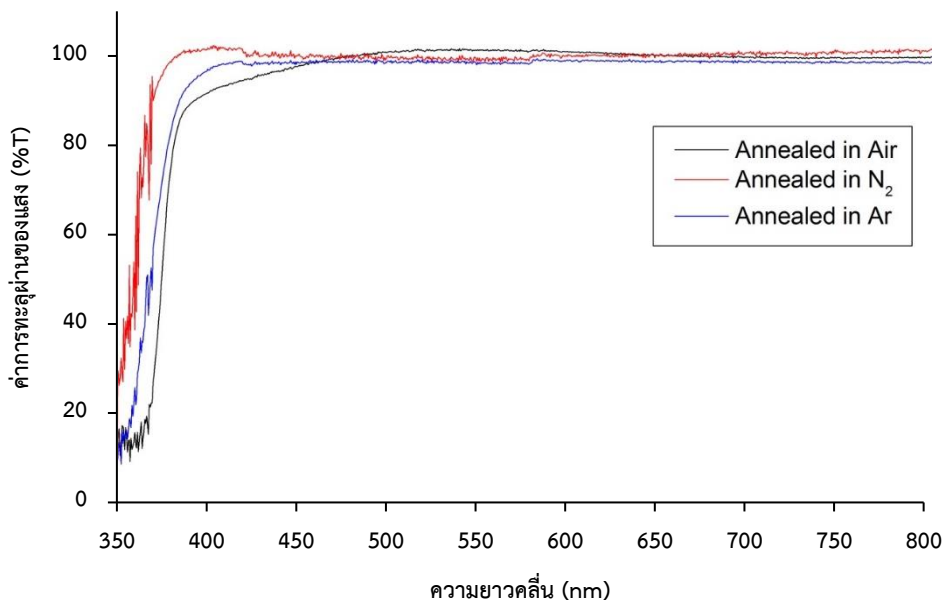
ผลการวัดการทะลุผ่านของแสงได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนกับอาร์กอนนั้น มีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศปกติ ซึ่งสังเกตได้จากช่วงความยาวคลื่น 375 ถึง 450 นาโนเมตร และพบค่าการทะลุผ่านของแสงเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ซึ่งเป็นผลของฟิล์มบางที่เผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน (N_2) อาร์กอน (Ar) และอากาศ (Air) ตามลำดับ และเมื่อความยาวคลื่นมากกว่าช่วงนี้ พบว่าค่าการทะลุผ่านของแสงทั้งสามบรรยากาศมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถึงกระนั้น ค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางที่เผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สทั้งสามชนิดล้วนมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่าร้อยละ 90 โดยถือว่ามีความการทะลุผ่านของแสงที่ดีและสอดคล้องกับงานวิจัยของ H. Jamilah [10, 11] ซึ่งได้กล่าวว่า การทะลุผ่านของแสงที่มีค่ามากขึ้นแสดงให้เห็นถึงการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานลดลง

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ เช่น บรรยากาศปกติ ไนโตรเจน และอาร์กอน เป็นต้น ผลการวัดวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ



ภาพที่ 2 กราฟวิเคราะห์โครงสร้างจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เผาภายใต้บรรยากาศต่าง ๆ โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊ส 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที ซึ่งพบพีคที่เด่นชัดที่ตำแหน่ง $2\theta = 31.78, 34.43, 36.27$ องศา โดยสัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002) และ (101) ตามลำดับ



ภาพที่ 3 การวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงจากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

เห็นได้ว่าฟิล์มบางที่เผาในบรรยากาศไนโตรเจนและอาร์กอนเกิดเป็นผลึกได้ต่ำ ซึ่งแตกต่างจากการเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศนั้น พบการก่อตัวเกิดเป็นผลึกซิงค์ออกไซด์ได้สูง ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้อย่างมากว่า สาเหตุของการเกิดผลึกซิงค์ออกไซด์ คือ ออกซิเจนในอากาศ และสำหรับค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางที่เผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนนั้น มีค่าการทะลุผ่านของแสงมากที่สุด แต่ถึงกระนั้น ค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางที่เผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สทั้งสามชนิดล้วนมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่าร้อยละ 90 ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น โดยมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 375 นาโนเมตร ขึ้นไป

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น
2. ควรศึกษาให้มากยิ่งขึ้นว่าปัจจัยที่ก่อตัวเกิดเป็นผลึกซิงค์ออกไซด์ได้สูงจากการเผาฟิล์มบางในอากาศนั้นคือออกซิเจนอย่างเดียวหรือไม่ หรือมีแก๊สอื่นในอากาศที่มีอิทธิพลร่วมด้วย
3. ควรมีการศึกษาถึงสาเหตุที่ฟิล์มบางที่เผาในบรรยากาศไนโตรเจนมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิชญ์ เพชรภา หัวหน้าห้องปฏิบัติการ และนายวุฒิชัย สีนอเนตร พนักงานที่ปรึกษาตลอดจนคณาจารย์สาขาฟิสิกส์ทุกท่านสำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะ และขอบพระคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังที่ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ต่าง ๆ ในการทำการวิจัยเรื่องนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. A. Coleman and C. Jagadish, "Basic properties and applications of ZnO, Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures," in *Processing of properties and applications*, London, England, 2006, pp. 1-20.
- [2] N. Yonghong, C. Xiaofeng, W. Guogen, H. Guangzhi, Y. Zhousheng and W. Xianwen, "Preparation, characterization and property study of Zinc oxide nanoparticles-via a simple solution-combusting method," *Nanotechnology*, vol. 15, pp.15-20, 2007.
- [3] K. Chongsri, W. Sinornate, K. Boonyarattanakalin and W. Pecharapa. "Growth and Characterization of Ga/F Co-Doped ZnO Nanorods/Nanodisks via Hydrothermal process," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 16, pp. 12962-12966, 2016.
- [4] J. H. Tsai, M. C. Tsai, C. Y. Sung and P. T. Huang. "Significant increase in current density of inverted polymer solar cells by induced-crystallization of sol-gel ZnO embedded with ZnO-NP," *Organic Electronics*, vol. 86, pp. 105891, 2020.
- [5] S. Castro-Lopes, Y. Guerra, A. Silva-Sousa, D.M. Oliveira, L.A.P. Gonçalves, A. Franco and E. Padrón-Hernández. "Influence of pH on the structural and magnetic properties of Fe-doped ZnO nanoparticles synthesized by sol gel method," *Solid State Sciences*, vol. 109, pp. 106438, 2020.
- [6] T. Ivanova, A. Harizanova, T. Koutzarova, B. Vertruyen and R. Closset. "Structural and optical characterization of nitrogen and gallium co-doped ZnO thin films, deposited by sol-gel method," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1206, pp. 127773, 2020.

- [7] อีรวุฒิ สำเภา และนันทิ โคตรทุมมี, การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ Cu_2ZnSnS_4 . สกลนคร: มหาวิทยาลัยราชภัฏ สกลนคร, 2561.
- [8] ทันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ, “การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction,” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์ บริการ*, ปีที่ 62, ฉ.194, น. 34-35, 2557.
- [9] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2563, 20 พฤศจิกายน), หลักการของเครื่อง UV-VIS, [ออนไลน์]. จาก: http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=46
- [10] H. Jamilah, M. M. Aliyua, M. A. Islama, N. R. Hamzaha, M. S. Hossaina, M. R. Karimc and N. Amina, “Influence of annealing temperature on the properties of ZnO thin films grown by sputtering,” *Energy Procedia*, vol. 25, pp. 55–61, 2012.
- [11] อัญธิกา ละครไชย, อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน และพิษณุ พูลเจริญศิลป์, “ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรังโดยโหมดโลหะ โหมดทรานซิชัน และโหมดออกไซด์,” *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, ปีที่ 47, ฉ. 2, น. 327-338, 2562.