

การวัดความหนาของฟิล์มทองคำซึ่งเคลือบบนแผ่นแก้ว ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

นิรันดร์ วิทอนันต์¹ สุรสิงห์ ไชยคุณ²

มหาวิทยาลัยบูรพา แสนสุข เมือง ชลบุรี 20131

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ³ และ วีระพงศ์ จิวประดิษฐ์กุล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ความหนาเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบาง เนื่องจากมีสมบัติของฟิล์มหลายด้านที่สัมพันธ์กับความหนาของฟิล์ม เช่น ความต้านทานไฟฟ้า การสะท้อนแสง และการส่งผ่านแสง เป็นต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ฟิล์มตัวอย่างที่ใช้คือฟิล์มทองคำที่เคลือบบนกระจกด้วยระบบ อันทาลานซ์ แมกนีตรอน สเปคโตรริง หาความหนาด้วยวิธีซึ่งมวลและวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์จากฟิล์มทองคำ โดยพิจารณาความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจากสเปกตรัมของ Au L β ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มที่ได้มีสีทอง ลักษณะผิวเนียนเรียบ มีนวลสะท้อนแสงดี ความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 0.13-5.89 μm โดยความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจาก Au L β กับความหนาฟิล์มที่ศึกษา มีความสัมพันธ์กันแบบเอกซ์โพเนนเชียล ตามสมการการเรืองรังสีเอกซ์ คือ $I_d = I_0 (1 - e^{-\alpha d})$ เมื่อ I_0 เป็นความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจากฟิล์มบางความหนา d และ I_d เป็นความเข้มอิมิตัวของรังสีเอกซ์เรือง ส่วน α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น เมื่อทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นพบว่าความหนาของฟิล์มที่หาโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นี้มีความถูกต้องถึง 95%

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง / การวัดความหนาฟิล์ม / แมกนีตรอน สเปคโตรริง / การเรืองรังสีเอกซ์

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

Thickness Measurement of Gold Film Coating on Glass Substrate by X-Ray Fluorescence Technique

Nirun Witit-anuna¹ Surasing Chaiyakun²

Burapha University, Saensuk, Muang, Chonburi 20131

Pichet Limsuwan³ and Weerapong Chewpraditkul³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

Thickness is considered as one of the important characteristics of thin film. Almost all of film properties are related to film thickness such as electrical resistance, reflectance and transmittance of light. The objective of this research work is to study the thickness measurement of thin film by using X-ray fluorescence technique. Gold film samples have been coated on glass substrates by unbalanced magnetron sputtering system and measured the thickness by mass weighing and then analyzed the X-ray fluorescence intensity of Au L β from films. The results showed that the gold films give very bright color of the gold, smooth surface and highly reflective. The thickness of films in this study are 0.13–5.89 μm . The intensity of fluorescent X-ray of Au L β from films are related to film thickness in exponential function and obeyed the fluorescent equation $I_d = I_s (1 - e^{-\alpha d})$ where I_d is the intensity of fluorescent X-rays from film thickness d , I_s is the saturated intensity of fluorescent X-rays and α is linear attenuation coefficient. The thickness of films from mathematical models is 95% in agreement with the experimental value.

Keywords : Thin Film / Film Thickness Measurement / Magnetron Sputtering / X-ray Fluorescence

¹ Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science.

² Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science.

³ Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science.

1. บทนำ

ฟิล์มบาง (thin film) หมายถึง “ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ” การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” อาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” ทั้งนี้จากความหมาย จะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันอาจเป็น “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เคลือบให้ดีขึ้น เช่น ให้มีความคงทน ทนทาน หรือสวยงามมากขึ้นรวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในงานอื่นๆ โดยการเคลือบฟิล์มบางจะเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ โดยเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ เมื่อสารเคลือบตกกระทบบนผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด [1]

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์ม คือ ความหนาฟิล์ม เนื่องจากสมบัติของฟิล์มหลายด้านจะเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของฟิล์ม เช่น สมบัติทางแสง หรือ สมบัติทางไฟฟ้า ฯลฯ ดังนั้นความหนาของฟิล์มจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องควบคุมระหว่างการผลิตอย่างใกล้ชิด ทั้งนี้ ความหนาฟิล์ม หมายถึง “ระยะตั้งฉากจากจุดใดๆ บนผิวหน้าของฟิล์มทะลุผ่านเนื้อฟิล์มไปยังอีกขอบหนึ่งของผิวหน้าฟิล์ม” ดังนั้นถ้าขอบผิวหน้าฟิล์มที่วัดไม่ขนานหรือไม่เรียบ ความหนาฟิล์มที่ได้จะไม่ถูกต้องหรือมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่อย่างไรก็ดีฟิล์มที่ได้จากการเคลือบในสุญญากาศส่วนใหญ่จะมีผิวหน้าที่ขนานและราบเรียบทำให้ไม่ค่อยมีปัญหาในประเด็นนี้มากนัก [2]

การวัดความหนาฟิล์มสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดด้วยเทคนิคทางแสง เทคนิคทางกล และเทคนิคทางรังสี ซึ่งอาจทำได้ทั้งระหว่างทำการเคลือบหรือภายหลังการเคลือบ ทั้งนี้ ASTM ได้แบ่งการวัดความหนาฟิล์มใน ASTM B659-90. Standard Guide for Measuring Thickness of Metallic and Inorganic Coatings ออกเป็น 4 กลุ่มคือ การวัดแบบไม่ทำลายชิ้นงาน (nondestructive methods) การวัดแบบกึ่งทำลายชิ้นงาน (semidestructive methods) การวัดแบบทำลายชิ้นงาน (destructive methods) และวิธีอื่น (other methods) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดี-ข้อเสียต่างกันไป โดยปัจจัยในการเลือกใช้เทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น ชนิดของฟิล์ม ระดับความหนาของฟิล์ม ลักษณะการใช้งาน และความละเอียดที่ต้องการ ซึ่งปกติแล้วไม่มีเทคนิคใดที่ดีที่สุด จะขึ้นกับการตัดสินใจของผู้ศึกษา [3][4]

การวัดความหนาด้วยเทคนิคทางรังสีเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันเป็นที่การยอมรับและนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในห้องปฏิบัติการวิจัยและในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากเทคนิคนี้ให้ความถูกต้องสูงและรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดความหนาโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence technique) อาศัยหลักการว่าถ้ารังสีเอกซ์ที่ใช้มีพลังงานมากพอ ก็จะไปกระตุ้นธาตุที่อยู่ในฟิล์มและวัสดุรองรับทำให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ออกมา ถ้าการเรืองรังสี

เอกซ์นี้เกิดจากวัสดุรองรับความเข้มรังสีที่วัดได้จะลดลงตามความหนาของฟิล์ม ในทางกลับกัน ถ้าการเรืองรังสีเอกซ์เกิดจากฟิล์มความเข้มรังสีที่วัดได้ก็จะเพิ่มตามความหนาของฟิล์ม [4][5]

ปกติตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นั้นสามารถเตรียมได้โดยการนำสารตัวอย่างที่เป็นผงมาเกลี่ยให้ติดเป็นชั้นบางๆ บนแผ่นสก็อตช์เทป (Scotch tape) หรือวางระหว่างแผ่นไมลาร์ (mylar) หรือถ้าตัวอย่างเป็นสารที่ละลายได้จะนำมาละลายและหยดลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติกชนิดพิเศษหรือแผ่นไมลาร์ที่ดัดแปลงแล้ว ซึ่งเมื่อตัวทำละลายระเหยไปแล้วก็จะได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นชั้นบางๆ โดยความหนาของตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับงานด้านรังสีเอกซ์จะมีค่าประมาณ 10-200 μm แต่งานวิจัยนี้ซึ่งงานหรือตัวอย่างที่นำมาศึกษาคือฟิล์มบางทองคำ ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศด้วยระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ซึ่งมีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 5 μm จึงเป็นที่น่าสนใจว่าชั้นงานหรือตัวอย่างที่เตรียมจากการเคลือบในสุญญากาศด้วยเทคนิคสปีดเตอริง ซึ่งบางมากนั้นจะสามารถใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นี้ในการวัดความหนาได้หรือไม่ ซึ่งการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการวัดความหนาด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ของฟิล์มทองคำที่เคลือบด้วยระบบอันทาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง บนแผ่นแก้ว เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของการวัดความหนาฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งจะเป็นการสนับสนุนหลักการทางทฤษฎี ตลอดจนเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมต่อไป

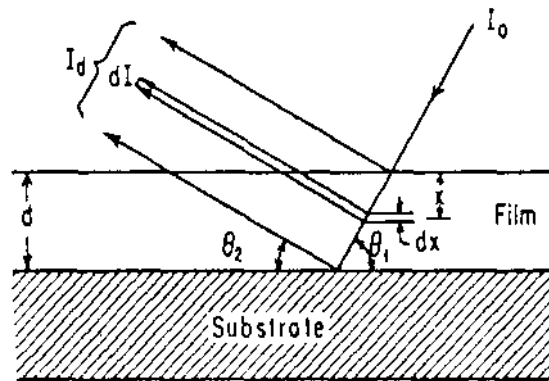
การวัดความหนาฟิล์มด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ [2][5]

การวัดความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นี้เป็นการวัดความหนาฟิล์มทางอ้อม ซึ่งต่างไปจากการใช้เครื่องมือชนิดอื่นกล่าวคือ ความเข้มรังสีเอกซ์เรืองที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์ม อาจทำได้โดยการวัดความเข้มรังสีเอกซ์เรืองที่แผ่จากวัสดุรองรับซึ่งความเข้มที่วัดได้จะลดลงตามความหนาของฟิล์ม และการวัดความเข้มรังสีเอกซ์เรืองที่แผ่จากฟิล์มซึ่งความเข้มที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์ม การวิจัยนี้เป็นการวัดความหนาฟิล์มโดยพิจารณาการเรืองรังสีเอกซ์จากฟิล์ม ซึ่งมีแนวคิดดังนี้คือถ้ารังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ใช้มีพลังงานมากพอก็จะกระตุ้นให้ธาตุที่อยู่ในฟิล์มเกิดการแผ่รังสีทุติยภูมิ (การเรืองรังสีเอกซ์) ออกมา โดยความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจากฟิล์มนี้จะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์ม

จากรูปที่ 3 ถ้าให้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิความเข้ม 10 ตกกระทบฟิล์มบางซึ่งมีความหนา d รังสีนั้นจะกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เรืองเฉพาะธาตุความเข้ม I_d โดยค่า I_d นี้อาจพิจารณาได้จากส่วนเล็กๆ ของฟิล์มที่มีธาตุปริมาตรคงที่เล็กๆ ของความหนา dx ที่ความลึกจากผิวของฟิล์ม x ดังนี้

$$dI = kI_0 e^{[-(\mu_1 \csc\theta_1 + \mu_2 \csc\theta_2) \rho x]} dx \quad (1)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนและการเรืองรังสีเอกซ์



รูปที่ 3 การวัดความหนาโดยหลักการเรื่องรังสีเอกซ์จากฟิล์ม [5]

ถ้าให้ $\alpha = (\mu_1 \csc \theta_1 + \mu_2 \csc \theta_2) \rho$ และอินทิเกรตสมการ (1) ในช่วง 0 ถึง d จะได้

$$I_d = kI_0 \int_0^d e^{-\alpha x} dx \quad (2)$$

$$= kI_0 \frac{(1 - e^{-\alpha d})}{\alpha} \quad (3)$$

สำหรับกรณีฟิล์มมีความหนามาก (infinite thickness) สมการ (3) จะเขียนได้เป็น

$$I_s = \frac{kI_0}{\alpha} \quad (4)$$

จากสมการ (3) และ (4) จะได้ว่า

$$I_d = I_s (1 - e^{-\alpha d}) \quad (5)$$

ในทางปฏิบัติการวัดความหนาฟิล์มบางด้วยเทคนิคนี้จะต้องสร้างกราฟเปรียบเทียบ (calibration curve) ก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยนำฟิล์มที่ทราบความหนา (หรือฟิล์มมาตรฐาน) มาวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ก่อน แล้วจึงนำความหนาฟิล์มที่ทราบค่ากับความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบ ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (5) โดยมี I_s และ α เป็นพารามิเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง และเมื่อจะใช้เทคนิคนี้ในการวัดความหนาฟิล์มก็เพียงแต่นำฟิล์มที่ต้องการวัดความหนาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขที่กำหนด จากนั้นจึงนำค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่วัดได้มาแทนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามสมการที่ (5) ก็จะทราบความหนาฟิล์มที่ต้องการ

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุอุปกรณ์

1. **เป้าสารเคลือบ** เป็นทองคำ (99.99%) เป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm หนา 3.0 mm ติดตั้งในตำแหน่งคาโทดของระบบเคลือบ

2. **วัสดุรองรับ** สำหรับเคลือบฟิล์มบางในการศึกษาใช้กระจกปิดสไลด์ ขนาด 2.2x2.2 cm² มีลักษณะเป็นแผ่นสีเหลี่ยมจัตุรัส สี มีผิวเรียบมัน

3. **เครื่องเคลือบฟิล์มบาง** เป็นเครื่องเคลือบ ระบบอับบาลานซ์ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ออกแบบและสร้างขึ้นโดย ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

4. **เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer** สำหรับวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์จากตัวอย่าง (วัสดุรองรับและฟิล์มทองคำ) เป็นของ Kevex รุ่น EDX-771 Superdry ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. **เครื่องชั่ง** สำหรับชั่งมวลของชิ้นงาน เพื่อหาความหนาของฟิล์ม เป็นของ Sartorius AG GOTTINGEN รุ่น AC 211S-00MS เป็นเครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในหน่วยกรัม

วิธีการศึกษา

1. การเคลือบฟิล์มบาง การศึกษานี้ได้เคลือบฟิล์มทองคำลงบนกระจกปิดสไลด์ ขนาด 2.2x2.2 cm² ด้วยเครื่องเคลือบระบบ อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง โดยฟิล์มทองคำที่ใช้ศึกษามี 2 ชุด (ชุดละ 12 ชิ้น) ฟิล์มทั้ง 2 ชุดนี้จะถูกเคลือบในเงื่อนไขและสภาวะเดียวกัน และนำไปหาความหนาด้วยวิธีชั่งมวล โดยฟิล์มชุดที่ 1 สำหรับใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนฟิล์มชุดที่ 2 สำหรับใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้จากฟิล์มชุดที่ 1

2. การวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ วิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ของฟิล์มทองคำทั้ง 2 ชุด ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ของ Kevex รุ่น EDX-771 Superdry ใช้เงื่อนไขดังนี้คือ ใช้ Zr เป็นเป้าทุติยภูมิ ความต่างศักย์เท่ากับ 35.0 kV กระแสเท่ากับ 0.28 mA ใช้เวลาวิเคราะห์ 200 s โดยพิจารณาความเข้มของ Au L β ที่ได้จากฟิล์มทองคำ

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกราฟเปรียบเทียบ นำความหนาฟิล์มจากวิธีชั่งมวล และความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของ Au L β จากฟิล์มชุดที่ 1 มาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (5) โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

3.1 การวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) โดยค่า I_s ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ หาได้จากการทดลองวัดความเข้มรังสีเอกซ์เรืองจากแผ่นทองคำ (99.99%)

เรียบชนิดเดียวกับที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบ หน้า 1 mm มีขนาด $2.2 \times 2.2 \text{ cm}^2$ (เท่ากระจกปิดสไลด์) โดยค่า I_s ที่ได้มีค่าเท่ากับ 342,704 cts/200 s ผลการวิเคราะห์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น (α)

3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EZ-Plot ผลการวิเคราะห์จะได้ค่า I_s และค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น (α) สำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

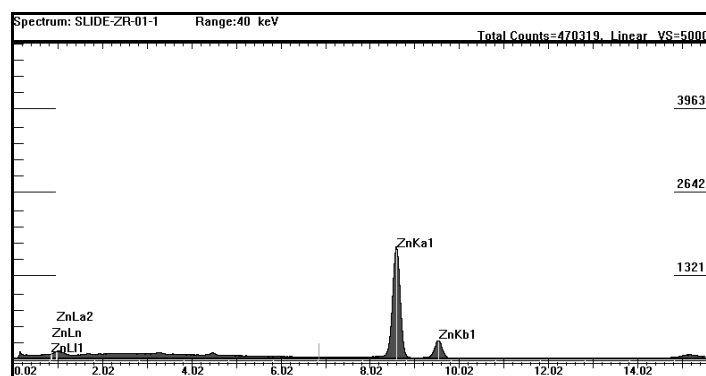
4. การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นำฟิล์มทองคำชุดที่ 2 มาวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ แล้วนำค่าความเข้มรังสีเอกซ์เรื่องที่ได้มาแทนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากตอนที่ 3 จากนั้นจึงเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มชุดที่ 2 นี้ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับความหนาที่ได้จากวิธีชั่งมวล

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

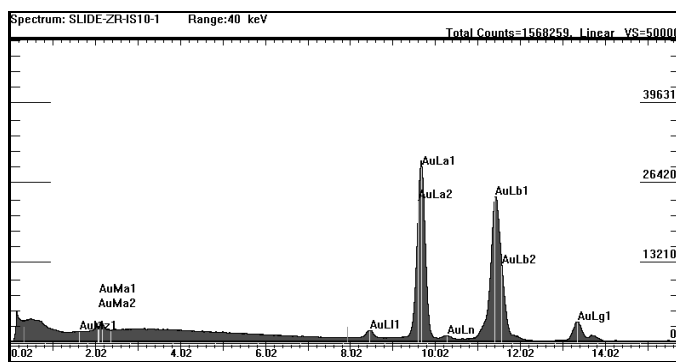
ฟิล์มบางและผลการวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์

ฟิล์มบางที่ใช้ศึกษาทั้ง 2 ชุด เคลือบด้วยเงื่อนไขเดียวกันโดยระบบสปัตเตอร์ริง ซึ่งฟิล์มที่ได้มีสีเหลืองทอง ผิวเนียนเรียบ ทึบแสง มันวาว และมีการสะท้อนแสงดี โดยความหนาของฟิล์มชุดที่ 1 ซึ่งนำมาใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในช่วง $0.13\text{-}3.46 \mu\text{m}$ ส่วนฟิล์มชุดที่ 2 ซึ่งนำมาใช้สำหรับทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้อยู่ในช่วง $0.13\text{-}5.89 \mu\text{m}$

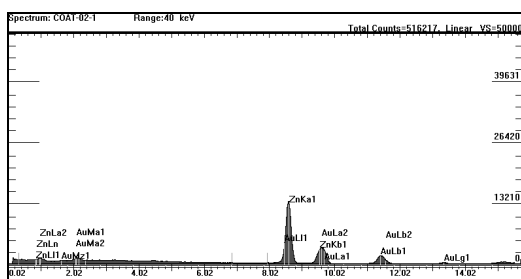
ในส่วนของการวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ทั้งจากวัสดุรองรับ แผ่นทองคำ และฟิล์มทองคำ แสดงได้ดังรูปที่ 4 - รูปที่ 6 ทั้งนี้หากพิจารณาในรูปที่ 4 จะพบว่าวัสดุรองรับ (กระจกปิดสไลด์) ที่ใช้ในการศึกษานี้ มี Zn เป็นส่วนประกอบ ซึ่งพีค (Peak) ของ Zn $K\beta$ จากวัสดุรองรับนั้น จะซ้อนทับกับพีคของ Au $L\alpha$ จากฟิล์มทองคำ ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผิดพลาดได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้พีคของ Au $L\beta$ จากฟิล์มทองคำในการวิเคราะห์ข้อมูลแทนการใช้พีคของ Au $L\alpha$



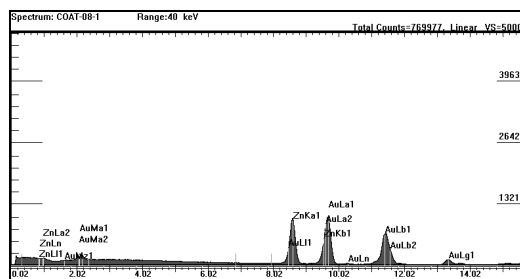
รูปที่ 4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของกระจกปิดสไลด์เปล่า (วัสดุรองรับ)



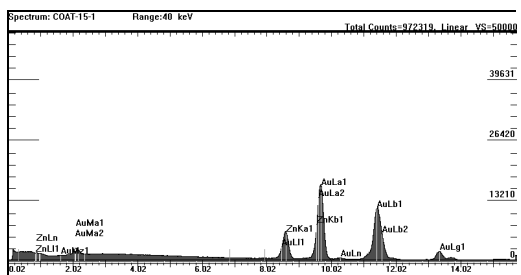
รูปที่ 5 สเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของแผ่นทองคำหนา 1 μm (เป้าสารเคลื่อน)



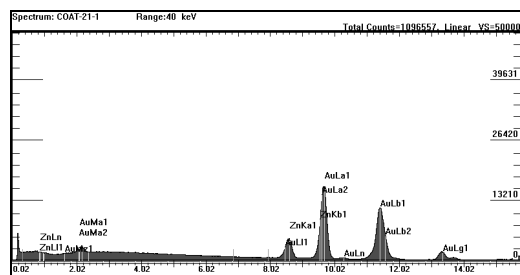
(a) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 1 หนา 0.13 μm



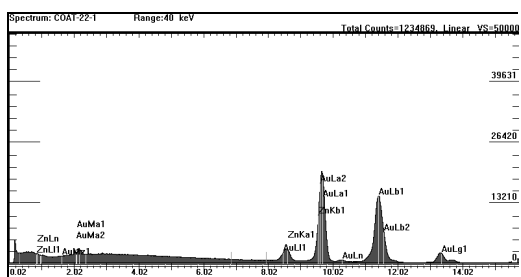
(b) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 2 หนา 0.57 μm



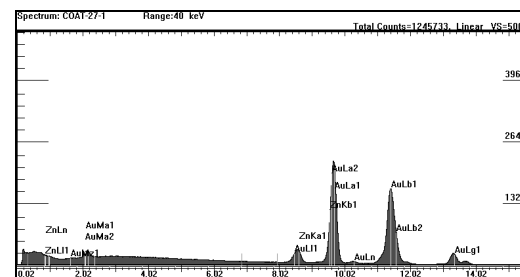
(c) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 1 หนา 1.28 μm



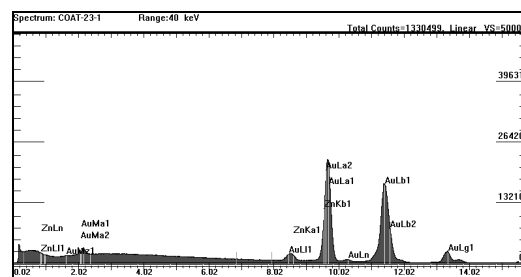
(d) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 2 หนา 1.54 μm



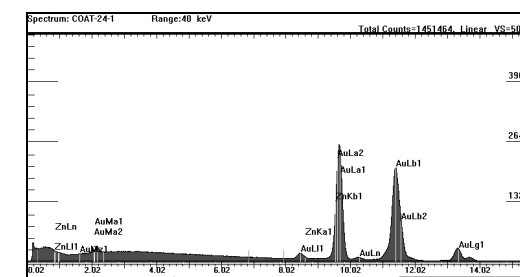
(e) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 1 หนา 2.30 μm



(f) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 2 หนา 2.22 μm



(g) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 1 หนา 3.46 μm



(h) สเปกตรัมของฟิล์มทองคำชุดที่ 2 หนา 5.89 μm

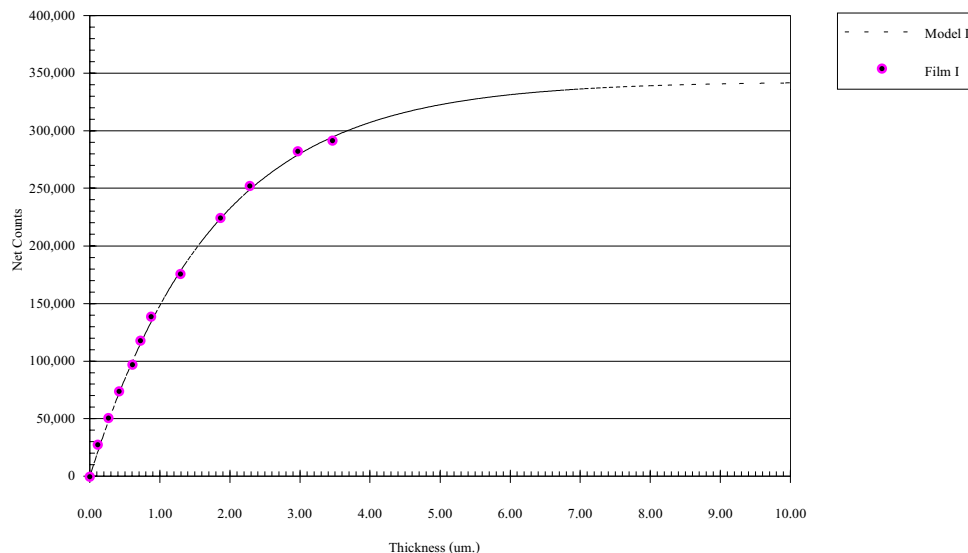
รูปที่ 6 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของฟิล์มทองคำทั้งสองชุดที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกราฟเปรียบเทียบ

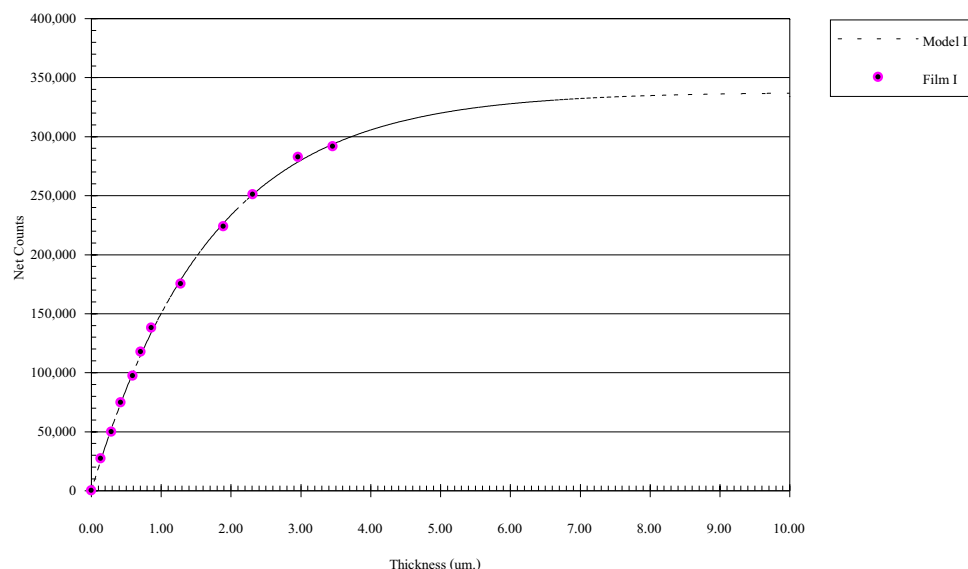
เมื่อนำค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เรือง (Au L β) และความหนาของฟิล์มที่ได้จากวิธีชั่งมวลของฟิล์มชุดที่ 1 มาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกราฟเปรียบเทียบ จากวิธีที่ใช้ทั้งสองวิธีพบว่ามีการเปรียบเทียบที่ได้จากทั้งสองวิธีจะมีลักษณะเหมือนกัน (รูปที่ 7-รูปที่ 10) คือความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์ม ในช่วงแรกความเข้มรังสีเอกซ์เรืองที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความหนา (ในช่วง 0.00-2.00 μm) จากนั้นจะเพิ่มขึ้นช้าๆ (ในช่วง 2.00-4.00 μm) และเพิ่มเข้าสู่ค่าความเข้มอิ่มตัว (I_∞) อย่างช้าๆ ในที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกราฟเปรียบเทียบที่ได้ทั้ง 2 แบบ คือ

แบบจำลองที่ 1 : $I_{d1} = 342,704 (1 - e^{-0.567d})$ (6)

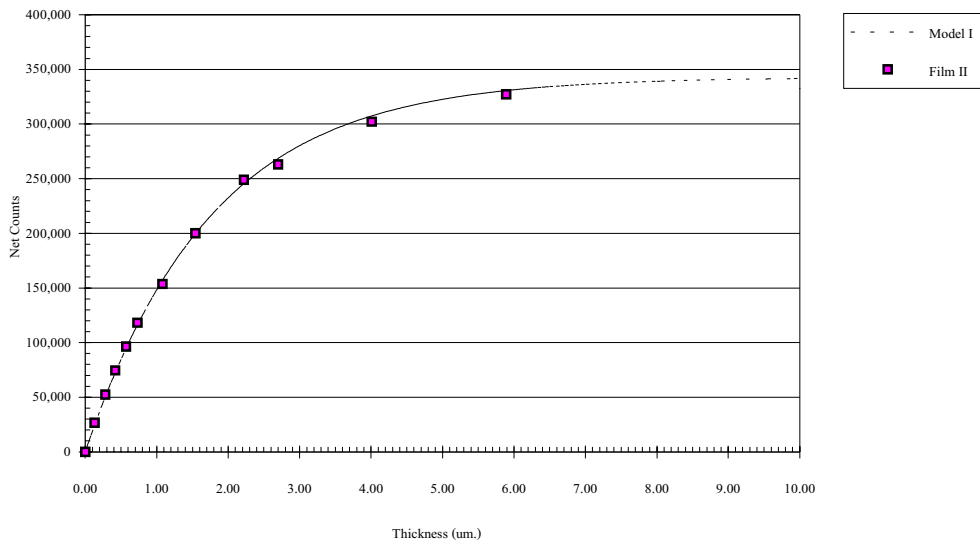
แบบจำลองที่ 2 : $I_{d2} = 337,821 (1 - e^{-0.588d})$ (7)



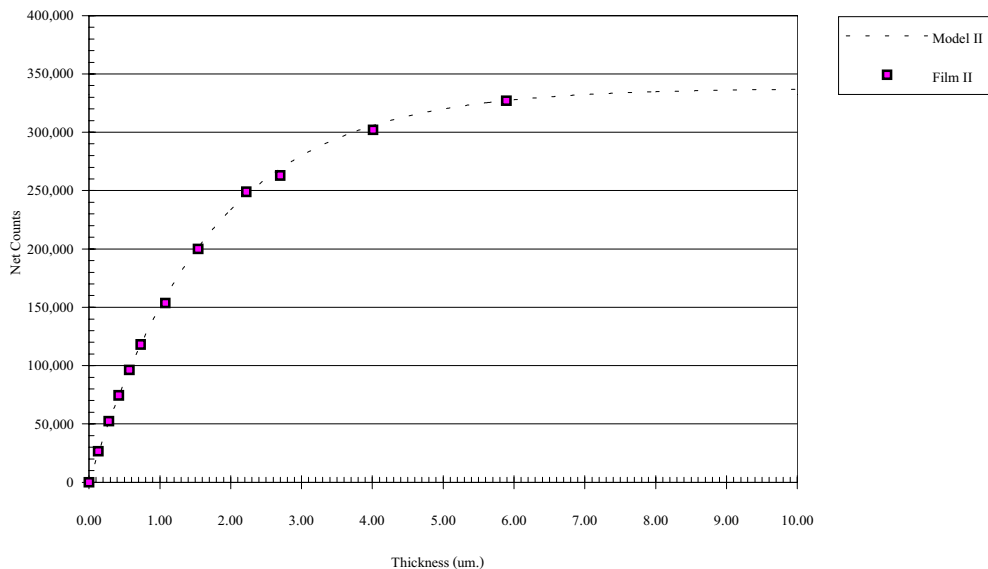
รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ 1 และฟิล์มชุดที่ 1



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ 2 และฟิล์มชุดที่ 1



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ 1 และฟิล์มชุดที่ 2



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ 2 และฟิล์มชุดที่ 2

ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทั้ง 2 แบบ (โดยการเปรียบเทียบค่าความหนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าความหนาจากวิธีชั่งมวล) พบว่าความหนาของฟิล์มที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบกับค่าความหนาจากวิธีชั่งมวลของฟิล์มชุดที่ 2 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองที่ 2 จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีชั่งมวลมากกว่าแบบจำลองที่ 1 (ตารางที่ 1)

หากพิจารณาแบบจำลองที่ 1 พบว่าเมื่อฟิล์มบางหรือหนามาก ค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 นี้จะแตกต่างกับค่าที่ได้จากวิธีชั่งมวลมาก (มากกว่า 5%) แต่ในช่วง 0.28-2.70 μm ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะไม่ต่างมากนัก (ไม่เกิน 5%) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อฟิล์มบางมากการกระจายตัวของฟิล์มยังไม่สม่ำเสมอ ส่วนความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นในช่วง 2.70 μm ขึ้นไปนั้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

ค่าความหนาของฟิล์มที่นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าเพียง 3.46 μm เท่านั้น ทำให้เมื่อนำความหนาฟิล์มที่มากกว่าค่าที่ใช้สร้างแบบจำลองมาทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนได้นอกจากนี้ค่า I_s ในแบบจำลองที่ 1 นั้นได้จากการวิเคราะห์การเรืองรังสีจากทองคำแผ่น (หนา 1 mm) ที่เป็นวัตถุก้อน (bulk) ซึ่งอาจมีสมบัติต่างจากทองคำที่อยู่ในลักษณะของฟิล์มบาง จึงอาจสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 ยังคงถูกต้องสำหรับค่าความหนาที่อยู่ในช่วง 0.28-2.70 μm เท่านั้น

สำหรับแบบจำลองที่ 2 พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีชั่งมวลตลอดช่วงที่ทดสอบ (ยกเว้นที่ความหนา 0.13 μm ซึ่งอาจมีสาเหตุเหมือนในแบบจำลองที่ 1) และถึงแม้ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ยังไม่แตกต่างจากวิธีชั่งมวลมากนัก (ไม่เกิน 5%) ซึ่งต่างจากในกรณีของแบบจำลองที่ 1 ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุจากค่า I_s ในแบบจำลองที่ 2 เป็นการประมาณค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของฟิล์มทองคำจากการทดลองทั้งหมดของโปรแกรม EZ Plot จึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับค่า I_s ที่มาจากวัตถุคนละแบบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบ ด้วยฟิล์มทองคำชุดที่ 2

	ความหนาของฟิล์มทองคำชุดที่ 2 (μm)			เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	
	วิธีชั่งมวล	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
1	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
2	0.13	0.14	0.14	7.7	7.7
3	0.28	0.29	0.29	3.6	3.6
4	0.42	0.43	0.42	2.4	0.0
5	0.57	0.58	0.57	1.8	0.0
6	0.72	0.75	0.73	4.2	1.4
7	1.08	1.05	1.03	2.8	4.6
8	1.54	1.55	1.53	0.6	0.6
9	2.22	2.29	2.27	3.2	2.3
10	2.70	2.57	2.56	4.8	5.2
11	4.01	3.77	3.83	6.0	4.5
12	5.89	5.45	5.87	7.5	0.3

4. สรุป

การวัดความหนาฟิล์มบางด้วยเทคนิคนี้เป็นการวัดความหนาภายหลังการเคลือบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน เป็นการวัดทางอ้อมโดยวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจากฟิล์มบางซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มที่วัด ในทางปฏิบัติการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคนี้จะต้องสร้างกราฟเปรียบเทียบก่อนทำได้โดยใช้ฟิล์มมาตรฐานหรือฟิล์มที่ทราบค่าความหนา มาวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ แล้วจึงนำความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองและความหนาที่ทราบค่า มาสร้างกราฟเปรียบเทียบ ซึ่งจากขั้นตอนนี้อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้หากความหนาของฟิล์มที่ใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบมีค่าไม่ถูกต้อง

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้คือ ฟิล์มทองคำที่ได้มีลักษณะผิวเนียนเรียบ มีนวลและสะท้อนแสงดี ความหนาฟิล์มชุดที่ 1 อยู่ในช่วง 0.13-3.46 μm ฟิล์มชุดที่ 2 อยู่ในช่วง 0.13-5.89 μm (โดยวิธีชั่งมวล) และเมื่อพิจารณาความเข้มรังสีเอกซ์เรื่อง Au L β จากฟิล์มทองคำพบว่ามีความเพิ่มขึ้นตามความหนาฟิล์มที่ใช้ในการศึกษา โดยในช่วงแรกความเข้มที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความหนา (0.00-2.00 μm) จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ (2.00-4.00 μm) ซึ่งสุดท้ายจะค่อยๆ เพิ่มเข้าสู่ค่าความเข้มอิ่มตัว โดยความเข้มรังสีเอกซ์เรื่องจากฟิล์มและความหนาฟิล์มจะมีความสัมพันธ์กันแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามสมการการเรืองรังสีเอกซ์ คือ $I_d = I_s (1 - e^{-\alpha d})$ เมื่อ I_d เป็นความเข้มรังสีเอกซ์เรื่องจากฟิล์มบางความหนา d และ I_s เป็นความเข้มอิ่มตัวของรังสีเอกซ์เรื่อง ส่วน α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น ซึ่งในการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น 2 สมการ คือ $I_{d1} = 342,704 (1 - e^{-0.567d})$ และ $I_{d2} = 337,821 (1 - e^{-0.588d})$ เมื่อทดสอบแบบจำลองที่ได้กับฟิล์มชุดที่ 2 ซึ่งทราบความหนา (จากวิธีชั่งมวล) พบว่าแบบจำลองทั้งสองมีความถูกต้องถึง 95%

เอกสารอ้างอิง

1. Bunshah, R.F., 1994, *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*, 2nd ed., New Jersey, Noyes Publications, 861 p.
2. Berry, R.W., Hall, P.M., and Harris, M.T., 1968, *Thin Film Technology*, New Jersey, D.Van Nostrand, pp. 164-187.
3. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM B659-90 : Standard Guide for Measuring Thickness of Metallic and Inorganic Coatings," *1997 Annual Books of ASTM Standard*, Vol. 02.05, Philadelphia, ASTM, pp. 385-387.
4. Pliskin, W.A. and Zanin, S. J., 1970, "Film Thickness and Composition," *Handbook of Thin Film Technology*, Edited by Maissel, L.I. and Glang, R., New York, McGraw-Hill, pp. (11-1)-(11-54).
5. Johns, W.D., 1967, "Measurement of Film Thickness," *Handbook of X-Rays*, Edited by Emmett F. Kaelble, New York, McGraw-Hill, pp. (44-1)-(44-12).