

การหาความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลวในเล่มบรรจุแบบ
ไม่ทำลายด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์

**DETERMINATION OF PURITY AND THICKNESS OF GOLD LEAVES IN
BOOKLET USING NONDESTRUCTIVE X-RAY TRANSMISSION TECHNIQUE**

ศิริลักษณ์ สารตรา¹, สมบูรณ์ รัชมี² และ จเด็จ เย็นใจ²

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Siriluck Sarttra¹ Somboon Rassame² and Chadet Yenchai²

¹Graduate Student, Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University 254 Phyathai Road Patumwan Bangkok Thailand, 10330

²Lecturer, Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
254 Phyathai Road Patumwan Bangkok Thailand, 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการหาความเข้มข้นของทองคำในแผ่นทองคำเปลว เพื่อหาความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลวแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์ โดยใช้รังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV จากตะกั่วส่งผ่านเล่มบรรจุทองคำเปลว จากนั้นนำความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ทะลุผ่านมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงานและ 10.5 และ 12.6 keV เพื่อวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวจากกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของทองคำ และได้ทำการคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวโดยใช้ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากขั้นตอนแรก ได้ทำการวัดตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวในเล่มบรรจุจำนวน 2 ชุด พบว่าผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวมีค่าเท่ากับ 79% และ 88% โดยมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองเท่ากับ 2.3% และ 1.4% ตามลำดับ และผลคำนวณหาความหนามีค่าเท่ากับ 0.105 และ 0.133 μm โดยมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง 0.11% และ 0.08% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การเรืองรังสีเอกซ์, ทองคำเปลว

ABSTRACT

A method to determine the concentration of gold in gold leaves using the nondestructive x-ray transmission technique has been developed in this study. The secondary x-rays of 10.5 and 12.6 keV from lead were transmitted to gold leaves in booklets. The intensities of transmission x-rays used to calculate the ratio of gold leaves absorption coefficient at 10.5 and 12.6 keV. The purity of gold leaves can be analyzed from a calibration curve between the ratio of gold leaves absorption coefficient and the concentration of gold leaves. The thicknesses of gold leaves were afterward calculated by using the analysis of the gold leaves purity. The purity measurements of 2 samples of gold leaves were 79% and 88% with the standard deviations of 2.3% and 1.4% respectively. Besides, the thickness measurements of the 2 samples were 0.105 and 0.133 μm with the standard deviations of 0.11% and 0.08% respectively.

KEYWORDS: x-ray fluorescence (XRF), Gold leaves

1. บทนำ

การใช้งานแผ่นทองคำเปลวในงานวิจิตรศิลป์ของประเทศไทยมีหลักฐานปรากฏตั้งแต่สมัยสุโขทัยเรื่อยมาโดยถูกใช้ในงานระดับสูงและงานด้านพระพุทธรศาสนา ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากแผ่นทองคำเปลวหลากหลายขึ้นทั้งในด้านโบราณคดีและด้านอุปโภคบริโภค ทางด้านโบราณคดีได้นำแผ่นทองคำเปลวมาใช้ในการประดับตกแต่งและซ่อมแซมชิ้นงานโบราณวัตถุ โดยใช้เคลือบพื้นผิวชิ้นงานเพื่อปกปิดบริเวณที่เกิดการสึกกร่อน เนื่องจากทองคำเปลวจะไม่ทำปฏิกิริยาออกไซด์กับอากาศ จึงไม่เกิดสนิมในบริเวณที่ติดแผ่นทองคำเปลวลงไป ในขณะที่โลหะอื่น ๆ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกไซด์กับอากาศได้ง่าย ในด้านอุปโภคบริโภคมีการผสมแผ่นทองคำเปลวลงไปในการผลิตภัณฑเสริมความงามต่างๆ และใช้ประดับหรือเป็นส่วนประกอบในอาหารเพื่อเพิ่มมูลค่า

ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของทองคำแท่งที่ใช้ผลิต โดยมาตรฐานความบริสุทธิ์ของทองคำในประเทศไทยอยู่ที่ 96.5% (หรือ 23.16K) นั่นคือในทองคำ 100 ส่วนจะประกอบด้วยทองคำ 96.5 ส่วน และอีก 3.5 ส่วนเป็นโลหะที่เจือปนเพื่อเพิ่มความแข็ง โดยทั่วไปจะเจือปนด้วยเงิน เมื่อรีดทองคำแท่งจนบางประมาณ 4-5 ไมครอนแล้วจะนำไปวางบนกระดาษแก้วและหุ้มด้วยหนังวัวจากนั้นทุบให้บางด้วยค้อนทองเหลืองทองคำเปลวที่ผลิตจากทองคำแท่งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะสามารถทุบจนมีความบางน้อยมาก ๆ ได้ ในขณะที่แผ่นทองคำเปลวที่ผลิตจากทองคำแท่งที่มีความบริสุทธิ์ต่ำจะมีความหนามากกว่า

ในปัจจุบันทองคำเปลวที่มีจำหน่ายในท้องตลาดบางส่วนไม่ได้ผลิตจากทองคำบริสุทธิ์ ทำให้การใช้งานทองคำเปลวในด้านต่าง ๆ ไม่ได้ประสิทธิภาพเต็มที่อีกทั้งอาจก่อให้เกิดผลเสียได้อีกด้วย งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาการตรวจสอบคุณภาพของแผ่นทองคำเปลวโดยไม่ทำลายด้วยเทคนิคการกระตุ้นและส่งผ่านรังสีเอกซ์ขึ้นเพื่อเพิ่มความสะดวก เพราะเทคนิคนี้ไม่ต้องสัมผัสตรวจแผ่นทองคำเปลว สามารถตรวจสอบแผ่นทองคำเปลวได้ในปริมาณมาก แผ่นทองคำเปลวที่ผ่านการตรวจสอบแล้วไม่ได้ถูกทำลายจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 ศึกษาค่า Absorption edge ของทองคำเพื่อเลือกใช้พลังงานของรังสีเอกซ์ส่งผ่าน [1, 2]

การกระตุ้นให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์นั้น จำเป็นต้องกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมและเกิดการแทนที่หรือเปลี่ยนระดับวงโคจรของอิเล็กตรอนขึ้น พลังงานที่ใช้เพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมได้นั้นจำเป็นต้องมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน โดยพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมได้ เรียกว่า Absorption edge เนื่องจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอมมีหลายระดับวงโคจร เช่น วงโคจร K, L และ M เป็นต้น โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแต่ละวงโคจรจะมีพลังงานแตกต่างกันและเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ใกล้นิวเคลียส ทำให้ต้องใช้พลังงานแตกต่างกันเพื่อให้อิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรหลุดจากอะตอม ส่งผลให้ธาตุแต่ละชนิดมีค่า Absorption edge หลายค่า โดยค่า Absorption edge (L edges) ของทองคำอยู่ในช่วง 11-14 keV จากตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานรังสีเอกซ์ทุติยภูมิจากธาตุต่าง ๆ ที่มีพลังงานใกล้เคียงกับค่า Absorption edge ของทองคำ พบว่าตะกั่วเป็นโลหะที่เหมาะสมและสะดวกในการเลือกใช้เป็นรังสีเอกซ์ทุติยภูมิในงานวิจัยนี้

เนื่องจากค่าความเข้มของสเปกตรัมของทองคำจะแปรผันตรงตามปริมาณความเข้มข้นของทองคำที่ผสมในทองคำเปลวหรือความบริสุทธิ์ ขณะเดียวกันทองคำเปลวที่มีความบริสุทธิ์ต่ำแต่มีหลายแผ่นก็ให้ค่าความเข้มของสเปกตรัมของทองคำสูงเช่นกัน จึงไม่สามารถนำค่าความเข้มสเปกตรัมของทองคำมาคำนวณหาความบริสุทธิ์ของทองคำได้โดยตรง จึงใช้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิไปกระตุ้นรังสีเอกซ์ทุติยภูมิให้ปลดปล่อยรังสีเอกซ์พลังงานจำนวนหนึ่งออกมา และส่งผ่านเข้าไปในแผ่นทองคำเปลว ซึ่งพลังงานบางส่วนจะถูกดูดกลืน กระเจิง หรือส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวไป ทำให้ความเข้มของสเปกตรัมของพลังงานรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่วัดได้มีค่าลดลง โดยค่าความเข้มที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลว เมื่อพิจารณาค่า Absorption edge (L edges) ของทองคำ จึงเลือกใช้ตะกั่วเป็นต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ

ตารางที่ 1 พลังงานรังสีเอกซ์ทุติยภูมิจากธาตุต่าง ๆ [3]

Elements	Secondary x-ray energy (keV)
Se	11.2 ($K\alpha$)
Br	11.9 ($K\alpha$)
Kr	12.6 ($K\alpha$)
Rb	13.3 ($K\alpha$)
Pt	9.4 ($L\alpha_1$), 11.1 ($L\beta_1$)
Au	9.7 ($L\alpha_1$), 11.4 ($L\beta_1$)
Hg	9.9 ($L\alpha_1$), 11.8 ($L\beta_1$)
Tl	10.3 ($L\alpha_1$), 12.2 ($L\beta_1$)
Pb	10.5 ($L\alpha_1$), 12.6 ($L\beta_1$)
Bi	10.8 ($L\alpha_1$), 13.0 ($L\beta_1$)
Po	11.1 ($L\alpha_1$), 13.4 ($L\beta_1$)
At	11.4 ($L\alpha_1$), 13.8 ($L\beta_1$)
Rn	11.7 ($L\alpha_1$), 14.3 ($L\beta_1$)
Fr	12.0 ($L\alpha_1$), 14.7 ($L\beta_1$)
Ra	12.3 ($L\alpha_1$), 15.2 ($L\beta_1$)
Ac	12.6 ($L\alpha_1$), 15.7 ($L\beta_1$)
Th	12.9 ($L\alpha_1$), 16.2 ($L\beta_1$)
Pa	13.3 ($L\alpha_1$), 16.7 ($L\beta_1$)
U	13.6 ($L\alpha_1$), 17.2 ($L\beta_1$)
Np	13.9 ($L\alpha_1$), 17.7 ($L\beta_1$)

2.2 การส่งผ่านรังสีเอกซ์และวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ [2, 3]

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปในตัวกลาง จะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางนั้นทำให้พลังงานบางส่วน ถูกดูดกลืน (Absorption) กระเจิง (Scatter) หรือเคลื่อนที่ผ่าน (Transmission) ส่งผลให้ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์ลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ที่ลดลงและความหนาของตัวกลางที่รังสีเอกซ์ผ่านเป็นไปตามสมการ (1)

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (1)$$

โดย I คือ ความเข้มรังสีเอกซ์หลังผ่านเข้าไปในตัวกลาง I_0 คือ ความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนผ่านเข้าไปในตัวกลาง μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น และ T คือ ความหนาของตัวกลางที่รังสีเอกซ์ผ่านเข้าไป

จำนวนโฟตอนของรังสีเอกซ์ต่อหน่วยเวลาที่ได้จากการเรืองรังสีจะถูกนับและแสดงผลเป็นความเข้ม (Peak Intensity) หรืออัตรานับ (Count Rate) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของธาตุที่นำมาวิเคราะห์

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางที่รังสีเอกซ์ผ่านเข้าไป และพลังงานของรังสีเอกซ์ โดยมีค่าลดลงตามพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นเพราะรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงจะมีความสามารถในการทะลุผ่านมากกว่า ส่วนความหนาหรือระยะที่รังสีเอกซ์เคลื่อนผ่านไปในตัวกลางไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นดังสมการ (2) เป็นค่าที่แสดงถึงการดูดกลืนพลังงานต่อหน่วยความหนาและต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น cm^{-1}

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{T} \quad (2)$$

โดยทั่วไปแล้วงานด้านรังสีเอกซ์นิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (μ_m) ดังสมการ (3) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการดูดกลืนพลังงานต่อหน่วยมวลและต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น cm^2/g เนื่องจากเป็นค่าที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับเลขอะตอมที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลสำหรับสารประกอบ สารละลาย หรือสารเนื้อผสมสามารถหาได้โดยการคำนวณจากค่าทางทฤษฎี

$$\mu_m = \mu/\rho = \sum W_i (\mu/\rho)_i \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารประกอบ สารละลาย หรือสารเนื้อผสม มีหน่วยเป็น g/cm^3 W_i คือ weight fractions ของธาตุแต่ละชนิดในสารประกอบ และ $(\mu/\rho)_i$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุต่างๆ โดยอ้างอิงจากวารสารต่างประเทศ เช่น Annals of Nuclear Energy

2.3 การส่งผ่านรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ 2 พลังงานผ่านแผ่นทองคำเปลวในเลมบรรจ

เมื่อรังสีเอกซ์ทุติยภูมิจากตะกั่วถูกส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเลมบรรจ สามารถแทนค่าในสมการ (1) ได้

$$I_{GL+P} = I_0 e^{-(\mu_{GL} T_{GL} + \mu_P T_P)} \quad (4)$$

เมื่อ I_{GL+P} คือ ความเข้มรังสีเอกซ์หลังผ่านเข้าไปในแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเลมบรรจ I_0 คือ ความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนถูกส่งผ่านเข้าไปในแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเลมบรรจ μ_{GL} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของทองคำเปลว μ_P คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของกระดาษที่เป็นเลมบรรจแผ่นทองคำเปลว T_{GL} คือ ความหนาของแผ่นทองคำเปลว และ T_P คือ ความหนาของกระดาษที่เป็นเลมบรรจทองคำเปลว

เมื่อวัดค่าความเข้มพลังงานรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่ผ่านกระดาษที่เป็นเลมบรรจทองคำเปลว โดยนำแผ่นทองคำเปลวออก จะสามารถหาค่า μ_P ได้จาก

$$I_P = I_0 e^{-\mu_P T_P} \quad (5)$$

เมื่อ I_P คือความเข้มรังสีเอกซ์ที่ผ่านเลมบรรจทองคำเปลว และ I_0 คือความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนถูกส่งผ่านเข้าไปในเลมบรรจทองคำเปลว ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนถูกส่งผ่านเข้าไปในแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเลมบรรจ

สามารถหาค่า μ_{GL} ได้โดยการหารสมการ (5) ด้วยสมการ (4) ดังนี้

$$I_P / I_{GL+P} = e^{\mu_{GL} T_{GL}} \quad (6)$$

เมื่อจัดรูปสมการ (6) ใหม่ และแทนค่าความเข้มรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 ของตะกั่ว L_α และ 12.6 keV ของตะกั่ว L_β ตามลำดับได้สมการ (7) และ (8) ดังนี้

$$\ln(I_P / I_{GL+P})_{10.5keV} = \mu_{GL,10.5keV} T_{GL,10.5keV} \quad (7)$$

และ

$$\ln(I_P / I_{GL+P})_{12.6keV} = \mu_{GL,12.6keV} T_{GL,12.6keV} \quad (8)$$

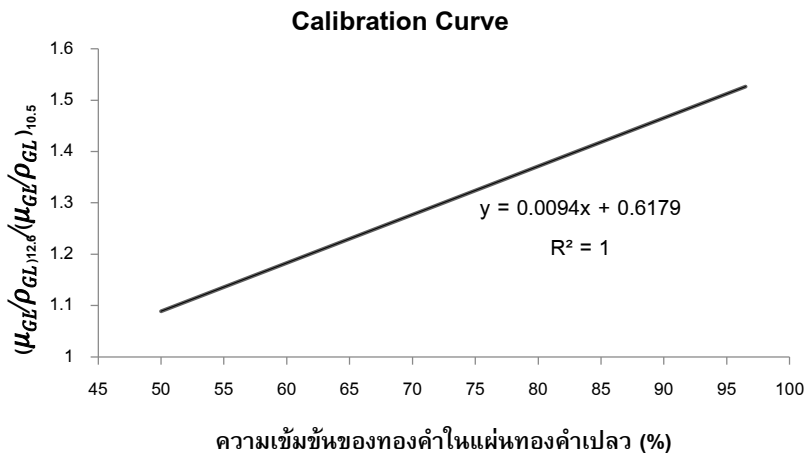
เนื่องจากความหนาของแผ่นทองคำเปลว T_{GL} ในสมการ (7) และ (8) มีค่าเท่ากัน จึงเขียนอัตราส่วนสมการทั้งสองได้ดังนี้

$$\frac{\mu_{GL12.6keV}}{\mu_{GL10.5keV}} = \frac{\ln(I_P/I_{GL+P})_{12.6keV}}{\ln(I_P/I_{GL+P})_{10.5keV}} \quad (9)$$

2.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของทองคำ

เมื่อพิจารณาสมการ (9) พบว่าค่า $\frac{(\mu_{GL}/\rho_{GL})_{12.6}}{(\mu_{GL}/\rho_{GL})_{10.5}}$ หาได้จากการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อคำนวณอัตราส่วนดังกล่าวของแผ่นทองคำเปลวที่ความบริสุทธิ์ต่างๆ แล้วสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของทองคำ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่า $\frac{\ln(I_P/I_{GL+P})_{12.6}}{\ln(I_P/I_{GL+P})_{10.5}}$ ซึ่งเป็ค่าที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้คำนวณหาความเข้มข้นของทองคำที่ผสมในแผ่นทองคำเปลวเพื่อวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวได้

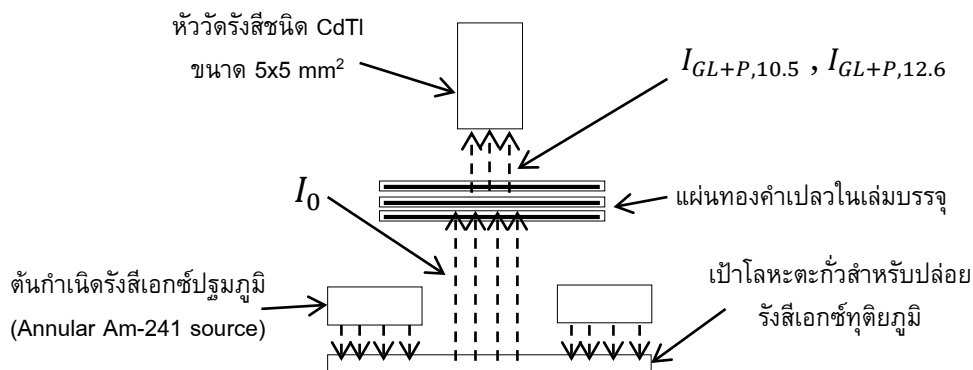
โดยกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของทองคำเป็นไปตามรูปที่ 1 ซึ่งค่า μ_{GL}/ρ_{GL} ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ได้จากการคำนวณดังสมการ (3) โดยคำนวณความเข้มข้นของทองคำและเงินที่เป็นส่วนผสมในแผ่นทองคำเปลวที่สัดส่วนต่างๆ เช่น ทองคำ 96.5% เงิน 3.5%, ทองคำ 90% เงิน 10% และ ทองคำ 85% เงิน 15% เป็นต้น จากนั้นนำมาเทียบอัตราส่วนกันและสร้างเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของทองคำเปลวที่ความเข้มข้นต่างๆ



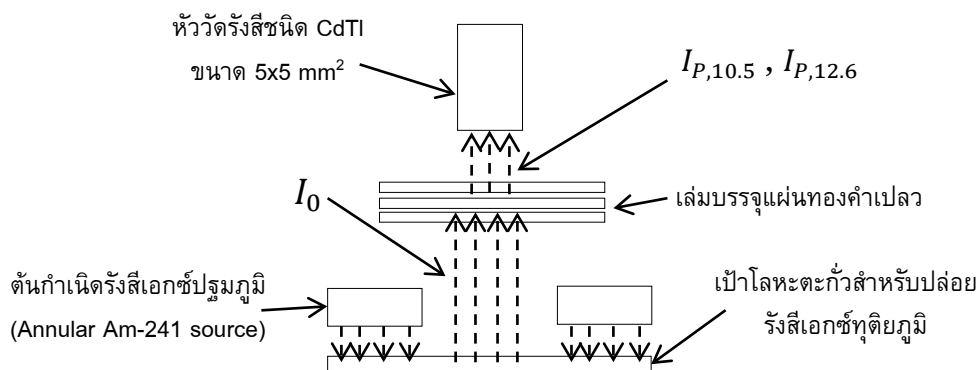
รูปที่ 1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของทองคำ

2.5 คำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลว

เมื่อทราบความเข้มข้นของแผ่นทองคำเปลวจากข้อ 2.4 แล้วนำไปคำนวณหา μ_{GL}/ρ_{GL} ของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV จากนั้นแทนค่าในสมการ (6) เพื่อคำนวณหา T_{GL} ซึ่งคือความหนาของแผ่นทองคำเปลวได้



รูปที่ 2 การจัดการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของรังสีเอกซ์พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุ



รูปที่ 3 การจัดการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของรังสีเอกซ์พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว

2.6 การทดลองหาความบริสุทธิ์และความหนาของตัวอย่างทองคำเปลว

ใช้ตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว 2 ชุด โดยทองคำเปลวชุดที่ 1 มีค่าความบริสุทธิ์ 80% ขนาด 3.5x3.5 cm² และทองคำเปลวชุดที่ 2 มีค่าความบริสุทธิ์ 90% ขนาด 3.5x3.5 cm² โดยไม่ทราบความหนาของทองคำเปลวทั้ง 2 ชุด ทำการทดลองตามข้อ 2.2 - 2.4 โดยจัดการทดลองดังรูปที่ 2

เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุจำนวน 15 แผ่น และจัดการทดลองดังรูปที่ 3 เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านเล่มบรรจุเปล่าจำนวน 15 แผ่น โดยความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ใช้มีค่า 30 mCi ลำรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่ส่งผ่านทองคำเปลวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm หัววัดรังสีชนิด CdTe ที่ใช้วัดมีค่ากำลังแยกพลังงาน (Energy resolution) 0.32% ในการวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุและที่ผ่านเล่มบรรจุเปล่าชุดเดียวกันต้องจัดอุปกรณ์ให้มีระยะห่างเท่ากัน โดยในการทดลองนี้ได้จัดวางต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิห่างจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ 9 mm วางแผ่นทองคำเปลวห่างจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ทุติยภูมิเป็นระยะ 8 cm และวางหัววัดรังสีห่างจากแผ่นทองคำเปลวเป็นระยะ 1 cm คำนวณหาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยสมการสมการ (9) และสมการจากกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 1 จากนั้นคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวตามสมการ (6)

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 2) พบว่าค่าความเข้มข้นของทองคำเปลวชุดที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 79% และ 88% ตามลำดับ และค่าความหนาของแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 1 ที่ได้จากการคำนวณ ณ พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV มีค่าเท่ากับ 0.105 และ 0.107 μm ตามลำดับ ส่วนความหนาของแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 2 ที่ได้จากการคำนวณ ณ พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV มีค่าเท่ากับ 0.133 และ 0.134 μm ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

Sample no.	$\frac{(\mu_{GL}/\rho_{GL})_{12.6}}{(\mu_{GL}/\rho_{GL})_{10.5}}$	Gold concentration (%)	Gold leaf thickness (μm)	
			Calculating energy 10.5 keV	Calculating energy 12.6 keV
1	1.357 $\pm$ 0.06	79 $\pm$ 2.3	0.105 $\pm$ 0.001200	0.107 $\pm$ 0.000077
2	1.447 $\pm$ 0.03	88 $\pm$ 1.4	0.133 $\pm$ 0.000102	0.134 $\pm$ 0.000068

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการ (10) ดังนี้ [2]

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (10)$$

เมื่อ σ_u คือค่าความคลาดเคลื่อนของจำนวนคำนวณได้จากฟังก์ชัน u และ u คือฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ

เมื่อแทนสมการ u ในสมการ (10) ด้วยสมการ (9) สามารถคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของหาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 1 และ 2 ได้ 2.3% และ 1.4%

เมื่อแทนสมการ u ในสมการ (10) ด้วยสมการ (6) สามารถคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองหาความหนาเฉลี่ยของแผ่นทองคำเปลว 1 แผ่นของแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 1 จากพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ได้ 0.11% และ 0.07% ตามลำดับ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองหาความหนาเฉลี่ยของแผ่นทองคำเปลว 2 แผ่นของแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 1 จากพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ได้ 0.08% และ 0.05% ตามลำดับ

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 1 มีความบริสุทธิ์มากกว่าแผ่นทองคำเปลวชุดที่ 2 โดยเมื่อทราบความเข้มข้นของทองคำเปลวแล้วสามารถคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวได้และพบว่าความหนาของแผ่นทองคำเปลวชุดเดียวกันที่คำนวณได้จากพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV มีค่าสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถนำค่าความบริสุทธิ์และความหนาของทองคำเปลวมาพิจารณาคุณภาพของแผ่นทองคำเปลวได้

เมื่อวัดค่าความเข้มข้นของทองในแผ่นทองคำเปลวและความหนาของแผ่นทองคำเปลวตัวอย่างทั้ง 2 ชุดแล้ว สามารถนำแผ่นทองคำเปลวตัวอย่างไปใช้งานต่อไปได้เพราะไม่ได้ผ่านการทำลายชิ้นงานขณะทำการตรวจสอบ

การเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและเพิ่มเวลาในการวัดความเข้มข้นของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ขณะทำการทดลอง สามารถลดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองให้น้อยลงได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ รัตมี และอาจารย์ จเด็จ เย็นใจ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ และขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนตลอดมา

References

- [1] E. P. Bertin. (1975). **Principles and Practice of X-ray Spectrometric Analysis**. 2nd Edition. New York: A Division of Plenum Publishing Corporation.

- [2] Glenn F. Knoll. (1999). **Radiation Detection and Measurement**. 3rd Edition. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Rene E. Van Grieken, Andrzej A. Markowicz. **Handbook of X-ray Spectrometry Methods and Techniques**. New York: Marcel Dekker, Inc.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ศิริลักษณ์ สัตรา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครสวรรค์ และระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สมบูรณ์ รัตมี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก ในสาขา Nuclear Engineering จาก Purdue University ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปีพ.ศ. 2555 ปัจจุบันเป็นนักวิจัยและอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ E-mail: somboon.ra@chula.ac.th



จเด็จ เย็นใจ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันเป็นนักวิจัยและอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ E-mail: chadet.y@chula.ac.th