

ผลกระทบของอุณหภูมิวัสดุฐานรองต่อคุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วย  
อลูมิเนียมที่เตรียมด้วยเทคนิค อาร์-เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Effect of substrate temperature on properties of Al-doped zinc oxide films  
prepared by RF magnetron sputtering

ณรงค์ชัย บุญโญปกรณ์

โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม  
หน่วยวิจัยการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม  
nb\_narongk@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมถูกเตรียมด้วยเทคนิค อาร์-เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิห้อง 250 300 350 400 และ 450 °C) และถูกอบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิวัสดุฐานรองต่อโครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางแสง - ไฟฟ้าของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่วัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงถึงโครงสร้างผลึกของออกไซด์ของสังกะสีสำหรับทุกอุณหภูมิวัสดุฐานรอง ในทำนองเดียวกันเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงเฉลี่ยในช่วงที่ตามองเห็นมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้พาหะนำประจุเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองเพิ่มจากอุณหภูมิห้องถึง 400 °C แต่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นเป็น 450 °C อย่างไรก็ตามพบว่าสภาพคล่องตัวมีค่าใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานแผ่นที่น้อยที่สุดที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 28.2 Ω/sq สำหรับฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมเตรียมที่อุณหภูมิวัสดุฐานรอง 400 °C

คำสำคัญ: ฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม เทคนิค อาร์-เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง อุณหภูมิวัสดุฐานรอง

## Abstract

*In this research, Al-doped zinc oxide films were prepared by RF magnetron sputtering technique at different substrate temperatures (room temperature, 250, 300, 350, 400, and 450 °C) and annealed in vacuum at 500 °C in order to study effect of substrate temperature on crystal structure and optical – electrical properties of deposited Al-doped zinc oxide films. From experimental results, it was found that the crystal structure of all deposited films showed zinc oxide structure and, in the same way, the average percent transmission in visible light region were over 80 percent. For electrical property, it was found that carrier concentration was improved as the substrate temperature increased from room temperature – 400 °C but it was decreased as the substrate temperature increased to 450 °C. However, it was found that mobility was in the same order. The lowest sheet resistance achieved was about 28.2 Ω/sq for the Al-doped zinc oxide film prepared at substrate temperature of 400 °C*

**Keywords:** Al-doped zinc oxide film, RF magnetron sputtering technique, substrate temperatures

## 1. บทนำ

ฟิล์มตัวนำโปร่งแสงมีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายได้แก่ เซลล์สุริยะ จอแสดงผลต่าง ๆ และเซนเซอร์ตรวจจับแก๊สเชิงแสง เป็นต้น ฟิล์มตัวนำโปร่งแสงสามารถเตรียมได้จากสารตั้งต้นหลายชนิดและจากหลายเทคนิค โดยสารตั้งต้นที่เป็นที่นิยมใช้คือ ออกไซด์ของอินเดียมเจือด้วยดีบุก เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ของอินเดียมเจือด้วยดีบุกที่เตรียมได้มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ( $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ) และมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็นมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากอินเดียมเป็นธาตุที่มีราคาแพงและพบได้ค่อนข้างน้อยในธรรมชาติ จึงมีความพยายามในการนำสารตั้งต้นชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาใช้ทดแทนเช่น ออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม เนื่องจากมีราคาถูกกว่ามาก อีกทั้งยังมีมากในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามก็อาจต้องยอมรับถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อาจจะด้อยกว่าออกไซด์ของอินเดียมเจือด้วยดีบุก

ฟิล์มตัวนำโปร่งแสงสามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิคที่หลากหลาย โดยเฉพาะเทคนิค อาร์ – เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอบนพื้นที่ที่กว้างได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ – เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริงมีพารามิเตอร์ที่สามารถควบคุมในระหว่างการเคลือบฟิล์มได้แก่ อุณหภูมิวัสดุฐานรอง [1-4] กำลังไฟฟ้า [4] และการปรับปรุงฟิล์มด้วยความร้อน [1] เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ฟิล์มตัวนำโปร่งแสงออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมถูกเตรียมด้วยเทคนิค อาร์ – เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองแตกต่างกันตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 450 องศาเซลเซียส และอบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิวัสดุฐานรองต่อคุณสมบัติของฟิล์มตัวนำโปร่งแสงออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้

## 2. วัตถุประสงค์ในการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิวัสดุฐานรองต่อโครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางแสง – ไฟฟ้าของฟิล์มตัวนำโปร่งแสงออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้

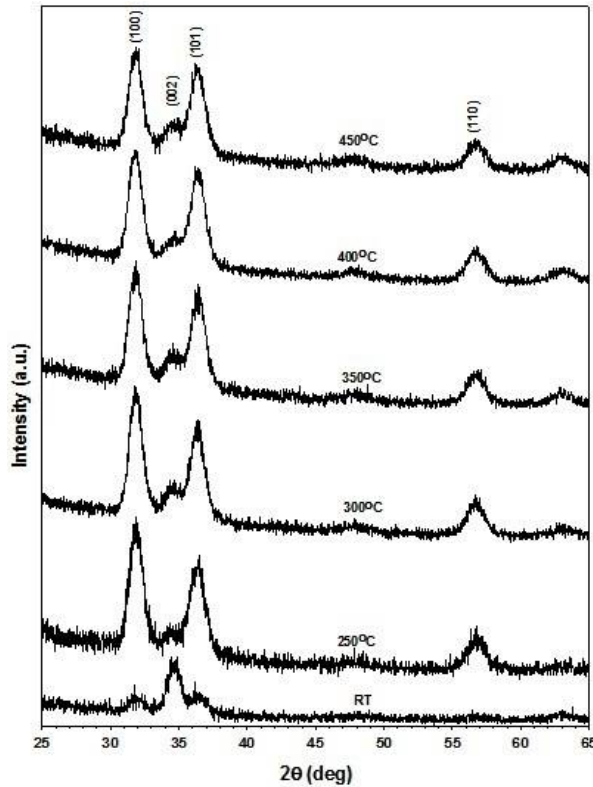
## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม เริ่มต้นด้วยการเคลือบทำความสะอาดกระจกหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไป โดยแช่กระจกในกรดไนตริกความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำยาล้างจาน และเอทานอล ตามลำดับ โดยเช็ดด้วยความถี่เหนือคลื่นวิทยุ อย่างละ 10 นาที แล้วเป่าแห้งด้วยลมแห้ง หลังจากนั้นนำกระจกที่ทำความสะอาดแล้วใส่ในถังสุญญากาศของระบบเคลือบฟิล์มบางระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยมีระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับกระจกสไลด์เท่ากับ 8 เซนติเมตร ปัดด้วยปั๊มโรตารีและปั๊มกระจายไอจนกระทั่งมีความดันฐานประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ จึงใส่แก๊สอาร์กอนเข้าไปในถังสุญญากาศจนกระทั่งมีความดัน  $2.0 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วทำการจุดพลาสมาด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ และทำการเคลือบฟิล์มที่ความดัน  $4.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ เป็นเวลานาน 45 นาที โดยเป้าสารเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเป้าออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองมีค่าแตกต่างกันตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 450 องศาเซลเซียส

หลังจากการเคลือบฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมถูกอบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (D8 diffractometer, Bruker) ปรากฏการณ์ฮอลล์ (HMS-3000, Ecopia) และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสง (UV-3600, Shimadzu) ตามลำดับ

#### 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

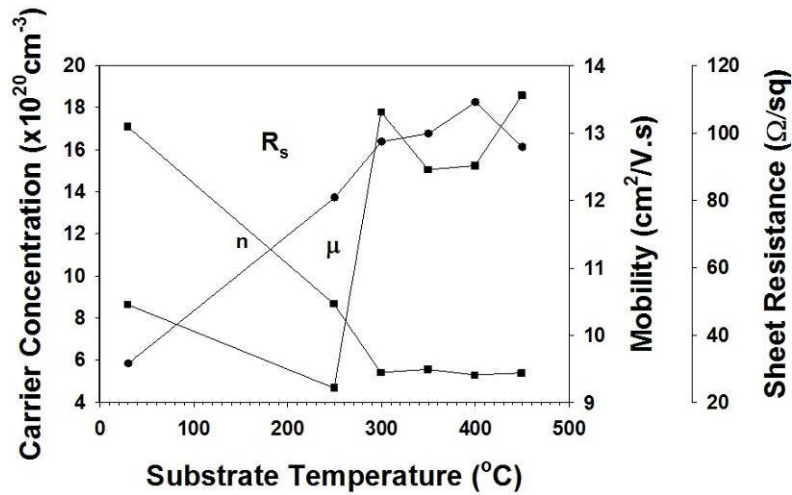
ภาพที่ 1 แสดงถึงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองมีค่าแตกต่างกันตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 450 องศาเซลเซียส และอบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้

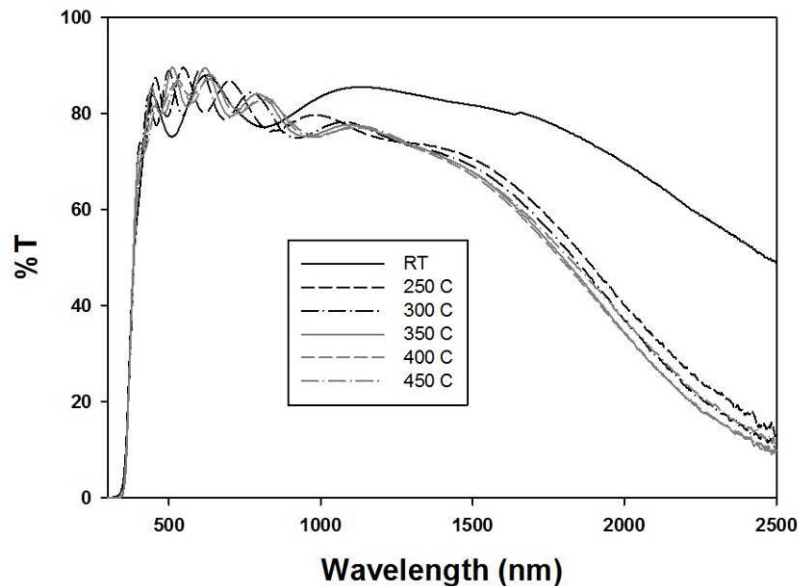
จากภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างผลึกส่วนใหญ่ของฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิห้องอยู่ระนาบ (002) ซึ่งมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นเป็น 250 องศาเซลเซียส ในทางกลับกันโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิ 250 – 450 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยระนาบ (100) และ (101) เป็นส่วนใหญ่ ผลการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ดังกล่าวแสดงโดยนัยถึงการแทนที่อะตอมสังกะสีด้วยอะตอมอลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้น ผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mamat [5] ที่ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของการเจืออลูมิเนียมต่อคุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม

นอกจากนั้นจะเห็นได้จากผลสเปกตรัมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้มีความสอดคล้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มด้วย เนื่องจากเมื่อการแทนที่อะตอมสังกะสีด้วยอะตอมอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณพาหะนำประจุเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้

จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะนำประจุ (n) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึง 300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุฐานรอง ความหนาแน่นของพาหะนำประจุมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย และจะสังเกตได้ว่าสภาพคล่องตัว ( $\mu$ ) ในการเคลื่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของฟิล์มมีความเป็นผลึกที่เพิ่มสูงขึ้น และคงตัวเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองมีค่าเท่ากับ 300 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า การเพิ่มขึ้นของทั้งความหนาแน่นพาหะนำประจุและสภาพคล่องตัวในการเคลื่อนที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึง 300 องศาเซลเซียส และมีค่าค่อนข้างคงตัวเมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองมีค่าสูงขึ้น โดยค่าความต้านทานแผ่นที่ต่ำที่สุดที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 28.2  $\Omega/sq$  สำหรับฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิวัสดุฐานรอง 400 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3 เปอร์เซนต์การส่องผ่านของแสงของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้

เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 2,500 นาโนเมตร ของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้ในภาพที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในช่วงแสงที่ตามมองเห็นมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยจะเห็นว่าอุณหภูมิวัสดุฐานรองมีผลต่อโครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้ โดยอุณหภูมิวัสดุฐานรองที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้โครงสร้างผลึกมีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น และยังกระทบต่อการแทนที่อะตอมสังกะสีด้วยอะตอมอลูมิเนียมในโครงสร้างผลึกของฟิล์มซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิวัสดุฐานรองที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลต่อความหนาแน่นพาหะนำประจุและสภาพคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุในฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงโดยค่าความต้านทานแผ่นที่ต่ำที่สุดที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ  $28.2 \Omega/\text{sq}$  สำหรับฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิวัสดุฐานรอง 400 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในช่วงแสงที่ตามมองเห็นมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

## 6. ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ อาจจะมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การเจือของอลูมิเนียมสำหรับฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองต่าง ๆ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.จกพงษ์ แก้วขาว โปรรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับความเอื้อเฟื้อเพื่อเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสง และขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธนากร ไอสถจันทร์ สำหรับความเอื้อเฟื้อเพื่อเครื่องมือวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฮอลล์

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Chen, W. Guan, Guojia and X.Z. Zhao. Influence of substrate temperature and post-treatment on the properties of ZnO:Al thin films prepared by pulsed laser deposition. **Applied Surface Science** 252 (2005) 1561 – 1567.
- [2] X. Y. Li, H.J. Li, Z.J. Wang, H.Xia, Z. Y. Xiong, J.X. Wang and B.C. Yang. Effect of substrate temperature on the structural and optical properties of ZnO and Al-doped ZnO thin films prepared by dc magnetron sputtering. **Optic Communications** 282 (2009) 247 – 252.
- [3] J.C. Chang, J.W. Guo, T.P. Hsieh, M.R. Yang, D.W. Chiou, H.T. Cheng, C.L. Yeh, C.C. Li and S.Y. Chu. Effects of substrate temperature on the properties of transparent conducting AZO thin films and CIGS solar cells. **Surface & Coatings Technology** 231 (2013) 573 – 577.

- [4] K.H. Patel and S.K. Rawal. Influence of power and temperature on properties of sputtered AZO films. **Thin Solid Film** 620 (2016) 182 – 187.
- [5] M.H. Mamat, M.Z. Sahdan, Z. Khusaimi, A. Zain Ahmed, S. Abdullah and M. Rusop. Influence of doping concentrations on the aluminum doped zinc oxide thin films properties for ultraviolet photoconductive sensor applications. **Optical Materials** 32 (2010) 696 – 699.