

การหาความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบไม่ทำลาย



นางสาวศิริลักษณ์ สาดรา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF THICKNESS AND PURITY OF GOLD LEAVES USING
NONDESTRUCTIVE X-RAY FLUORESCENCE TECHNIQUE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบไม่ทำลาย
โดย	นางสาวศิริลักษณ์ สาทรา
สาขาวิชา	นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. สมบูรณ์ รัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. สมบูรณ์ รัศมี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศิริชัย หวังเจริญตระกูล)

ศิริลักษณ์ สาทรา : การหาความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบไม่ทำลาย (DETERMINATION OF THICKNESS AND PURITY OF GOLD LEAVES USING NONDESTRUCTIVE X-RAY FLUORESCENCE TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. สมบูรณ์ รัศมี, 72 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวัดความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลวแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์และการส่งผ่านรังสีเอกซ์ การวัดความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์สามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นของทองคำต่อเงินกับสัดส่วนความเข้มข้นรังสีเอกซ์เรืองของทองคำต่อเงิน และเปรียบเทียบกับแผ่นทองคำเปลวมาตรฐาน นอกจากนี้ยังได้ใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์เพื่อคำนวณหาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวโดยส่งผ่านรังสีเอกซ์พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV จากตะกั่ว ความเข้มของรังสีเอกซ์ทะลุผ่านถูกนำมาใช้คำนวณหาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ซึ่งความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของทองคำเปลวที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎี โดยได้เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้กับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA และเทคนิค ICP พบว่าความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้มีความสอดคล้องกัน จากนั้นคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวโดยใช้ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวที่ได้และเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีผลสอดคล้องกัน เนื่องจากเป็นเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบไม่ทำลาย แผ่นทองคำเปลวที่ผ่านการตรวจสอบแล้วสามารถนำไปใช้งานต่อได้ตามปกติ

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570400721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: XRF / GOLD LEAVES

SIRILUCK SARTTRA: DETERMINATION OF THICKNESS AND PURITY OF GOLD LEAVES USING NONDESTRUCTIVE X-RAY FLUORESCENCE TECHNIQUE.

ADVISOR: SOMBOON RASSAME, Ph.D., 72 pp.

The determination on purity and thickness of gold Leaves using the nondestructive X-Rays Fluorescence (XRF) and X-rays transmission technique was developed in this study. The purity of gold leaves obtained by XRF technique was estimated using the relation of the Au/Ag concentration ratio and the Au/Ag fluorescence x-rays intensity ratio with known calibrated values on the standard gold leaves. The transmission X-rays technique was also applied to estimate the purity of gold leaves by using the transmission x-rays of 10.5 and 12.6 keV which are excited from a lead material. The intensity of transmission x-rays was used to calculate the ratios of x-rays absorption coefficient of gold leaves at 10.5 and 12.6 keV, where the purity of gold leaves was calculated from the relation of x-ray absorption coefficient ratio and theoretical calculated concentration of gold leaves. The comparison of the purity of gold leaves estimated by these techniques, Neutron Activation Analysis (NAA) and Inductive Couple Plasma (ICP) revealed a good agreement between them. The thickness of gold leaves was afterward calculated based on calculated results of purity of gold leaves, and compared with the thickness of gold leaves analyzed by the Scanning Electron Microscope (SEM) imaging. The comparison showed that there were good corresponded values on the thickness of gold leaves estimated by the both techniques. Since the developed technique to determine the purity and thickness of gold leaves was the nondestructive X-rays fluorescence technique, the verified gold leaves were reusable.

Department: Nuclear Engineering Student's Signature

Field of Study: Nuclear Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2015

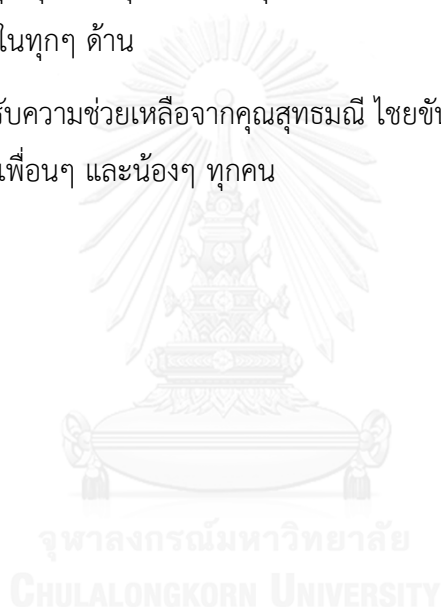
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ รัศมี อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์จเด็จ เย็นใจ ที่ให้คำแนะนำตลอดการทำวิจัย และขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

ขอขอบคุณคุณพงษ์ยุทธ ศรีพลอย คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี ดร.ชุตินา กรานรอด และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่ให้ความเข้าใจ กำลังใจ คอยช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน

ขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือจากคุณสุทธมณี ไชยขันธุ์ คุณเหนือตะวัน อารังสิริภาคย์ และกำลังใจที่ดีจากพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	2
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รังสีเอกซ์.....	4
2.1.1 รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง.....	4
2.1.2 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว.....	5
2.1.3 การเกิดกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์	5
2.1.3.1 Primary excitation.....	5
2.1.3.2 Secondary excitation	5
2.1.3.3 Internal γ conversion	6
2.1.3.4 Internal β conversion.....	6

2.1.3.5 Orbital-electron capture	7
2.2 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF).....	7
2.2.1 การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในด้านต่างๆ.....	8
2.3 X-ray absorption edges	9
2.4 การดูดกลืนรังสีเอกซ์.....	11
2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์.....	11
2.4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น	11
2.4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล.....	11
2.4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงอะตอม.....	12
2.4.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงโมลาร์	12
2.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารเนื้อผสม.....	12
2.5 Neutron Activation Analysis (NAA).....	13
2.5 แผ่นทองคำเปลว.....	14
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.1 วัสดุอุปกรณ์ในงานวิจัย	16
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลงานวิจัยบางส่วน	17
3.2.1 ทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุ.....	17
3.2.1.1 ศึกษาค่า Absorption edge ของทองคำ เพื่อเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์และโลหะเพื่อใช้ทำ Backing material	17
3.2.2 พัฒนาวิธีวัดความบริสุทธิ์เพื่อจำแนกระดับคุณภาพของแผ่นทองคำเปลว ได้แก่แผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 96.5%.....	17
3.2.2.1 วิธีวัดความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว.....	17

3.2.2.2	สร้าง Calibration curve เพื่อใช้เปรียบเทียบและคำนวณหาปริมาณของ ทองคำที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว.....	19
3.2.2.3	วิธีวัดความหนาของแผ่นทองคำเปลว	21
3.2.3	ทดลองวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวด้วยเทคนิคที่ พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับวิธีอื่น.....	21
3.2.3.1	วัดความหนาและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวด้วยเทคนิคที่ พัฒนาขึ้น.....	21
3.2.3.2	เปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวกับวิธี NAA และ ICP.....	23
3.2.3.3	เปรียบเทียบความหนาของตัวอย่างทองคำเปลวกับความหนาที่วิเคราะห์ ได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)	23
บทที่ 4	ผลการวิจัย.....	24
4.1	วิเคราะห์ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวและความบริสุทธิ์ของแผ่น ทองคำเปลวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์	24
4.2	การส่งผ่านรังสีเอกซ์จากตะกั่วเข้าไปในแผ่นทองคำเปลวเพื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์และ ความหนาของแผ่นทองคำเปลว	30
4.2.1	ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านตัวอย่างแผ่น ทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุ	30
4.2.2	ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านกระดาษที่ใช้ทำเล่ม บรรจุแผ่นทองคำเปลว	35
4.2.3	อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่ พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ได้จากการคำนวณความเข้มของรังสีเอกซ์ส่งผ่าน	40
4.2.4	กราฟ Calibration curve ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว ..	41
4.2.5	ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์และความหนาของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ได้จาก อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV	42
4.3	ความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากวิธี NAA และ ICP	44

4.4 ความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM).....	46
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	50
5.1 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลว.....	50
5.2 ผลความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลวจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีอื่น	52
5.2.1 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์และเทคนิค NAA.....	52
5.2.2 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์และเทคนิค NAA	53
5.2.3 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์และเทคนิค ICP.....	54
5.2.4 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์และเทคนิค ICP	55
5.2.5 เปรียบเทียบผลความหนาของตัวอย่างทองคำเปลว	56
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ ICP-OES.....	60
ภาคผนวก ข วิธีการเตรียมแผ่นทองคำเปลวสำหรับใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	72

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่า Absorption edges (keV) ที่วงโคจรต่างๆ ของธาตุ [8].....	10
ตารางที่ 3.1 ค่า Absorption edge ของทองคำ [8].....	17
ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำที่พลังงานใกล้เคียง 10.5 และ 12.6 keV	20
ตารางที่ 4.1 พลังงานต่างๆ ของธาตุที่เป็นส่วนผสมในแผ่นทองคำเปลว	28
ตารางที่ 4.2 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงานต่างๆ ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว	29
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากทองคำและจากเงินที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว	29
ตารางที่ 4.4 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ส่งผ่านแผ่นทองคำเปลว	35
ตารางที่ 4.5 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ส่งผ่านเลมบรรจุแผ่นทองคำเปลว.....	40
ตารางที่ 4.6 การหาค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV	41
ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวแต่ละตัวอย่างที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ของแผ่นทองคำเปลวที่ความบริสุทธิ์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ	42
ตารางที่ 4.8 ความบริสุทธิ์และความหนาเฉลี่ยของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว.....	43
ตารางที่ 4.9 ความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากวิธี NAA	44
ตารางที่ 4.10 ความบริสุทธิ์ของแผ่นตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวัด ICP.....	45
ตารางที่ 4.11 ความหนาของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	46
ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV และความหนาของแผ่นทองคำเปลว	51

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 Primary excitation	5
รูปที่ 2.2 Secondary excitation	6
รูปที่ 2.3 Internal γ conversion.....	6
รูปที่ 2.4 Internal β conversion	6
รูปที่ 2.5 Orbital-electron capture	7
รูปที่ 2.6 พลังงานต่างๆ ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเหรียญเงิน	8
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของ ทองคำ	10
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ใช้ในงานวิจัย	16
รูปที่ 3.2 หัววัดรังสี CdTL ขนาด 5x5 มิลลิเมตร	16
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จ่ายไฟคิกตาสูง (High voltage power supply) และภาคขยายสัญญาณ (Amplifier) รุ่น PX2T-CdTL.....	16
รูปที่ 3.4 จัดอุปกรณ์เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว...	22
รูปที่ 3.5 จัดอุปกรณ์เพื่อวัดความเข้มของพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านแผ่นทองคำเปลวที่ อยู่ในเล่มบรรจ	22
รูปที่ 3.6 จัดอุปกรณ์วัดความเข้มของพลังงาน 10.5 และ 12.6 ที่ผ่านกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจ ...	22
รูปที่ 3.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยวิธี NAA	23
รูปที่ 3.8 การฝังตัวอย่างในเรซินเพื่อถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	23
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว A	24
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว B	25
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว C	25
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว D.....	26
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว E	26

รูปที่ 4.6 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว F	27
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว G.....	27
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว H.....	28
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว จากการวัดการเรืองรังสีเอกซ์	30
รูปที่ 4.10 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว A ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	31
รูปที่ 4.11 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว B ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	31
รูปที่ 4.12 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว C ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	32
รูปที่ 4.13 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว D ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	32
รูปที่ 4.14 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว E ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	33
รูปที่ 4.15 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว F ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	33
รูปที่ 4.16 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว G ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	34
รูปที่ 4.17 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว H ที่อยู่ในเล่มบรรจุ.....	34
รูปที่ 4.18 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว A.....	36
รูปที่ 4.19 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว B.....	36
รูปที่ 4.20 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว C.....	37

รูปที่ 4.21 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่น ทองคำเปลว D	37
รูปที่ 4.22 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่น ทองคำเปลว E.....	38
รูปที่ 4.23 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่น ทองคำเปลว F.....	38
รูปที่ 4.24 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่น ทองคำเปลว G	39
รูปที่ 4.25 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่น ทองคำเปลว H	39
รูปที่ 4.26 กราฟ Calibration curve	41
รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จาก อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV	43
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบความหนาของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จาก ความเข้มของรังสีเอกซ์ส่งผ่านที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV.....	44
รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวจากวิธี NAA.....	45
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวจากเทคนิค ICP.....	46
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว A.....	47
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว B.....	47
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว C.....	47
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว D	48
รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว E.....	48
รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว F.....	48
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว G	49
รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว H	49

รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์กับเทคนิค NAA.....	52
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่คำนวณได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ถูกส่งผ่าน กับเทคนิค NAA.....	53
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์กับเทคนิค ICP	54
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่คำนวณได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่ถูกส่งผ่าน กับเทคนิค ICP	55
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากรังสีเอกซ์ส่งผ่าน และจาก ภาพถ่าย SEM.....	56
รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว A.....	60
รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว B.....	61
รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว D	62
รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว E.....	63
รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว F.....	64
รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว G	65
รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว H.....	66
รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว A	67
รูปที่ 5.14 ตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ฝังในเรซิน	69
รูปที่ 5.15 ตัดขวางตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ฝังในแผ่นทองคำเปลว	69
รูปที่ 5.16 แผ่นทองคำเปลวที่ฝังในเรซินหลังจากเคลือบด้วยโลหะ	70
รูปที่ 5.17 ตัวอย่างภาพถ่ายแผ่นทองคำเปลวที่ไม่ได้ฝังในเรซิน	70
รูปที่ 5.18 ตัวอย่างภาพถ่ายแผ่นทองคำเปลวที่ฝังในเรซิน.....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การใช้แผ่นทองคำเปลวในงานวิจิตรศิลป์ของประเทศไทยมีหลักฐานปรากฏตั้งแต่สมัยสุโขทัยเรื่อยมาโดยเริ่มใช้ในงานระดับสูงและในงานด้านพระพุทธศาสนา ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากแผ่นทองคำเปลวหลากหลายชิ้นทั้งในด้านโบราณคดีและด้านอุปโภคบริโภค ทางด้านโบราณคดีได้นำแผ่นทองคำเปลวมาใช้ในการประดับตกแต่ง ในด้านอุปโภคบริโภคมีการผสมแผ่นทองคำเปลวลงไปในผลิตภัณฑ์เสริมความงามต่างๆ มีการวิจัยพบว่าทองคำสามารถต้านอนุมูลอิสระได้และมีผลทำให้เกิดกลไกการต่อต้านการอักเสบของข้อกระดูกในโรคเก๊าท์ จึงทำให้เกิดความเชื่อว่าทองคำน่าจะเกิดกลไกเช่นเดียวกันนี้ได้ในการต้านอนุมูลอิสระของผิวหนัง นอกจากนี้ยังมีการนำแผ่นทองคำเปลวไปประดับหรือเป็นส่วนประกอบของอาหารเพื่อเพิ่มมูลค่า ซึ่งทองคำบริสุทธิ์จะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีต่อเซลล์ภายในร่างกายจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายหรือผลเสีย ร่างกายสามารถขับออกได้ตามปกติ สหภาพยุโรปได้อนุญาตให้สามารถใช้ทองคำเป็นสารแต่งเติมในอาหารได้ [1]

ปัจจุบันทองคำเปลวที่มีในท้องตลาดบางส่วนไม่ได้ผลิตจากทองคำบริสุทธิ์ เพราะมีการผสมโลหะชนิดอื่นลงไปด้วย ทำให้การใช้งานทองคำเปลวในด้านต่างๆ ไม่ได้ประสิทธิภาพเต็มที่ อีกทั้งอาจก่อให้เกิดผลเสียอีกด้วย การตรวจสอบคุณภาพของแผ่นทองคำเปลวโดยไม่ทำลายด้วยเทคนิคการกระตุ้นและส่งผ่านรังสีเอกซ์จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความสะดวกเพราะไม่ต้องสุ่มตรวจชิ้นงานสามารถตรวจชิ้นงานได้ในปริมาณมาก และที่สำคัญคือสามารถนำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบแล้วมาใช้งานต่อได้ตามปกติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีหาความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบไม่ทำลาย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุ ได้แก่ จำนวนเล่มบรรจุ พลังงานกระตุ้น และ ชนิดของ backing material

1.3.2 พัฒนาวิธีวัดความบริสุทธิ์เพื่อจำแนกระดับคุณภาพของแผ่นทองคำเปลว ได้แก่ แผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 96.5%

1.3.3 ทดลองวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับวิธีอื่น

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทำการทดลองและคำนวณหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุ ได้แก่ จำนวนเล่มบรรจุ พลังงานกระตุ้น และ ชนิดของ backing material

1.4.3 ทำการทดลองวัดความบริสุทธิ์เพื่อจำแนกระดับคุณภาพของแผ่นทองคำเปลว ได้แก่ แผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 96.5%

1.4.4 ทำการทดลองวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับวิธีอื่น

1.4.5 วิเคราะห์ผลการวิจัย สรุปผลวิจัย และรายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

ได้วิธืหาความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบไม่ทำลาย โดยสามารถจำแนกระดับคุณภาพของแผ่นทองคำเปลวได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 Application of X-ray fluorescence for the analysis of some technological material โดย N.M. Mukhamedshin และ A.A. Mirsagatova ได้พัฒนาเทคนิค XRF เพื่อระบุส่วนประกอบของโลหะผสมและส่วนประกอบของของเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ จากการทดลองพบว่าเมื่อโลหะผสมประกอบด้วยธาตุสองชนิดที่มีเลขอะตอมต่างกันหนึ่งหน่วยจะต้องแก้ค่า matrix effect ด้วย แต่ถ้าโลหะผสมมีลักษณะเป็นชั้นบางๆ ไม่จำเป็นต้องแก้ค่า matrix effect ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างมาตรฐานได้ค่าที่มีความผิดพลาดน้อย ทางผู้ทำการทดลองจึงสรุปผลว่าสามารถหาส่วนประกอบของโลหะผสมได้เลยโดยไม่ต้องใช้ตัวอย่างมาตรฐาน เนื่องจากส่วนประกอบของของเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ส่วนใหญ่เป็นธาตุเบาที่ไม่ปรากฏสเปกตรัมจากรังสีเอกซ์ ทางผู้ทดลองจึงใช้เทคนิค INAA แทน [2]

1.6.2 Characterization of thin films by X-ray transmission measurements โดย K.-H. Stephen et al. ได้ศึกษาลักษณะของฟิล์มบางด้วยเทคนิควัดการส่งผ่านของรังสีเอกซ์ โดยส่งผ่านรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (0.05 - 10 keV) แล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่นเชิงมวล (S) ของแผ่นฟิล์มบางจากการจัดรูปสมการ $I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho t}$ ให้ I/I_0 เป็นค่าความส่งผ่านที่แทนด้วยตัวแปร T จะสามารถหาค่าความหนาแน่นเชิงมวลได้จาก $S = (\rho T) = \frac{\ln T}{-(\mu/\rho)}$ โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี [3]

1.6.3 Applicability of X-ray fluorescence spectroscopy as method to determine thickness and composition of stacks of metal thin films: A comparison with imaging and profilometry โดย J. A. M. Vrielink et al. ได้ทำการทดลองวัดความหนาของฟิล์มโลหะบางแบบชั้นเดียวและหลายชั้นแล้วเปรียบเทียบผลการหาความหนาจากเครื่อง profilometry และภาพถ่าย SEM นอกจากนี้ยังใช้เทคนิค XRF ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบของฟิล์มบาง และใช้แยก sub layer ของฟิล์มบางอีกด้วย จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนาของฟิล์มที่ได้จากทั้ง 3 เทคนิคสอดคล้องกัน แต่ค่าจากเครื่อง profilometry มีขีดจำกัดอยู่ที่สามารถหาความหนาของชั้นงานได้ดีที่ความหนาไม่ต่ำกว่า 50 นาโนเมตร เมื่อบางกว่านี้จะเกิดความคลาดเคลื่อนอย่างชัดเจน ในขณะที่ข้อเสียของ SEM คือต้องทำลายแผ่นฟิล์มที่นำมาวัดค่า [4]

1.6.4 X-ray fluorescence analysis of archaeological finds and art objects: Recognizing gold and glinding โดย Tomas Trojek และ Martin Hlozek ได้ใช้เทคนิค XRF ในการแยกแยะระหว่างโบราณวัตถุที่ทำจากทองและที่ถูกหุ้มด้วยทอง โดยคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่าง Au-M/Au-L, Au-M/Au-L, Ag-L/Ag-K หรือ Cu-K α /Cu-K β ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม โดยสเปกตรัม Au-M พลังงานต่ำจะพบในความหนาที่บางมากบนพื้นผิว และในทางตรงข้ามเมื่อความหนาของทองที่เคลือบเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนของ Au-M/Au-L จะลดลง [5]

1.6.5 Multilayered sample reconstructed by measuring K α /K β or L α /L β X-ray intensity ratio by EDXRF โดย Roberto Cesareo et al. ได้ทำการหาความหนาของชั้นงานด้วยเทคนิค EDXRF โดยการวัดและหาอัตราส่วนความเข้มรังสีเอกซ์ของพลังงาน K α /K β และ L α /L β โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของทองและอัตราส่วน L α /L β จากตะกั่ว เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของโลหะผสมระหว่างทอง เงิน และทองแดง จากผลการทดลองพบว่า ค่าที่ได้มีความแม่นยำเมื่อโลหะผสมมีทองแดงมากกว่า 10%ขึ้นไป [6]

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 รังสีเอกซ์ [7]

รังสีทุกชนิดมีคุณสมบัติคู่คือมีคุณสมบัติเป็นทั้งอนุภาคและคลื่น โดยคุณสมบัติในด้านของคลื่นนั้น รังสีเอกซ์จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นระหว่างประมาณ 10^{-5} ถึง 100 อังสตรอม รังสีเอกซ์สามารถเกิดได้จากความหน่วงของอิเล็กตรอนพลังงานสูงและการเปลี่ยนระดับวงโคจรของอิเล็กตรอนภายในอะตอม การวัดปริมาณของรังสีเอกซ์สามารถวัดได้จากความถี่ ความยาวคลื่น พลังงาน และความเข้ม ซึ่งความถี่ ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.1) ดังนี้

$$E = hv = hc/\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือพลังงาน

h คือค่าคงที่ของพลังค์

v คือความถี่

c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ

λ คือความยาวคลื่น

ความเข้มของรังสีเอกซ์คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือค่านับวัดต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยหนึ่งหน่วยพื้นที่นั้นคือพื้นที่ของหัววัดรังสีที่ใช้วัดค่าและหนึ่งหน่วยเวลาคือเวลาที่ใช้วัดปริมาณรังสีเอกซ์นั่นเอง

2.1.1 รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

แถบสเปกตรัมต่อเนื่องของรังสีเอกซ์เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสแล้วเกิดการกระเจิงออกมาพร้อมกับมีความหน่วงทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานหลายค่าและต่อเนื่องออกมา เรียกว่าเบรมชตราลูง โดยรังสีบีตา, Internal conversion, Compton-recoil และ Auger electron ต่างให้แถบสเปกตรัมต่อเนื่องของรังสีเอกซ์ออกมา แต่รังสีเอกซ์ต่อเนื่องจะไม่สามารถเกิดได้จากการกระตุ้นเนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานหลายค่าแบบต่อเนื่องของของอิเล็กตรอน ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องมีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับความเร็วและความหน่วงของอิเล็กตรอน

2.1.2 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว

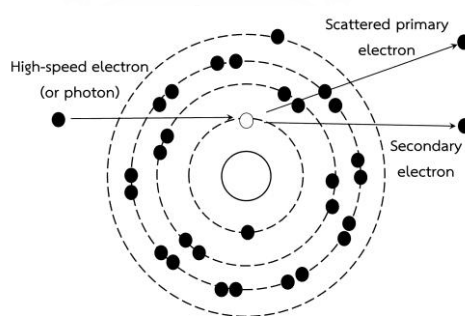
รังสีเอกซ์เฉพาะตัวเกิดเมื่อมีการแทนที่ของอิเล็กตรอน โดยเมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรถัดๆ ไปซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ที่ว่างนั้น พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานส่วนที่มากเกินไปออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีวงโคจรของอิเล็กตรอนและพลังงานที่แตกต่างกันเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ ทำให้พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาเป็นค่าเฉพาะตัวและไม่ต่อเนื่อง ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของอิเล็กตรอนก่อนและหลังจากเกิดการแทนที่

2.1.3 การเกิดกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์

เนื่องจากรังสีเอกซ์เกิดได้เมื่อมีการแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจร การทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนภายในวงโคจรในปริมาณที่มากพอจะสามารถกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์ได้ โดยสามารถทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนภายในวงโคจรได้ดังนี้

2.1.3.1 Primary excitation

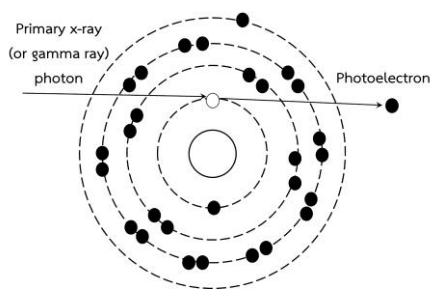
โดยการยิงอิเล็กตรอนหรืออนุภาคเข้าไปในอะตอมเพื่อให้ชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนที่ถูกชนจะหลุดออกจากวงโคจรและเกิดที่ว่างขึ้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Primary excitation

2.1.3.2 Secondary excitation

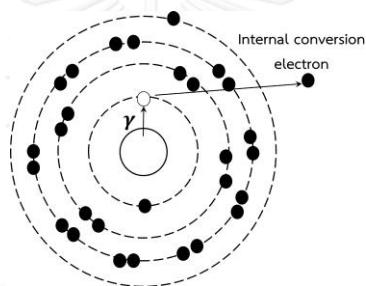
โดยการฉายรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาเข้าไปในอะตอมเพื่อให้ชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นมีพลังงานสูงขึ้นจนหลุดออกจากวงโคจรและเกิดที่ว่างขึ้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Secondary excitation

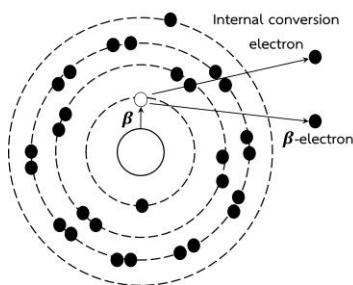
2.1.3.3 Internal γ conversion

เมื่อไอโซโทปกัมมันตรังสีมีการสลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา รังสีแกมมานั้นมีโอกาสชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรรอบๆ นิวเคลียส ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้นและหลุดออกจากวงโคจรและเกิดที่ว่างขึ้น ดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 Internal γ conversion

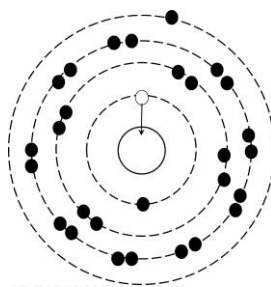
2.1.3.4 Internal β conversion

เมื่อไอโซโทปกัมมันตรังสีสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคบีตาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในชั้น โดยในการเปลี่ยนนิวตรอนไปเป็นอนุภาคบีตา(อิเล็กตรอน)นั้น เลขอะตอมของธาตุจะเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย และมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุนิวไดใหม่นี้ออกมา ดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 Internal β conversion

2.1.3.5 Orbital-electron capture

เมื่อไอโซโทปกัมมันตรังสีจับอิเล็กตรอนที่โคจรรอบๆ นิวเคลียสเข้าไปในนิวเคลียสเพื่อเปลี่ยนเป็นนิวตรอน เลขอะตอมของธาตุนั้นจะลดลงหนึ่งหน่วย และเกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น ดังรูปที่ 2.5

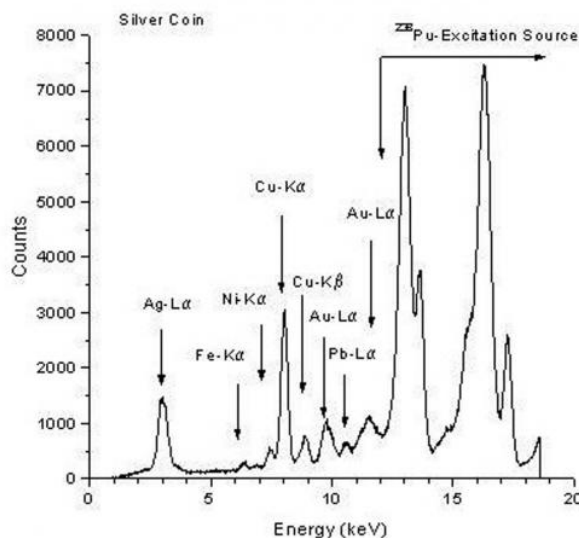


รูปที่ 2.5 Orbital-electron capture

2.2 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

การเรืองรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนวงโคจรของอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรสูงกว่าเข้าแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรต่ำ เนื่องจากพลังงานของวงโคจรทั้งสองแตกต่างกันจึงมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนต่างนั้นออกมาเป็นโฟตอนของรังสีเอกซ์ พลังงานดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับชนิดของธาตุ เพราะธาตุแต่ละชนิดมีวงโคจรของอิเล็กตรอนและพลังงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์หาชนิดของธาตุได้จากโฟตอนของรังสีเอกซ์ เช่น สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของทองคำจะปรากฏพีคที่พลังงาน 9.711($L\alpha$), 11.069($L\beta$), 68.110($K\alpha$) และ 77.968($K\beta$) keV เป็นต้น

จำนวนโฟตอนของรังสีเอกซ์ในหน่วยเวลาที่ได้จากการเรืองแสงจะถูกวัดและแสดงผลเป็นความเข้ม (Peak Intensity) หรืออัตราการนับ (Count Rate) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของธาตุนำมาวิเคราะห์ ดังนั้นนอกจากจะใช้สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์หาชนิดของธาตุได้แล้ว ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 ยังสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณหรือความเข้มข้นของสารประกอบในชิ้นงานที่ทำการวัดได้อีกด้วย การวัดการเรืองแสงของโฟตอนของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวสามารถวัดได้ 2 แบบ คือ วัดค่าพลังงานของ โฟตอนโดยตรง (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence; EDXRF) และวัดค่าความยาวคลื่นของโฟตอน (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence; WDXRF)



รูปที่ 2.6 พลังงานต่างๆ ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเหรียญเงิน
(แหล่งที่มา <http://archeosciences.revues.org/2396>)

การวัดการเรืองแสงของโฟตอนของรังสีเอกซ์แบบ EDXRF เป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากและราคาไม่สูง การติดตั้งการวัดจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ส่วนใหญ่นิยมใช้ไอโซโทปรังสีและหลอดรังสีเอกซ์ขนาดเล็ก เพื่อปลดปล่อยรังสีเอกซ์พลังงานต่างๆ ไปกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์ทุติยภูมิในชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ทุติยภูมินั้นจะมีค่าเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของชิ้นงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หัววัดที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกแยะพลังงานที่ใกล้เคียงกันออกจากกันได้ดี เช่น หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ วัดพลังงานของโฟตอนของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากชิ้นงาน ในขณะที่การวัดการเรืองแสงของโฟตอนของรังสีเอกซ์แบบ WDXRF จะต้องทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยทำให้อัตราการเลี้ยวเบนผ่านผลึกแล้วรวมกันเกิดเป็นคลื่นสะท้อนที่มีความเข้มสูงขึ้น การติดตั้งอุปกรณ์การวัดจะมีความยุ่งยากซับซ้อนและราคาสูงขึ้นตามอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการวัดค่า

2.2.1 การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในด้านต่างๆ

2.2.1.1 การประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นที่แพร่หลายในการตรวจหาองค์ประกอบของสารพิษและโลหะที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ เพราะสามารถจัดอุปกรณ์การวัดได้สะดวกและปฏิบัติงานได้ในพื้นที่จริง

2.2.1.2 งานทางด้านการศึกษาและฟิล์มบาง เนื่องจากรังสีเอกซ์จะทะลุผ่านความหนาและถูกดูดกลืนความเข้มไว้บางส่วน จึงสามารถนำค่าความเข้มดังกล่าวมาคำนวณหาความหนาของ

ฟิล์มบางได้ นอกจากนี้เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคเดียวที่สามารถวัดความหนาของสารที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวได้

2.2.1.3 งานทางด้านปิโตรเลียม มีการใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์อย่างแพร่หลายในทุกขั้นตอนการผลิตปิโตรเลียม เช่น การตรวจหาซัลเฟอร์ในน้ำมันและเชื้อเพลิง การตรวจหาตะกั่วและแมงกานีสในน้ำมันเบนซิน การตรวจหาคลอรีนในน้ำมันดิบเพื่อบอกปริมาณเกลือก่อนที่จะนำน้ำมันดิบไปกลั่น การตรวจสอบหานิกเกิลและวาเนเดียมในน้ำมันดิบเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ เป็นต้น

2.2.1.4 งานทางด้านศิลปะและโบราณคดี ข้อดีของเทคนิคการเรืองแสงที่เหมาะสมกับการใช้งานทางด้านศิลปะและโบราณคดีคือ เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานทางด้านศิลปะและโบราณคดี เช่น การตรวจสอบทองคำประกอบของสีที่ใช้ในภาพวาด การตรวจสอบชนิดของโลหะที่ผสมอยู่ในโลหะผสมของชิ้นงานต่างๆ ทำให้ทราบว่ามีการซ่อมชิ้นงานหรือไม่ การตรวจสอบส่วนประกอบที่อยู่ในเครื่องปั้นดินเผาและเซรามิก การตรวจสอบทองคำประกอบมูลฐานของเพชรพลอย การตรวจสอบองค์ประกอบของหินที่ใช้ในงานประติมากรรมทำให้ทราบแหล่งที่มาของหินได้ เป็นต้น

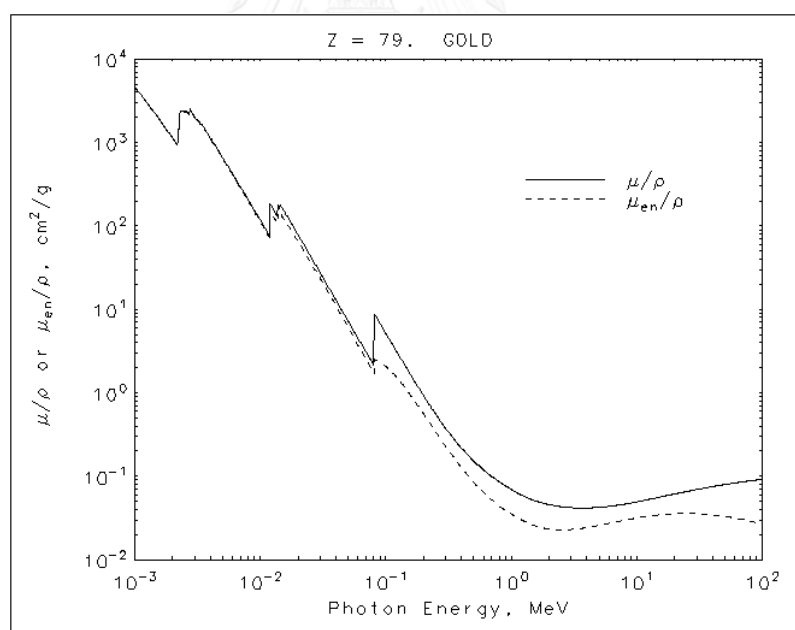
2.3 X-ray absorption edges [7]

การกระตุ้นให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์นั้น จำเป็นต้องกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมและเกิดการแทนที่หรือเปลี่ยนระดับวงโคจรของอิเล็กตรอนขึ้น พลังงานที่ใช้เพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมได้ต้องมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน พลังงานที่ใช้ทั้งหมดจะถ่ายเทให้อิเล็กตรอน และส่วนที่มากเกินไปจะเป็นพลังงานจลน์ที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม แต่ถ้าพลังงานที่ใช้มากเกินไปอาจทะลุผ่านและไม่ถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอน พลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมได้ เรียกว่า Absorption edge เนื่องจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอมมีหลายระดับวงโคจร คือ วงโคจร K, L และ M โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแต่ละวงโคจรจะมีพลังงานแตกต่างกันและเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้นิวเคลียส ทำให้ต้องใช้พลังงานแตกต่างกันเพื่อทำให้อิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรหลุดจากอะตอม ส่งผลให้ธาตุแต่ละชนิดมีค่า Absorption edge หลายค่า และค่า Absorption edge ของวงโคจร K มีค่าสูงสุด เช่นตารางที่ 2.1 ดังนั้นพลังงานที่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจร K หลุดจากอะตอมได้ย่อมสามารถทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรอื่นหลุดจากอะตอมได้เช่นกัน

จากรูปที่ 2.7 เห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะมีค่าลดลงตามพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงจะมีความสามารถในการทะลุผ่านมากกว่า ซึ่งมีผลต่อการถูกดูดกลืนของรังสีเอกซ์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลาง แต่อย่างไรก็ตามการลดลงที่เกิดขึ้นไม่ได้ต่อเนื่อง โดยส่วนที่เกิดความไม่ต่อเนื่องนั้นเป็นค่าพลังงานวิกฤตของการดูดกลืน หรือค่า absorption edges นั้นเอง

ตารางที่ 2.1 ค่า Absorption edges (keV) ที่วงโคจรต่างๆ ของธาตุ [8]

Elements	K edge	L _I edge	L _{II} edge	L _{III} edge	M _I edge	M _{II} edge	M _{III} edge	M _{IV} edge	M _V edge
Ag	25.509	3.809	3.527	3.351	0.734	0.619	0.589	0.390	0.384
Sn	29.182	4.463	4.156	3.927	0.895	0.772	0.721	0.506	0.498
Au	80.037	14.354	13.739	11.917	3.379	3.149	2.744	2.307	2.220
Pb	88.037	15.858	15.205	13.041	3.853	3.558	3.072	2.586	2.485



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำ

(แหล่งที่มา <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z79.html>)

2.4 การดูดกลืนรังสีเอกซ์ [7]

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปในตัวกลาง จะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางนั้นทำให้พลังงานบางส่วนถูกดูดกลืน (Absorption) กระจาย (Scatter) หรือเคลื่อนที่ผ่าน (Transmission) ส่งผลให้ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์ลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ที่ลดลงและความหนาของตัวกลางที่รังสีเอกซ์ผ่านเป็นไปตามสมการ(2.2) ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (2.2)$$

เมื่อ I คือความเข้มรังสีเอกซ์หลังผ่านเข้าไปในตัวกลาง

I_0 คือความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนผ่านเข้าไปในตัวกลาง

μ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

และ T คือความหนาของตัวกลางที่รังสีเอกซ์ผ่านเข้าไป

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและพลังงานของรังสีเอกซ์ โดยมีความลดลงตามพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้น เพราะรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงจะมีความสามารถในการทะลุผ่านมากกว่า ความหนาหรือระยะที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์

2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ มี 4 แบบ คือ

2.4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

เป็นค่าที่แสดงถึงการถูกดูดกลืนพลังงานต่อหน่วยความหนาและต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น cm^{-1}

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{T} \quad (2.3)$$

2.4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล

เป็นค่าที่แสดงถึงการถูกดูดกลืนพลังงานต่อหน่วยมวลและต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น cm^2/g

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (2.4)$$

2.4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงอะตอม

เป็นค่าที่แสดงถึงการดูดกลืนพลังงานต่อหน่วยอะตอมและต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น cm^2/atom

$$\mu_a = \frac{\mu A}{\rho N} = \frac{\mu}{N} \quad (2.5)$$

2.4.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงโมลาร์

เป็นค่าที่แสดงถึงการดูดกลืนพลังงานต่อหน่วยโมลและต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น cm^2/mol

$$\mu_{mol} = (\mu/\rho)A \quad (2.6)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 4 แบบ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\mu = \mu_m \rho = \mu_a \rho (N/A) = \mu_{mol} \rho / A \quad (2.7)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นที่มีหน่วยเป็น g/cm^3
 A คือน้ำหนักอะตอมมีหน่วยเป็น g/mol
 N คือเลขอาโวกาโดรมีค่าเท่ากับ $6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$
 และ N/A คือจำนวนอะตอมต่อกรัม

โดยทั่วไปแล้วงานด้านรังสีเอกซ์นิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล หรือ μ/ρ เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับเลขอะตอมซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด อีกทั้งค่า μ/ρ สำหรับสารประกอบ สารละลายหรือสารเนื้อผสมสามารถหาได้จากการคำนวณจากส่วนประกอบของสารนั้น

2.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารเนื้อผสม

กำหนดให้การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารเนื้อผสมหรือสารละลายที่ประกอบด้วยธาตุ 3 ชนิดคือ ธาตุ A , ธาตุ B และธาตุ C ในสัดส่วนปริมาณของธาตุต่างๆ ในสารคือ W_A , W_B และ W_C ตามลำดับ ทำได้ดังนี้

$$(\mu/\rho)_{ABC} = W_A(\mu/\rho)_A + W_B(\mu/\rho)_B + W_C(\mu/\rho)_C \quad (2.8)$$

หรือเมื่อมีธาตุหลายชนิดเป็นสารประกอบ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลได้ดังนี้

$$(\mu/\rho)_{ABC\dots} = \sum W_i(\mu/\rho)_i \quad (2.9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่พลังงานต่างๆ สามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของธาตุและพลังงานต่างๆ เช่นกราฟในรูปที่ 2.7 เป็นต้น โดยทำการเลือกค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่ต้องการมา 2 ค่า ค่าแรกเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่พลังงานสูงกว่าและอีกค่าคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่พลังงานต่ำกว่าพลังงานที่ต้องการคำนวณ จากนั้นคำนวณดังสมการที่ (2.10)

$$(\mu/\rho) = (\mu/\rho)_L + \frac{AB}{C} \quad (2.10)$$

เมื่อ (μ/ρ) คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่พลังงานที่ต้องการ
 $(\mu/\rho)_L$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่พลังงานที่ต่ำกว่าพลังงานที่ต้องการ
 A คือผลต่างระหว่างพลังงานที่ต้องการและพลังงานต่ำกว่าที่เลือกใช้
 B คือผลต่างระหว่างค่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุที่พลังงานสูงและต่ำ
 และ C คือผลต่างระหว่างพลังงานสูงและต่ำที่ใกล้เคียงกับพลังงานที่ต้องการ

2.5 Neutron Activation Analysis (NAA) [9]

การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอนเป็นวิธีวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุโดยการนำตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าซึ่งเป็นไอโซโทปของธาตุที่เสถียรไปกระตุ้นให้กลายเป็นไอโซโทปรังสีโดยการอาบนิวตรอน จากนั้นไอโซโทปรังสีจะสลายตัวและปลดปล่อยรังสีอัลฟา รังสีบีตา หรือรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ และมีค่าครึ่งชีวิตที่เป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่างออกมา โดยทั่วไปจะวัดพลังงานของรังสีแกมมาเนื่องจากสะดวกและมีความแม่นยำสูง โดยใช้ระบบวัดรังสีที่มีกำลังแยกสูง เช่นหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาพลังงานของนิวตรอนที่ใช้ในการอาบตัวอย่าง จะสามารถแบ่งชนิดของการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอนได้เป็น 3 ชนิดคือ Thermal Neutron Activation Analysis (TNAA) พลังงานของนิวตรอนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.04 eV Epithermal Neutron Activation Analysis (ENAA) พลังงาน

ของนิวตรอนมีค่าระหว่าง 0.1-1 eV และ Fast Neutron Activation Analysis (FNAA) พลังงานของนิวตรอนมีค่าสูงกว่า 0.5 MeV ขึ้นไป

สามารถคำนวณหาปริมาณธาตุแต่ละชนิดในสารตัวอย่างได้โดยการอบสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ทราบชนิดของธาตุและปริมาณในลักษณะเดียวกัน จากนั้นนำค่านับวัดมาคำนวณได้ตามสมการ (2.11)

$$\frac{R_{std}}{R_{sam}} = \frac{W_{std}(e^{-\lambda T})_{std}}{W_{sam}(e^{-\lambda T})_{sam}} \quad (2.11)$$

เมื่อ R_{std} คือค่านับวัดของสารมาตรฐาน

R_{sam} คือค่านับวัดของสารตัวอย่าง

W_{std} คือมวลของสารมาตรฐาน

W_{sam} คือมวลของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ในสารตัวอย่าง

T คือเวลาสลายตัว (decay time) ของสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง

เมื่อคำนวณมวลของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ในสารตัวอย่างได้แล้วสามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของธาตุนั้นในสารตัวอย่างได้ ข้อดีของการวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอนคือสามารถวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย (trace element) ในสารตัวอย่างที่มีลักษณะต่างๆ ได้ เนื่องจากมีความไวสูงมาก นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิด

2.5 แผ่นทองคำเปลว

คุณภาพของทองคำจะคิดจากความบริสุทธิ์และการเจือปนด้วยโลหะหรือสารอื่น โดยกำหนดเป็นสากลให้ทอง 24K (24กะรัต) เป็นทองคำที่บริสุทธิ์มากที่สุดคือไม่ถูกเจือปนด้วยสารอื่น ในประเทศไทยใช้มาตรฐานความบริสุทธิ์ของทองคำที่ 96.5% เทียบเป็นกะรัตได้ประมาณ 23.16K นั่นคือประกอบด้วยทองคำ 23.16 ส่วน และโลหะอื่นเจือปนอยู่ 0.84 ส่วน ทองคำที่นำมาผลิตเป็นแผ่นทองคำเปลวมี 2 ชนิดคือ ทองบริสุทธิ์ 96.5% และทองบริสุทธิ์ 99.9%

ขั้นตอนการผลิตทองคำเปลวเริ่มต้นจากการนำทองคำแท่งไปรีดให้มีความหนาประมาณ 4-5 ไมครอน แล้วตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำไปวางซ้อนด้วยกระดาษแก้วและหุ้มด้วยหนังวัวแล้วนำไปตีด้วยค้อนทองเหลืองนานประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นเปลี่ยนไปใส่ใน

กระดาษที่เรียกว่าฝักและนำไปตีต่ออีกประมาณ 6-7 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นทองคำเปลวที่ถูกตีจนบางมาเทใส่กระดาษสาเพื่อตัดให้มีขนาดพอเหมาะตามต้องการ ทองคำเปลวที่ได้จะมี 2 แบบ คือ ทองคัตเป็นทองที่ตัดให้เต็มแผ่นในครั้งเดียว และทองต่อเป็นทองที่นำแผ่นทองคำเปลวขนาดเล็กหลายๆ แผ่นมาต่อกันให้เต็มแผ่น แผ่นทองคำเปลวจะถูกบรรจุลงในกระดาษเป็นเล่มบรรจุรวมกันเป็นมัด มัดละ 100 เล่มบรรจุ เนื่องจากแผ่นทองคำเปลวถูกตีด้วยมือทำให้แต่ละแผ่นมีความหนาไม่เท่ากัน



บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ในงานวิจัย

3.1.1 แผ่นทองคำเปลว จำนวน 8 ชุด

3.1.2 โลหะ Backing material ทำจากตะกั่ว

3.1.3 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์จาก Am-241

3.1.4 หัววัดรังสีเอกซ์ CdTe ขนาด 5x5 ตารางมิลลิเมตร

3.1.5 อุปกรณ์จ่ายไฟศักดาสูง (High voltage power supply) และภาคขยายสัญญาณ (Amplifier) รุ่น PX2T-CdTL

3.1.6 ขาดั่ง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 หัววัดรังสี CdTL ขนาด 5x5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์จ่ายไฟศักดาสูง (High voltage power supply) และภาคขยายสัญญาณ (Amplifier) รุ่น PX2T-CdTL

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลงานวิจัยบางส่วน

3.2.1 ทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวภายในเล่มบรรจุ

3.2.1.1 ศึกษาค่า Absorption edge ของทองคำ เพื่อเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์และโลหะเพื่อใช้ทำ Backing material

เมื่อพิจารณาค่า Absorption edge (L edges) ของทองคำจากตารางที่ 3.1 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 11-14 keV ดังนั้นต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมคือ Am-241 ซึ่งให้รังสีเอกซ์พลังงาน 11-22 keV

ตารางที่ 3.1 ค่า Absorption edge ของทองคำ [8]

element	Absorption edge (keV)								
	K Edge	L _I Edge	L _{II} Edge	L _{III} Edge	M _I Edge	M _{II} Edge	M _{III} Edge	M _{IV} Edge	M _V Edge
Au	80.768	14.354	13.731	11.917	3.379	3.149	2.744	2.307	2.220
Ag	25.509	3.809	3.527	3.351	0.734	0.619	0.589	0.390	0.384

โลหะ Backing material จะถูกกระตุ้นให้ปลดปล่อยรังสีเอกซ์และส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวเพื่อนำค่าความเข้มส่งผ่านไปคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลว รังสีเอกซ์จาก Backing material จะต้องถูกกระตุ้นได้จากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ Am-241 และสะดวกในการใช้งานพบว่าตะกั่วเป็นโลหะที่เหมาะสมในการใช้เป็น Backing material ซึ่งจะเลือกใช้พลังงานของรังสีเอกซ์จากตะกั่วที่ 10.5 และ 12.6 keV ในการคำนวณ

3.2.2 พัฒนาริธีวัดความบริสุทธิ์เพื่อจำแนกระดับคุณภาพของแผ่นทองคำเปลว ได้แก่ แผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นทองคำเปลวบริสุทธิ์ 96.5%

3.2.2.1 วิธีวัดความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว

ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวสามารถพิจารณาได้จากปริมาณของทองคำและปริมาณของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว เมื่อจัดการวิจัยดังรูปที่ 3.4 เพื่อวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว จากนั้นนำความเข้มของพลังงานต่างๆ มาหาอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากทองคำและจากธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวเพื่อวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวได้

เมื่อจัดการวิจัยเพื่อวัดความหนาของแผ่นทองคำเปลวโดยใช้การส่งผ่านรังสีเอกซ์จาก ตะกั่วเข้าไปในแผ่นทองคำเปลวสามารถวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวได้เช่นกัน โดย พิจารณาตามสมการ (3.1) ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho T} \quad (3.1)$$

เนื่องจากพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ถูกกระตุ้นให้ส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุ เมื่อ แทนค่าลงในสมการ (3.1) จะได้

$$I_{g+p} = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_g \rho_g T_g - \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_p \rho_p T_p} \quad (3.2)$$

เมื่อ I_0	คือความเข้มของพลังงานก่อนผ่านแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุ
I_{g+p}	คือความเข้มของพลังงานหลังผ่านแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุ
$(\mu/\rho)_g$	คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลว
$(\mu/\rho)_p$	คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว
ρ_g	คือความหนาแน่นของแผ่นทองคำเปลว
ρ_p	คือความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว
T_g	คือความหนาของแผ่นทองคำเปลว
และ T_p	คือความหนาของกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว

โดยสามารถหาค่า $(\mu/\rho)_p$ ได้โดยการนำแผ่นทองคำเปลวออกจากเล่มบรรจุ แล้ววัดความเข้มของ พลังงานที่ผ่านกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุ ดังนี้

$$I_p = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_p \rho_p T_p} \quad (3.3)$$

เมื่อ I_p คือความเข้มของพลังงานที่ผ่านกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุ

จากนั้นหารสมการ (3.2) ด้วยสมการ (3.3) จะได้

$$\frac{I_{g+p}}{I_p} = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_g \rho_g T_g} \quad (3.4)$$

ซึ่ง I_0 ในสมการ (3.2) และ (3.3) เป็นค่าเดียวกัน

จากนั้นจัดรูปสมการ (3.4) เพื่อแทนค่าความเข้มจากพลังงาน 12.6 และ 10.5 keV ตามลำดับจะได้

$$\ln(I_p/I_{g+p})_{12.6keV} = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_g \rho_g T_g \right]_{12.6keV} \quad (3.5)$$

และ

$$\ln(I_p/I_{g+p})_{10.5keV} = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_g \rho_g T_g \right]_{10.5keV} \quad (3.6)$$

จากนั้นหารสมการ (3.5) ด้วยสมการ (3.6) จะได้

$$\frac{\ln(I_p/I_{g+p})_{12.6keV}}{\ln(I_p/I_{g+p})_{10.5keV}} = \frac{(\mu/\rho)_g 12.6keV}{(\mu/\rho)_g 10.5keV} \quad (3.7)$$

เมื่อ ρ_g และ T_g ในสมการ (3.5) และ (3.6) เท่ากัน เพราะเป็นแผ่นทองคำเปลวเดียวกัน

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV ทางขวามือของสมการ (3.7) พบว่าเป็นค่าที่สามารถหาได้จากการคำนวณ โดยคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV ที่มีทองคำเป็นส่วนประกอบในปริมาณต่างๆ กันแล้วสร้างเป็น Calibration curve เพื่อใช้เปรียบเทียบและคำนวณหาปริมาณของทองคำที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวได้

3.2.2.2 สร้าง Calibration curve เพื่อใช้เปรียบเทียบและคำนวณหาปริมาณของทองคำที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว

เมื่อทราบค่าอัตราส่วนของน้ำหนัก (Weight fraction; W) ของธาตุแต่ละชนิดที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวได้จากสมการ (3.8)

$$(\mu/\rho) = \sum W_i (\mu/\rho)_i \quad (3.8)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุแต่ละชนิดที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวคำนวณได้จากตารางและกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุนั้นๆ ดังนี้ ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำที่พลังงานใกล้เคียง 10.5 และ 12.6 keV

Energy (keV)	μ/ρ
10	118.1
11.9187	75.82
11.9187	187
12.794	154.6

จากตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำที่พลังงาน 10.5 keV จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำที่พลังงาน 10 และ 11.9187 keV เมื่อแทนค่าในสมการ (2.9) จะได้

$$(\mu/\rho)_{10.5keV} = \left[(10.5 - 10) \frac{(75 - 118.1)}{(11.9 - 10)} \right] + 118.1 \quad (3.9)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำที่พลังงาน 12.6 keV จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำที่พลังงาน 11.9187 และ 12.794 keV เมื่อแทนค่าในสมการ (2.9) จะได้

$$(\mu/\rho)_{12.6keV} = \left[(12.6 - 11.9) \frac{(154.6 - 187)}{(12.794 - 11.9187)} \right] + 187 \quad (3.10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวสามารถวิเคราะห์ได้จากตารางและกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุนั้นๆ เช่นเดียวกับทองคำ จากการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแผ่นทองคำเปลวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์พบว่า มีเงินเป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว จากนั้นแทนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำและเงินเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำเปลว ค่าตามสมการ (3.8)

เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำเปลวที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้ว นำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ของแต่ละความ

เข้มข้นมาเทียบอัตราส่วนกันดังฝั่งขวามือของสมการ (3.7) แล้วนำไปสร้างกราฟ จะได้ Calibration curve เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าทางฝั่งซ้ายมือซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองและคำนวณหาความเข้มข้นของทองคำได้

3.2.2.3 วิธีวัดความหนาของแผ่นทองคำเปลว

เมื่อทราบปริมาณของทองคำที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวแล้ว จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV เพื่อคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวได้จากสมการ (3.11) ซึ่งได้จากการจัดรูปสมการ (3.4) ดังนี้

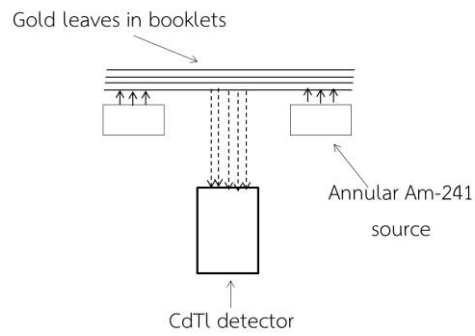
$$T_g = \frac{\ln(I_p/I_{g+p})}{(\mu/\rho)_g \rho_g} \quad (3.11)$$

จากนั้นแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (3.11) เพื่อคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวได้

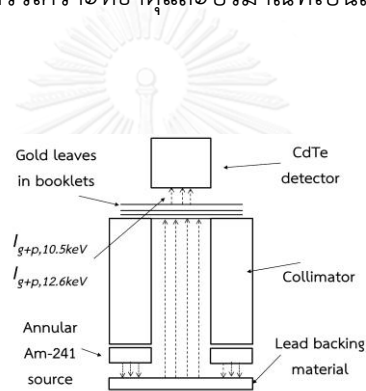
3.2.3 ทดลองวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับวิธีอื่น

3.2.3.1 วัดความหนาและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.4 เพื่อทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว และหาอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากทองคำและจากธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว จากนั้นจัดอุปกรณ์เพื่อวัดค่าความเข้มของพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV โดยแยกวัดค่าความเข้มของพลังงานที่ผ่านแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุดังรูปที่ 3.5 และวัดค่าความเข้มของพลังงานที่ผ่านกระดาษที่ใช้ทำเล่มบรรจุดังรูปที่ 3.6 จากนั้นนำค่าความเข้มที่ได้แทนในสมการ (3.7) จากนั้นนำค่าความเข้มต่างๆ ที่ได้ไปวิเคราะห์และคำนวณดังข้อ 3.2.2

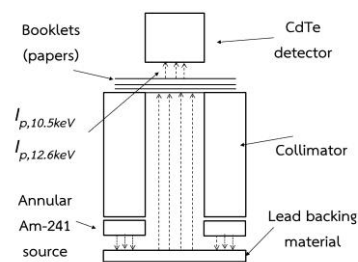


รูปที่ 3.4 จัดอุปกรณ์เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว



รูปที่ 3.5 จัดอุปกรณ์เพื่อวัดความเข้มของพลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุ

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.6 จัดอุปกรณ์วัดความเข้มของพลังงาน 10.5 และ 12.6 ที่ผ่านกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุ

3.2.3.2 เปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวกับวิธี NAA และ ICP

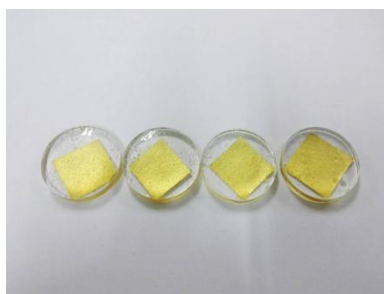
นำตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวและทองคำเปลวมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นไปกระตุ้นให้กลายเป็นไอโซโทปรังสีโดยอาศัยนิวตรอนเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของทองคำในแผ่นทองคำเปลว โดยทำการเตรียมการวัดดังรูปที่ 3.7 จากนั้นนำตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวไปวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Couple Plasma)

3.2.3.3 เปรียบเทียบความหนาของตัวอย่างทองคำเปลวกับความหนาที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

นำตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวเดียวกันนี้ไปวัดความหนาโดยการถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นทองคำเปลวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เนื่องจากตัวอย่างแผ่นทองคำที่ใช้ในงานวิจัยมีความบางมากจึงไม่สามารถส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้โดยตรง ต้องทำการฝังตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวลงในเรซินก่อนดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยวิธี NAA

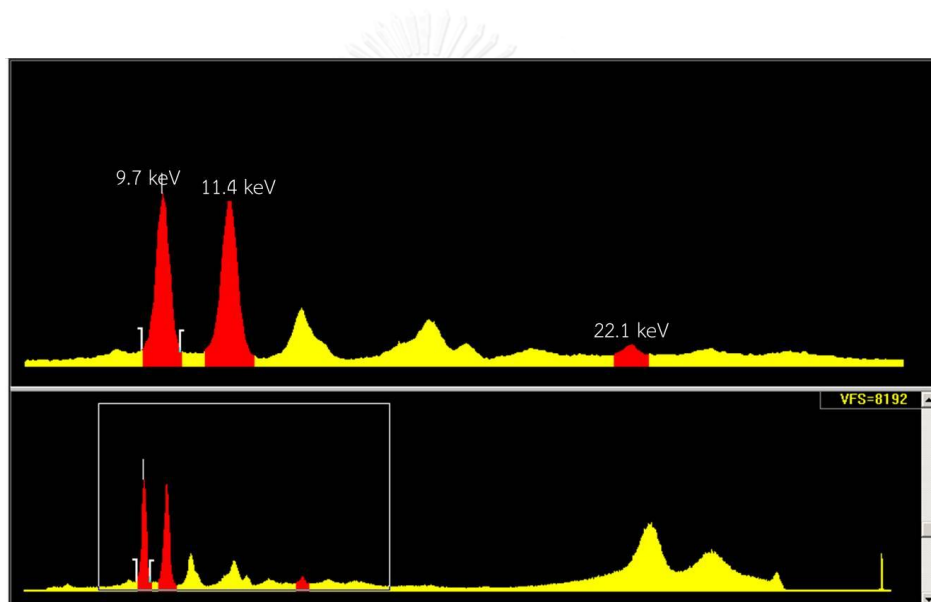


รูปที่ 3.8 การฝังตัวอย่างในเรซินเพื่อถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

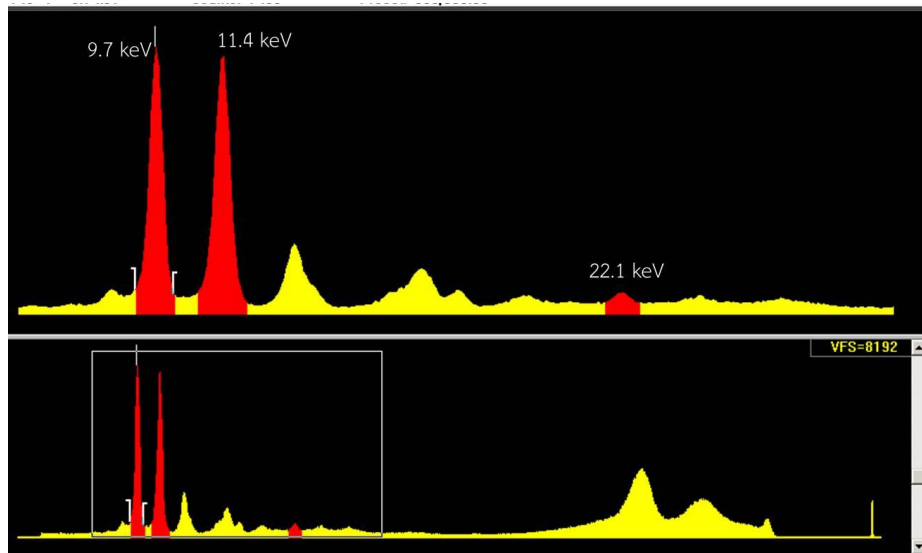
บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 วิเคราะห์ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

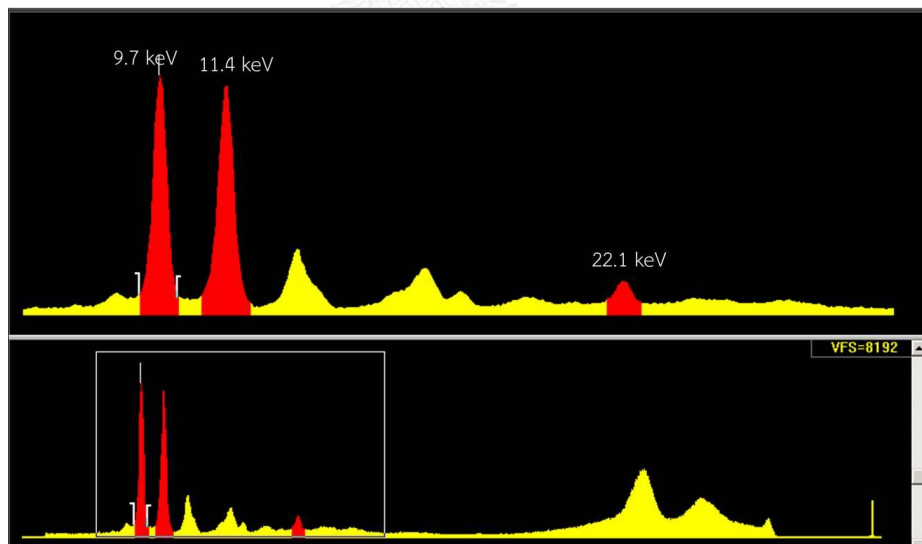
ผลการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างได้สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงานต่างๆ ดังนี้



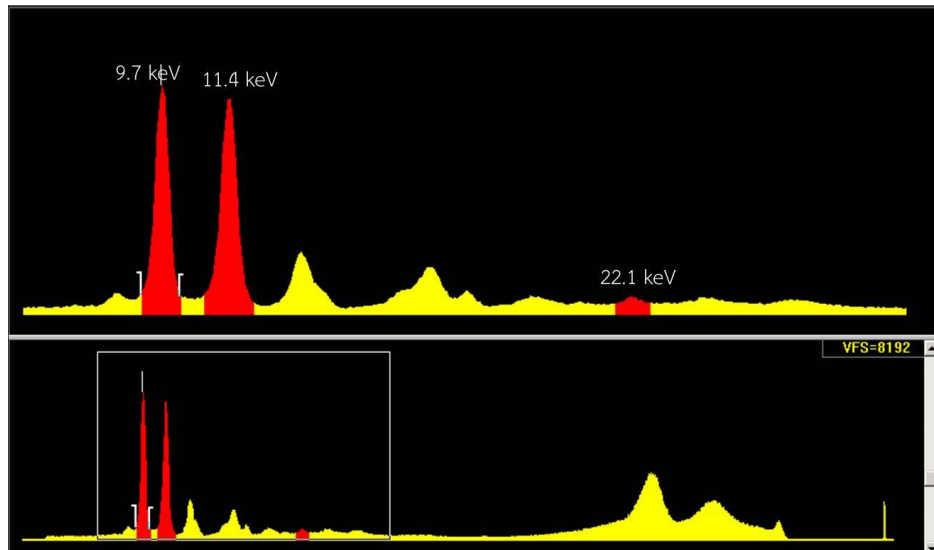
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว A



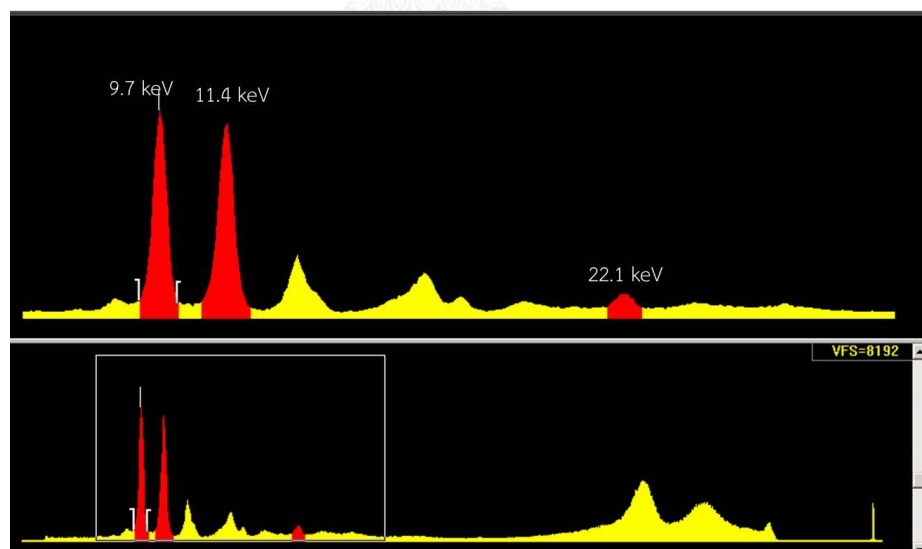
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว B



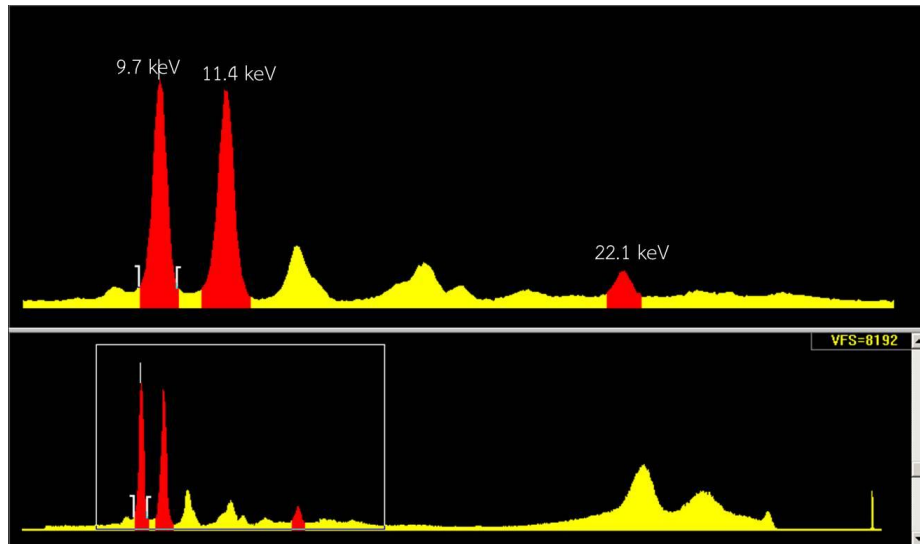
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว C



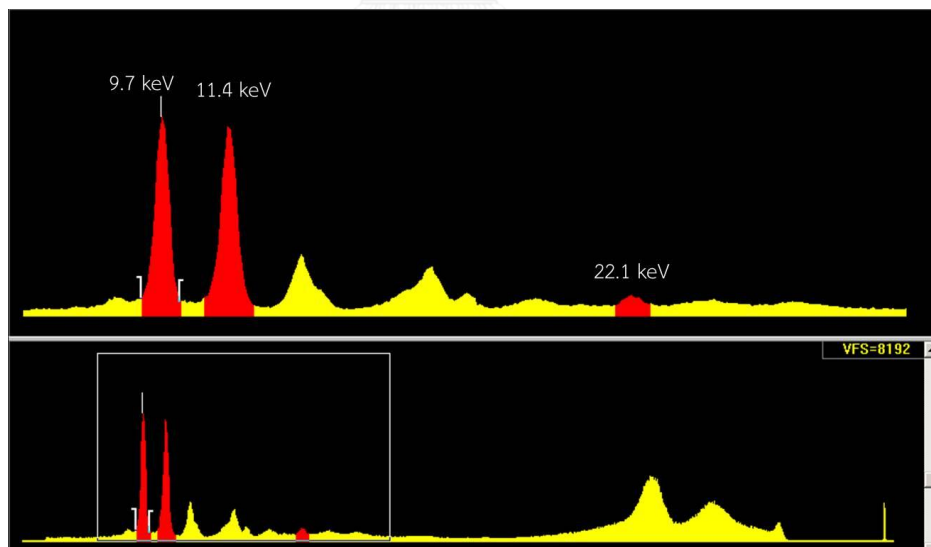
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว D



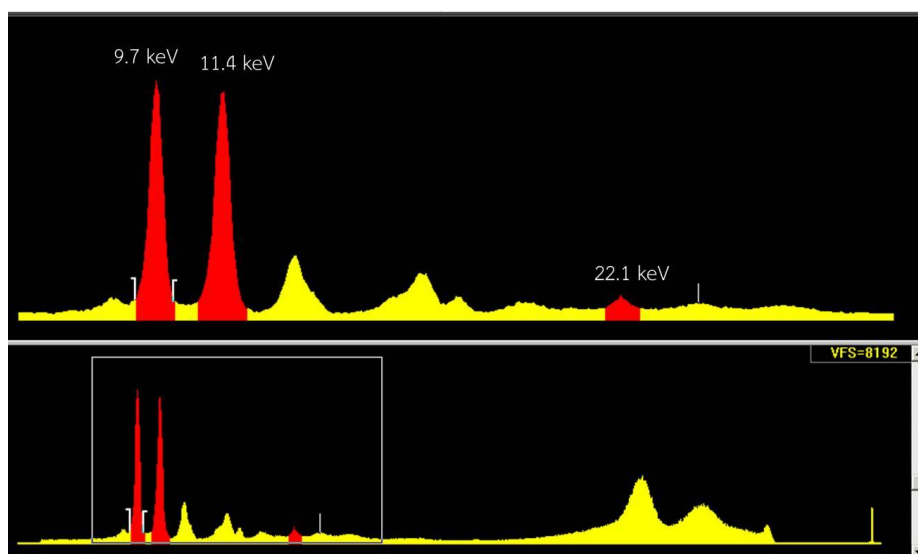
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว E



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว F



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว G



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากแผ่นทองคำเปลว H

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของพลังงานต่างๆ จากแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่าง พบว่าธาตุที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลวคือทองคำและเงินดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พลังงานต่างๆ ของธาตุที่เป็นส่วนผสมในแผ่นทองคำเปลว

Energy (keV)	Elements
9.7	Au ($L_{\alpha 1}$)
11.4	Au ($L_{\beta 1}$)
22.1	Ag (K_{α})

เนื่องจากความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลววิเคราะห์ได้จากปริมาณของทองคำและเงินที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว โดยความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวจะแปรผันตามปริมาณทองคำที่มากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 9.7 และ 11.4 keV จากทองคำและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 22.1 จากเงินของแต่ละตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวดังตารางที่ 4.2 มาคำนวณสัดส่วนระหว่างทองคำต่อเงินจะสามารถวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวแต่ละตัวอย่างเปรียบเทียบกับแผ่นทองคำเปลวมาตรฐาน 96.5% ได้ดังตารางที่ 4.3 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงานต่างๆ ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว

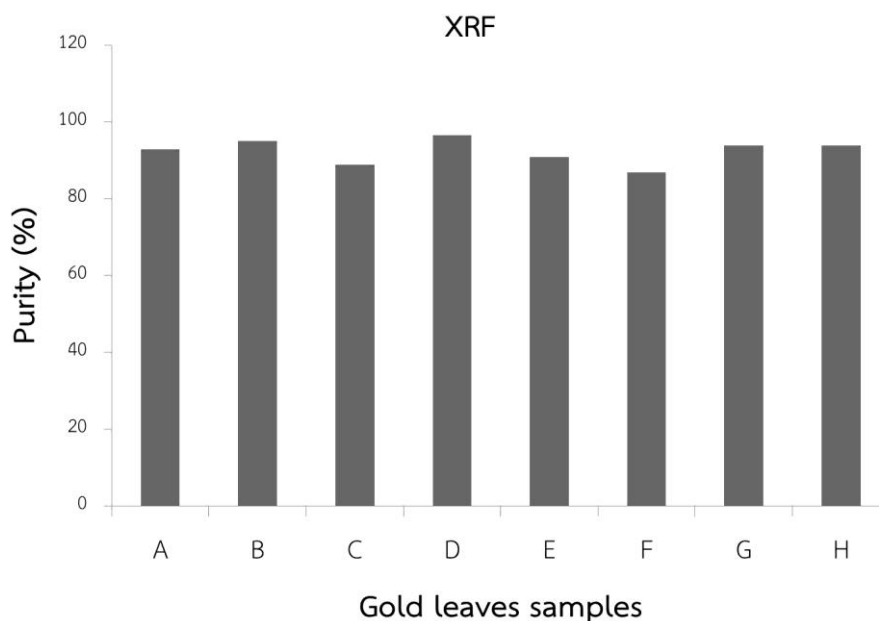
Sample	Intensity		
	From 9.7 keV	From 11.4 keV	From 22.1 keV
A	28856	33791	2015
B	45991	52457	2143
C	41773	47021	4660
D	39379	44238	1258
E	36106	40075	3207
F	39661	44794	5311
G	34049	38622	2012
H	41270	46452	2368

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากทองคำและจากเงินที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว

Sample	Au/Ag	Purity (%)
A	31.10	92.81
B	45.94	95.02
C	19.05	88.77
D	66.45	96.5
E	23.75	90.79
F	15.90	86.84
G	36.12	93.74
H	37.04	93.89

จากนั้นสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวแต่ละตัวอย่าง ได้ดังรูปที่

4.9

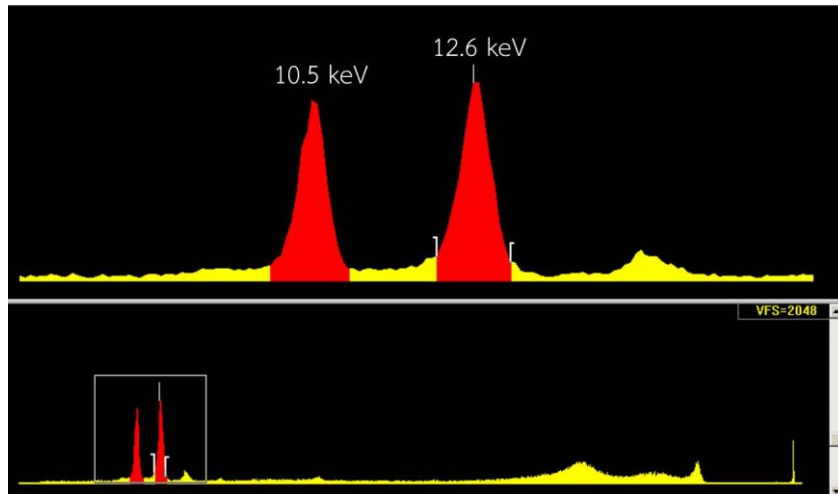


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว
จากการวัดการเรืองรังสีเอกซ์

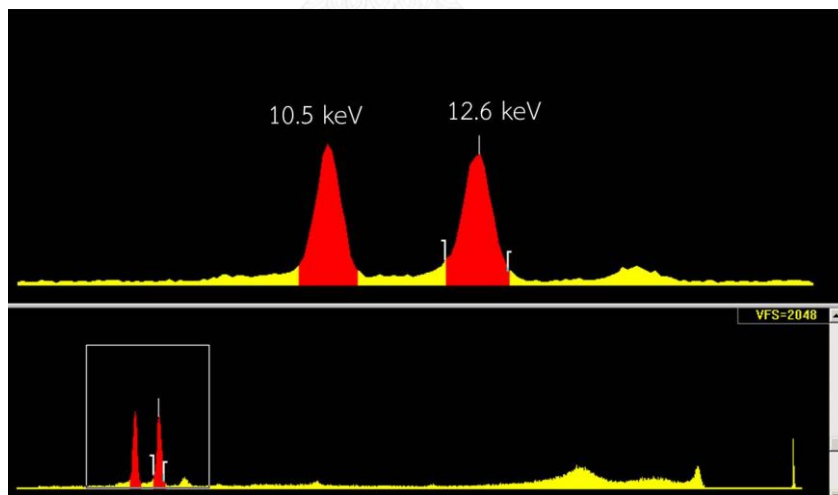
4.2 การส่งผ่านรังสีเอกซ์จากตะกั่วเข้าไปในแผ่นทองคำเปลวเพื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลว

4.2.1 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุก

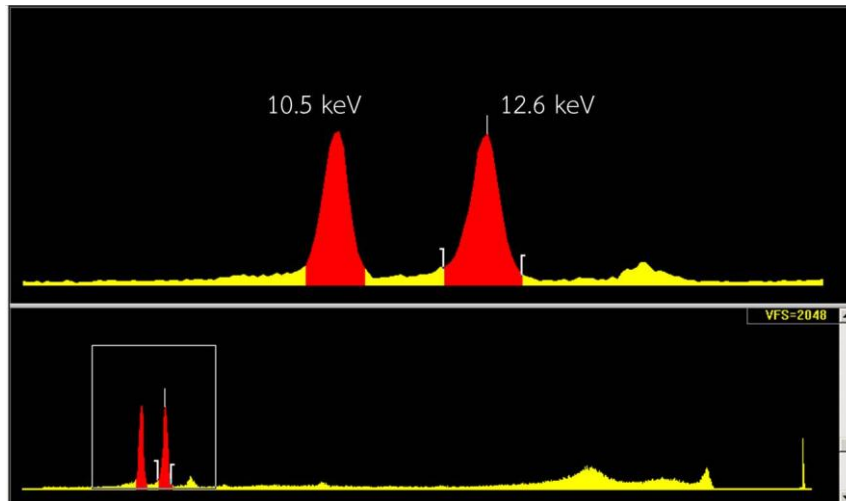
ทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ซึ่งถูกกระตุ้นและปลดปล่อยมาจากตะกั่วแล้วส่งผ่านตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างทำการวัดครั้งละ 15 เล่มบรรจุก ได้ลักษณะสเปกตรัมและความเข้มดังนี้



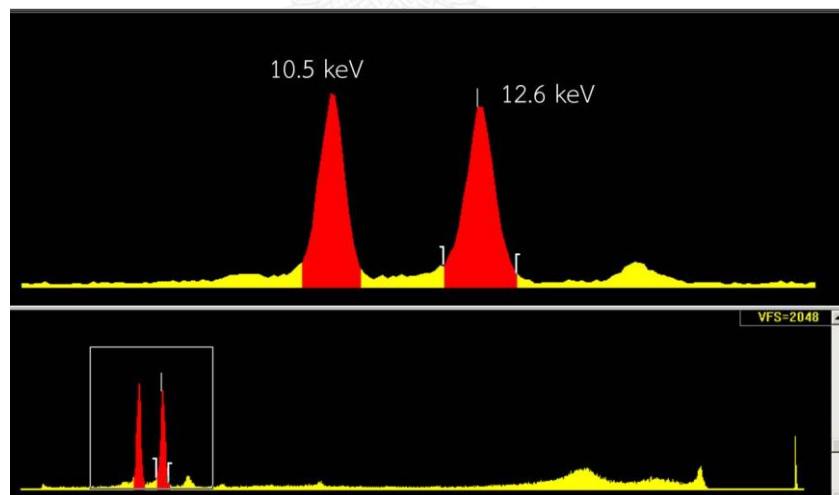
รูปที่ 4.10 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว A ที่อยู่ในเล่มบรรจุกุ



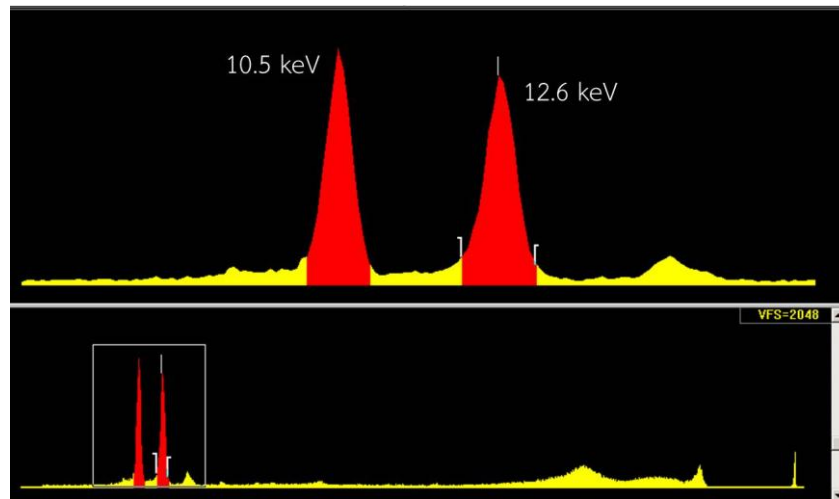
รูปที่ 4.11 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว B ที่อยู่ในเล่มบรรจุกุ



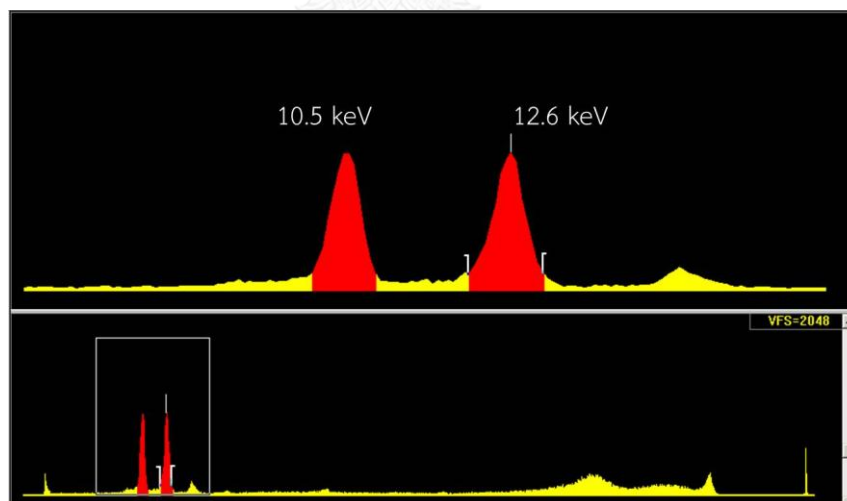
รูปที่ 4.12 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว C ที่อยู่ในเล่มบรรจุ



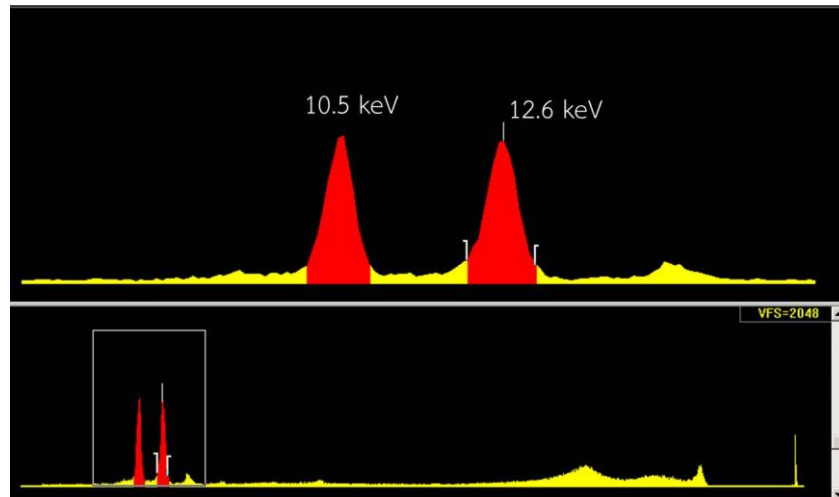
รูปที่ 4.13 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว D ที่อยู่ในเล่มบรรจุ



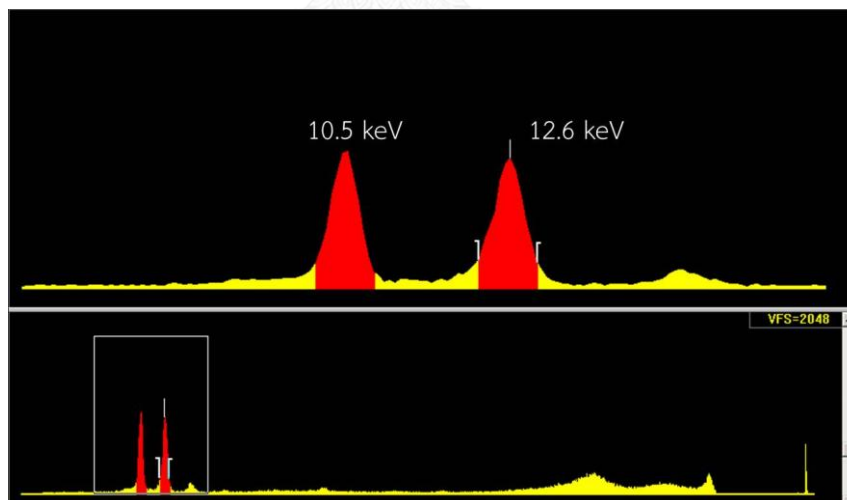
รูปที่ 4.14 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว E ที่อยู่ในเล่มบรรจุ



รูปที่ 4.15 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว F ที่อยู่ในเล่มบรรจุ



รูปที่ 4.16 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว G ที่อยู่ในเล่มบรรจุ



รูปที่ 4.17 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านแผ่นทองคำเปลว H ที่อยู่ในเล่มบรรจุ

โดยวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวได้ผลดังตารางที่ 4.4

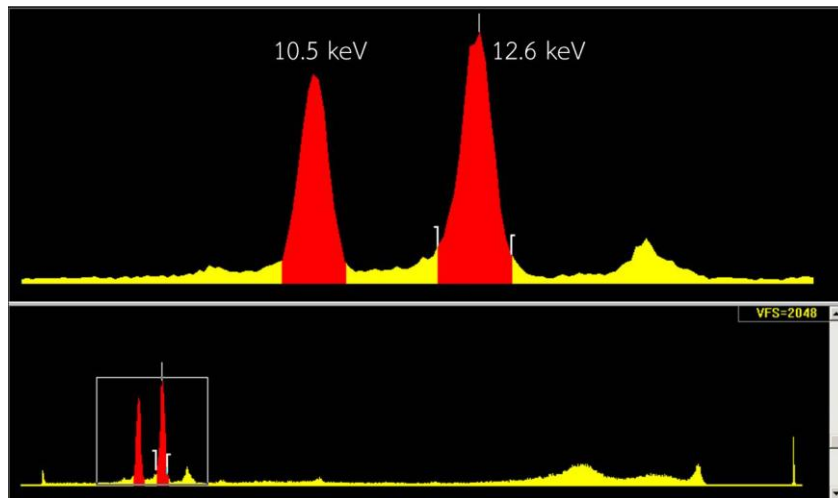
ตารางที่ 4.4 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ส่งผ่านแผ่นทองคำเปลว

Sample	$I_{g+p,10.5keV}$	$I_{g+p,12.6keV}$
A	11752	12864
B	9516	9826
C	6434	6440
D	6221	6365
E	6705	6592
F	6877	7289
G	6369	6740
H	6329	6883

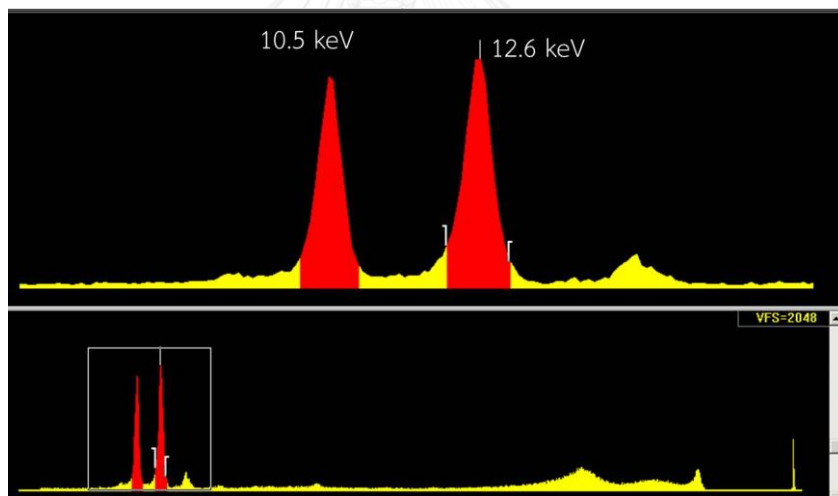
จากนั้นจึงวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านกระดาษที่ใช้เป็นเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลวต่อไป

4.2.2 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านกระดาษที่ใช้ทำเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว

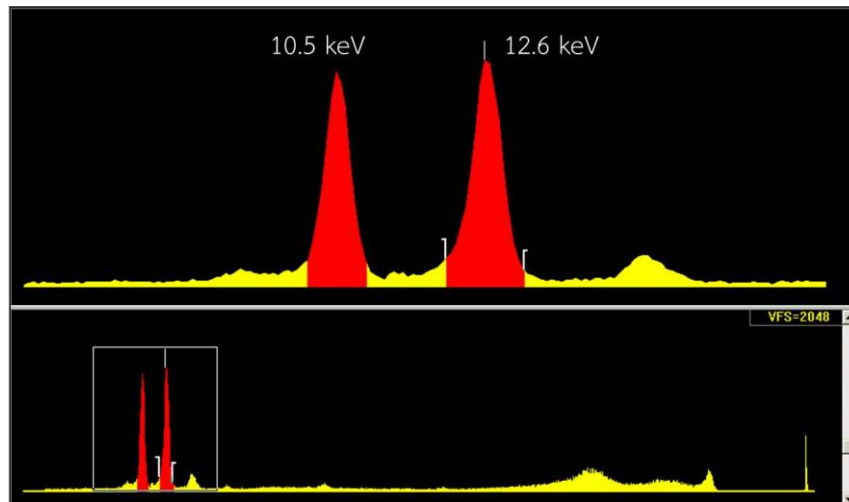
ทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ซึ่งถูกกระตุ้นและปลดปล่อยมาจากตะกั่วแล้วส่งผ่านเล่มบรรจุทองคำเปลวจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างทำการวัดครั้งละ 15 เล่มบรรจุ ได้ลักษณะสเปกตรัมและความเข้มได้ดังนี้



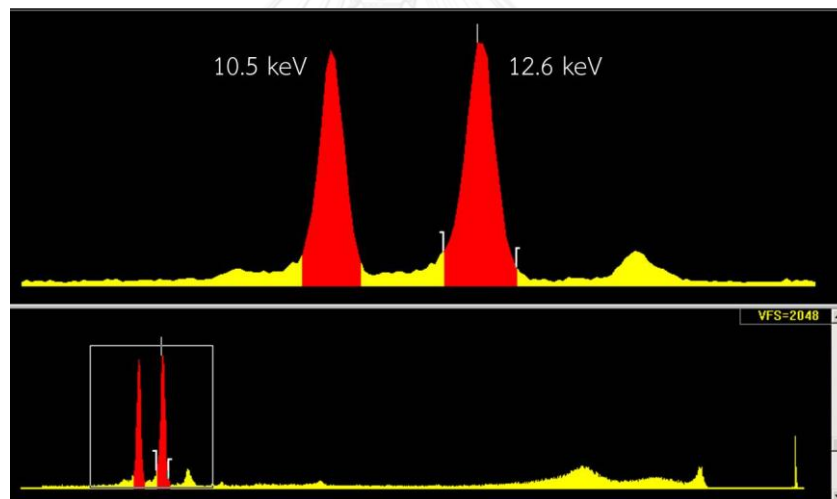
รูปที่ 4.18 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่นทองคำเปลว A



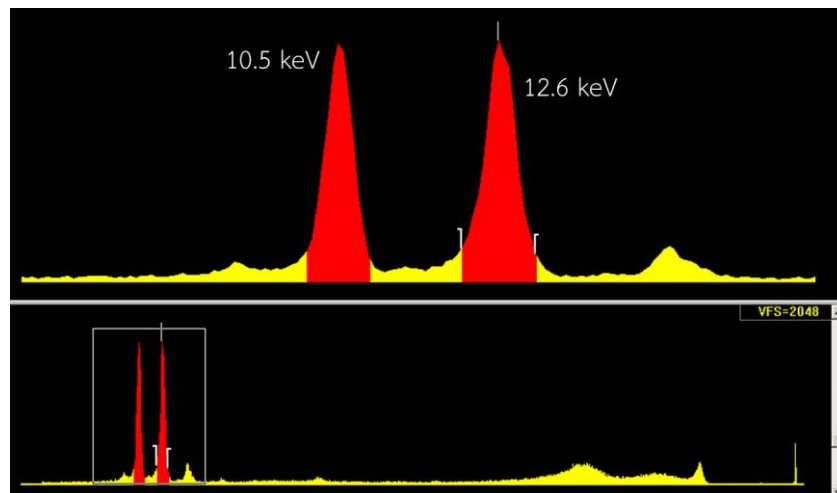
รูปที่ 4.19 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล็มบรรจุแผ่นทองคำเปลว B



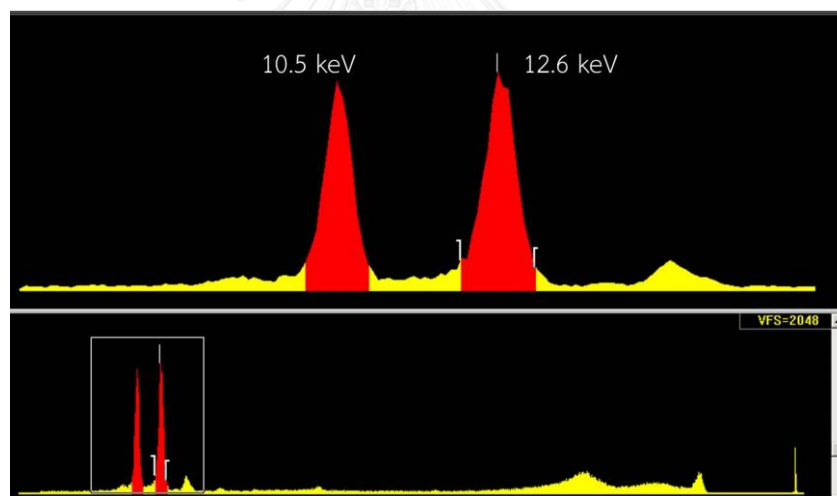
รูปที่ 4.20 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว C



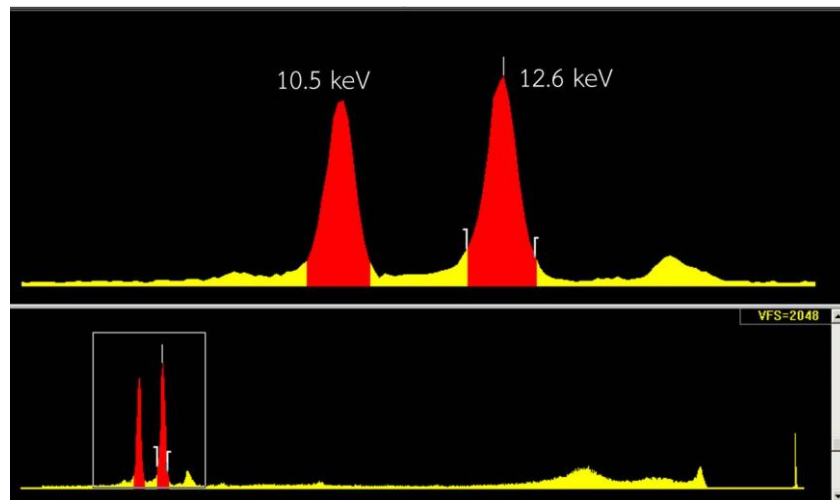
รูปที่ 4.21 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว D



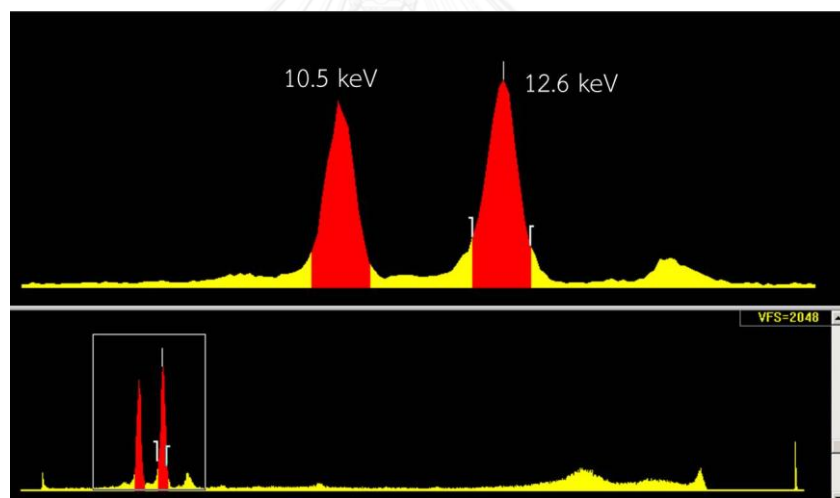
รูปที่ 4.22 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล็มบรรจู่แผ่นทองคำเปลว E



รูปที่ 4.23 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล็มบรรจู่แผ่นทองคำเปลว F



รูปที่ 4.24 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว G



รูปที่ 4.25 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV
เมื่อผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว H

โดยวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ผ่านเล่มบรรจุแผ่นทองคำเปลว
ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ส่งผ่านเล่มบรรจุแผ่น
ทองคำเปลว

Sample	$I_{p,10.5keV}$	$I_{p,12.6keV}$
A	12742	14502
B	12275	14235
C	8979	10500
D	8506	10239
E	9137	10346
F	9055	10914
G	8196	9688
H	8415	10579

จากนั้นนำผลที่ได้ในตารางที่ 4.4 และ 4.5 มาคำนวณหาอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิง
มวลของแผ่นทองคำเปลวต่อไป

4.2.3 อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ได้จากการคำนวณความเข้มของรังสีเอกซ์ส่งผ่าน

เมื่อนำค่าความเข้มของรังสีเอกซ์จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 มาคำนวณตามสมการที่ 3.5, 3.6
และ 3.7 จะได้ผลดังตารางที่ 4.6 สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน
เชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV หรือค่า $\frac{(\mu/\rho)_{g,12.6keV}}{(\mu/\rho)_{g,10.5keV}}$ ได้จากการหา

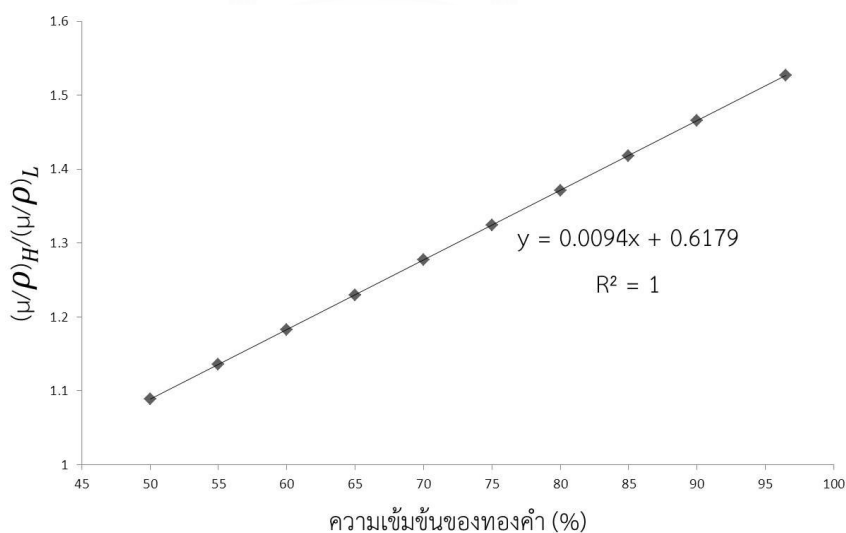
$$\text{ค่า} \frac{\ln(I_p/I_{g+p})_{12.6keV}}{\ln(I_p/I_{g+p})_{10.5keV}}$$

ตารางที่ 4.6 การหาค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV

Sample	$\ln(I_p/I_{g+p})_{12.6keV}$	$\ln(I_p/I_{g+p})_{10.5keV}$	$\frac{\ln(I_p/I_{g+p})_{12.6keV}}{\ln(I_p/I_{g+p})_{10.5keV}} = \frac{(\mu/\rho)_{g,12.6keV}}{(\mu/\rho)_{g,10.5keV}}$
A	0.120	0.081	1.482
B	0.371	0.255	1.456
C	0.489	0.333	1.467
D	0.475	0.313	1.519
E	0.451	0.309	1.456
F	0.404	0.275	1.467
G	0.363	0.252	1.439
H	0.430	0.285	1.509

4.2.4 กราฟ Calibration curve ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว

เมื่อคำนวณค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ของแผ่นทองคำเปลวที่ความบริสุทธิ์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 แล้วนำมาสร้างกราฟ Calibration curve ได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟ Calibration curve

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวแต่ละตัวอย่างที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ของแผ่นทองคำเปลวที่ความบริสุทธิ์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ

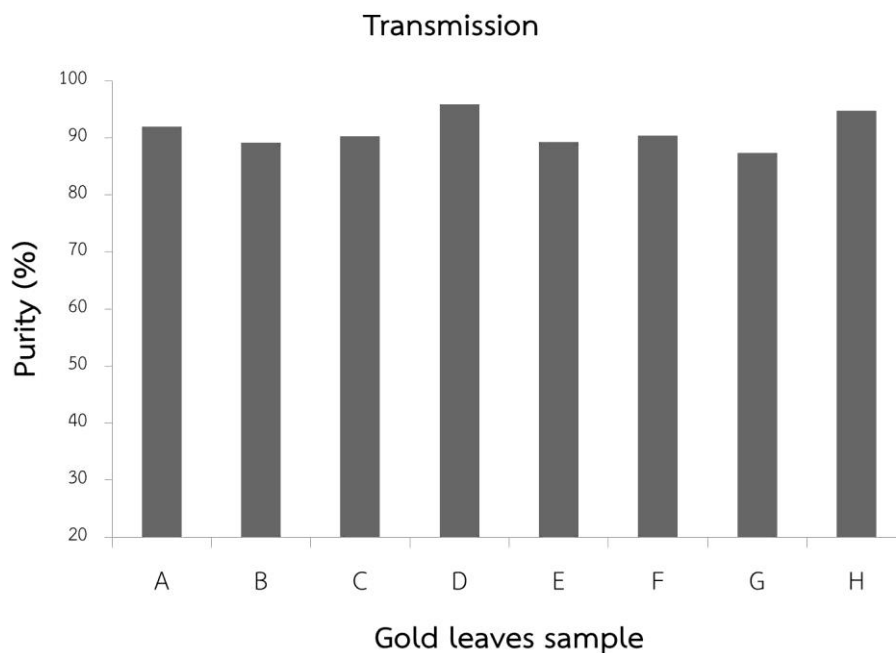
%Au	$(\mu/\rho)_{g10.5keV}$	$(\mu/\rho)_{g12.6keV}$	$(\mu/\rho)_{g12.6keV}/(\mu/\rho)_{g10.5keV}$
50	103.23	112.39	1.085
55	103.23	117.25	1.133
60	103.23	122.11	1.182
65	103.23	126.97	1.230
70	103.23	131.82	1.279
75	103.23	136.68	1.327
80	103.22	141.54	1.375
85	103.22	146.40	1.414
90	103.22	151.26	1.463
96.5	103.22	157.57	1.531

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์และความหนาของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ได้จาก อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV

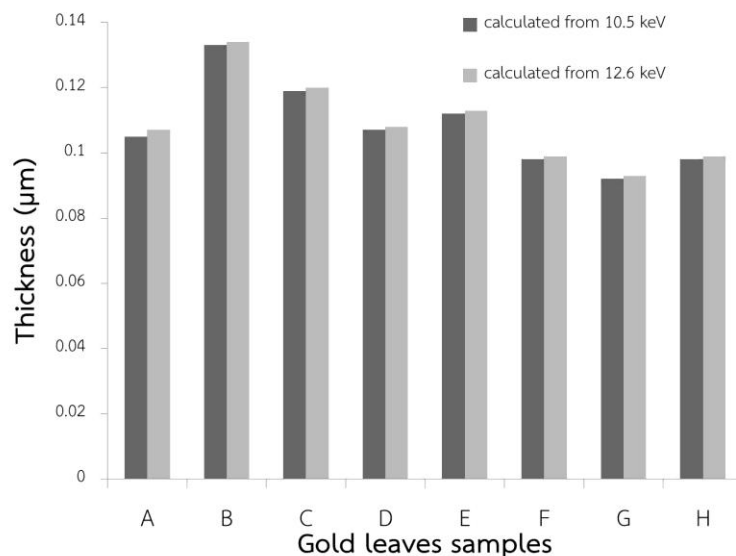
นำค่า $\frac{(\mu/\rho)_{g,12.6keV}}{(\mu/\rho)_{g,10.5keV}}$ ที่ได้จากรายการที่ 4.6 มาวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์โดยเปรียบเทียบจาก กราฟ Calibration curve ในรูปที่ 4.26 และคำนวณความหนาเฉลี่ยของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว จากสมการที่ (3.11) ได้ผลดังตารางที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างได้ผลดังกราฟในรูปที่ 4.27 และเปรียบเทียบความหนาของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างได้ผลดังกราฟในรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.8 ความบริสุทธิ์และความหนาเฉลี่ยของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว

Sample	Purity (%)	Thickness (μm)	
		Calculated from 10.5 keV	Calculated from 12.6 keV
A	91.96	0.105	0.107
B	89.15	0.133	0.134
C	90.30	0.119	0.120
D	95.87	0.107	0.108
E	89.21	0.112	0.113
F	90.36	0.098	0.099
G	87.32	0.092	0.093
H	94.78	0.098	0.099



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV



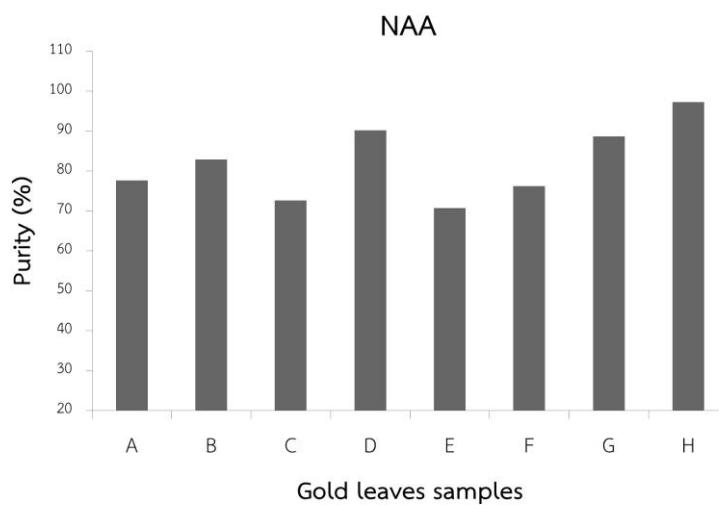
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบความหนาของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์ส่งผ่านที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV

4.3 ความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากวิธี NAA และ ICP

ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างด้วยวิธี NAA เป็นดังตารางที่ 4.9 และเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างได้ผลดังกราฟในรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.9 ความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากวิธี NAA

Sample	Purity (%)
A	77.70
B	82.89
C	72.70
D	90.28
E	70.66
F	76.22
G	88.64
H	92.27

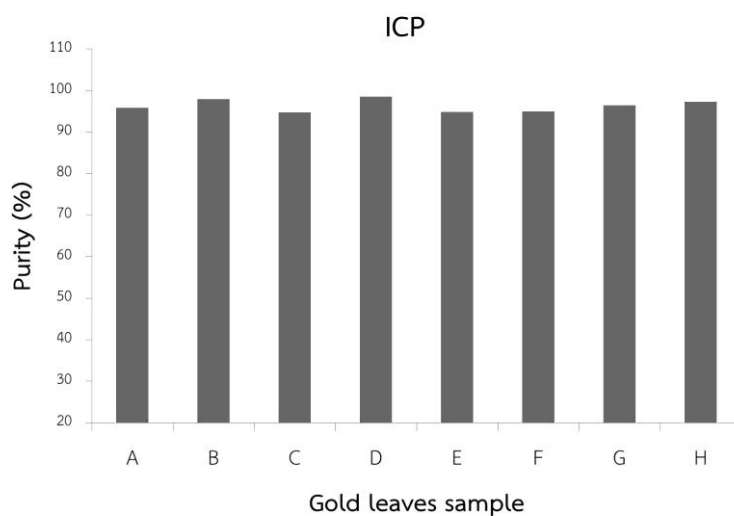


รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวจากวิธี NAA

ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างด้วยเครื่องวัด ICP เป็นดังตารางที่ 4.10 และเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างได้ผลดังกราฟในรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.10 ความบริสุทธิ์ของแผ่นตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวัด ICP

Sample no.	Purity (%)
A	95.88
B	97.93
C	94.70
D	98.60
E	94.82
F	94.97
G	96.48
H	97.27



รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวจากเทคนิค ICP

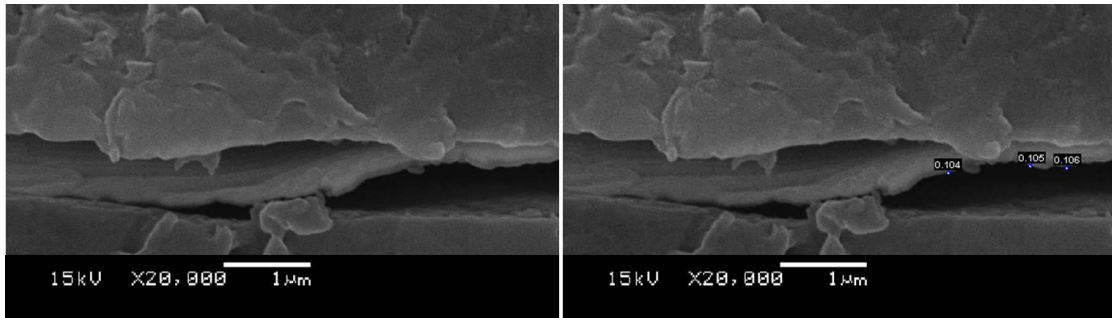
4.4 ความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ความหนาของแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ใช้ขนาดกำลังขยาย 20,000 เท่า โดยวัดความหนาของภาพถ่ายด้วยโปรแกรม SemAfore 5.21 และเฉลี่ยความหนาที่วัด ได้ผลดังตารางที่ 4.11

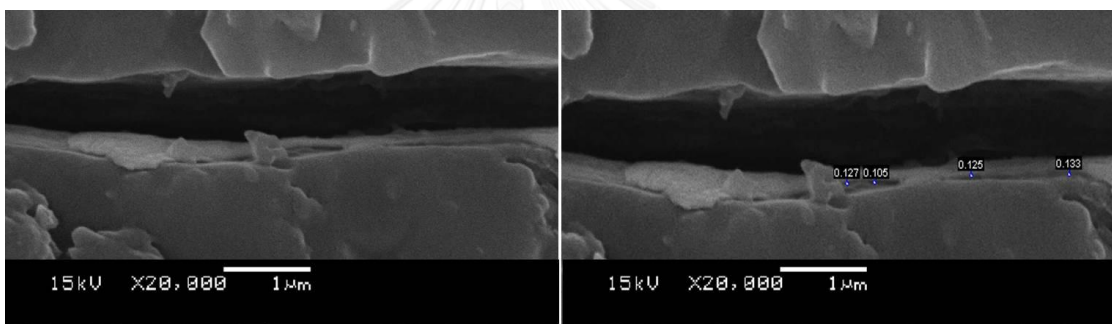
ตารางที่ 4.11 ความหนาของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

Sample	Average thickness (μm)
A	0.1050
B	0.1225
C	0.1220
D	0.1077
E	0.1077
F	0.1040
G	0.0900
H	0.0947

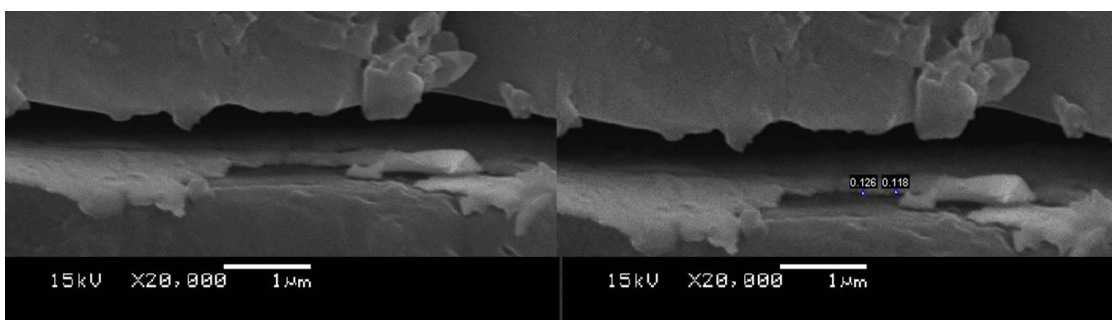
โดยภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างเป็นดังนี้



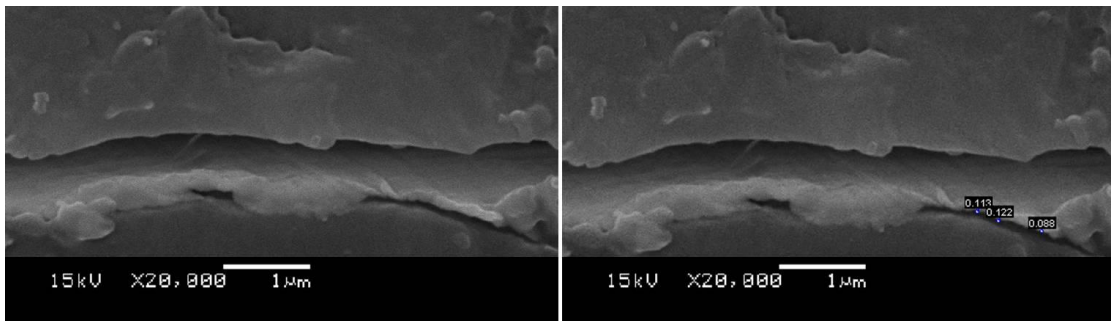
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว A



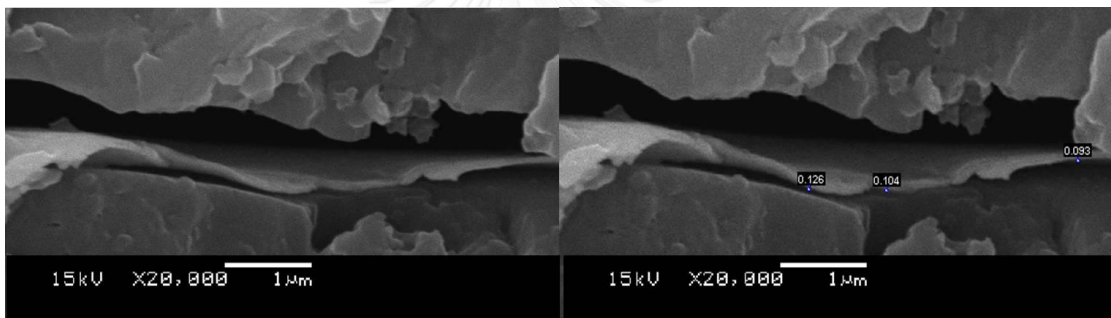
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว B



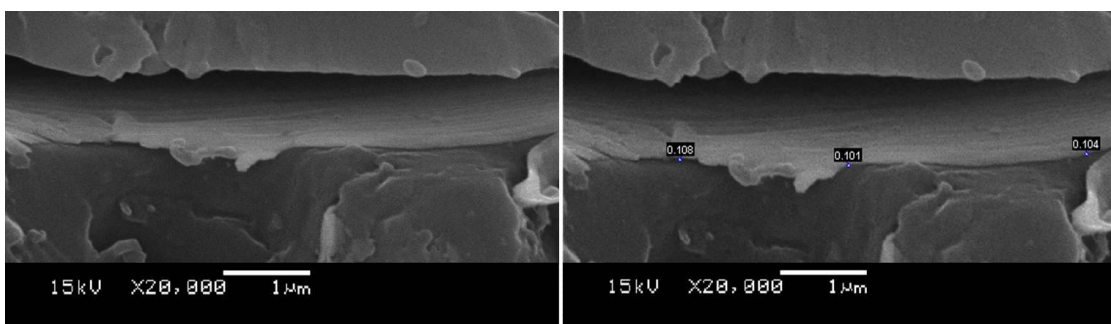
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว C



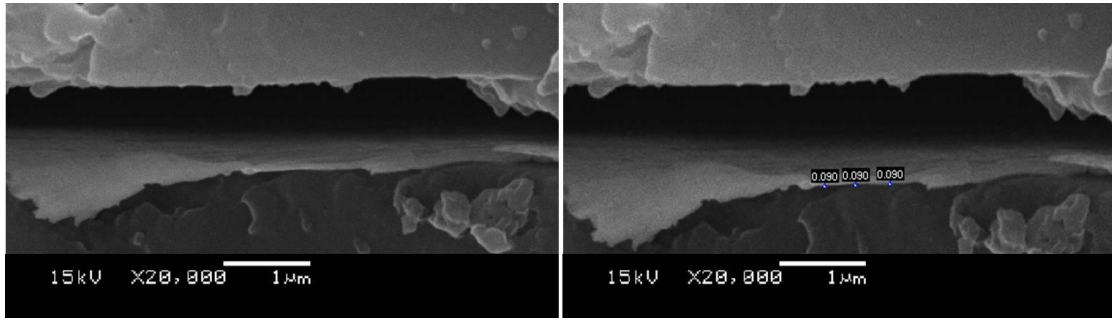
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว D



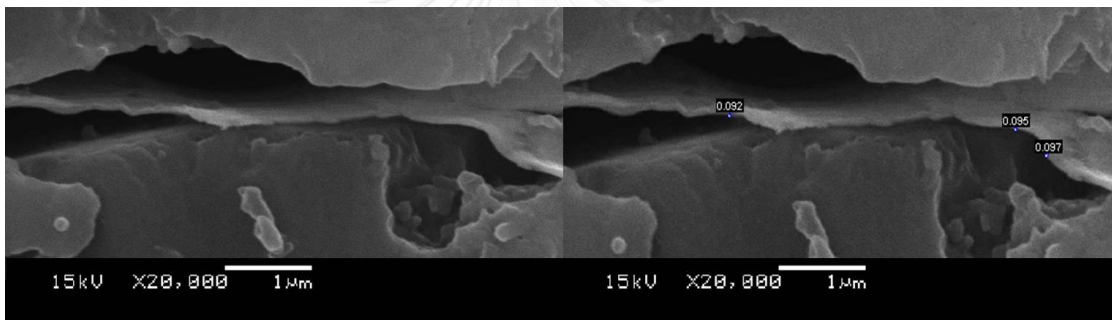
รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว E



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว F



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว G



รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายตัดขวางของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว H

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลว

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวัดความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว เพื่อจำแนกระดับคุณภาพของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวทั้งหมด 8 ตัวอย่างด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์จาก Am-241 ทำการกระตุ้นตัวอย่างทองคำเปลวที่อยู่ในเล่มบรรจุจำนวน 15 เล่มบรรจุ แล้ววัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์จากทองคำและเงินที่เป็นส่วนประกอบในแผ่นทองคำเปลว จากนั้นคำนวณสัดส่วนระหว่างปริมาณของทองคำและเงินจากความเข้มของรังสีเอกซ์ พบว่าแผ่นทองคำเปลวที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีสัดส่วนทองคำสูง นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกคุณภาพของแผ่นทองคำเปลวได้จากความหนาของแผ่นทองคำเปลว โดยในตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่มีความบริสุทธิ์เท่ากัน ตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่มีความหนามากกว่าจะมีคุณภาพสูงกว่า จึงได้ทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์จากตะกั่วที่ถูกส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวเพื่อคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวต่อไป

ความเข้มของรังสีเอกซ์จากตะกั่วที่ส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวจะลดลงเนื่องจากความหนาและความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวมีค่ามากขึ้น ซึ่งในการคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวนั้น จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลว โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวสามารถคำนวณได้จากความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว จึงได้ทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์จากตะกั่ว 2 พลังงาน คือที่พลังงาน 10.5 และ 12.6 keV ที่ส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวแล้วนำมาเปรียบเทียบอัตราส่วนกัน อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV สามารถหาได้จากการวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์และจากการคำนวณ เนื่องจากการวัดการเรืองรังสีเอกซ์ของแผ่นทองคำเปลวทำให้ทราบว่า ในตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวมีทองคำและเงินเป็นส่วนประกอบ สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV ของแผ่นทองคำเปลวที่เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ต่างๆ แล้วสร้างกราฟ Calibration curve ได้ เมื่อนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกันจะสามารถวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวได้ และเมื่อทราบ

เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวแล้วจึงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่ได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลวได้ และเนื่องจากได้วัดความเข้มของรังสีเอกซ์จากตะกั่วที่ถูกส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวที่ 2 พลังงาน ทำให้คำนวณความหนาของแผ่นทองคำเปลวในแต่ละตัวอย่างได้ 2 ค่า ซึ่งค่าความหนาที่ได้อันทั้งสองค่านี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการคำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV ที่ได้จากการวัดค่าความเข้มของพลังงานจากตะกั่วที่ถูกส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการคำนวณหาความหนาของแผ่นทองคำเปลว เป็นดังตารางที่ 5.1 ซึ่งการเพิ่มค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ใช้คำนวณให้สูงขึ้นสามารถลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวิจัยให้ลดลงได้ โดยการเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดรังสีและ/หรือเพิ่มเวลาที่วัดค่าให้นานขึ้น

ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV และความหนาของแผ่นทองคำเปลว

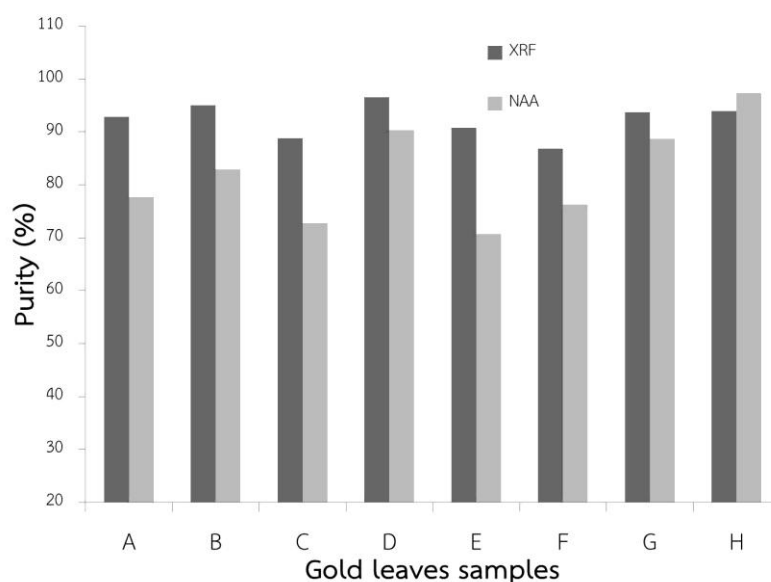
Sample	$\frac{(\mu/\rho)_{g,12.6keV}}{(\mu/\rho)_{g,10.5keV}}$	Thickness (μm)	
		Calculated from 10.5 keV	Calculated from 12.6 keV
A	1.482±0.096	0.105±7.3×10 ⁻⁶	0.107±4.7×10 ⁻⁶
B	1.456±0.066	0.133±5.8×10 ⁻⁶	0.134±3.9×10 ⁻⁶
C	1.467±0.086	0.119±8.8×10 ⁻⁶	0.120±5.8×10 ⁻⁶
D	1.519±0.096	0.107±8.6×10 ⁻⁶	0.108±5.4×10 ⁻⁶
E	1.456±0.091	0.112±8.7×10 ⁻⁶	0.113±5.9×10 ⁻⁶
F	1.467±0.101	0.098±8.6×10 ⁻⁶	0.099±5.6×10 ⁻⁶
G	1.439±0.114	0.092±9.2×10 ⁻⁶	0.093±6.1×10 ⁻⁶
H	1.509±0.104	0.098±8.6×10 ⁻⁶	0.099±5.3×10 ⁻⁶

5.2 ผลความบริสุทธิ์และความหนาของแผ่นทองคำเปลวจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

นำตัวอย่างทองคำเปลวที่วัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์และความเข้มของรังสีเอกซ์จากตะกั่วที่ถูกส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวแล้ว ไปวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค NAA (Neutron Activation Analysis) และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Couple Plasma) เพื่อเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว

5.2.1 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์และเทคนิค NAA

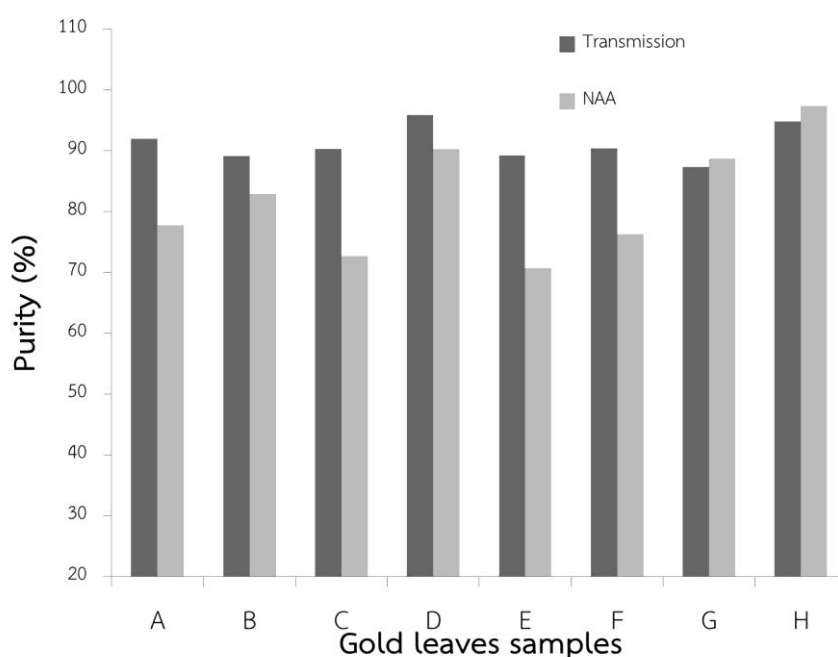
เมื่อเปรียบเทียบลำดับความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์และที่ได้จากเทคนิค NAA ได้ผลดังรูปที่ 5.1 พบว่าลำดับความบริสุทธิ์ที่ได้มีค่าสอดคล้องกันในตัวอย่างทองคำเปลว A, C, E และ F ซึ่งมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกัน ทั้งในผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอกซ์และจากเทคนิค NAA เนื่องจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในเทคนิค NAA ต้องมีความแม่นยำมาก แต่ตัวอย่างทองคำเปลวที่ใช้ในการวัดค่านี้มีน้ำหนักน้อยมาก ลำดับความบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิคทั้งสองแตกต่างกันในบางตัวอย่าง



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์กับเทคนิค NAA

5.2.2 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์ และเทคนิค NAA

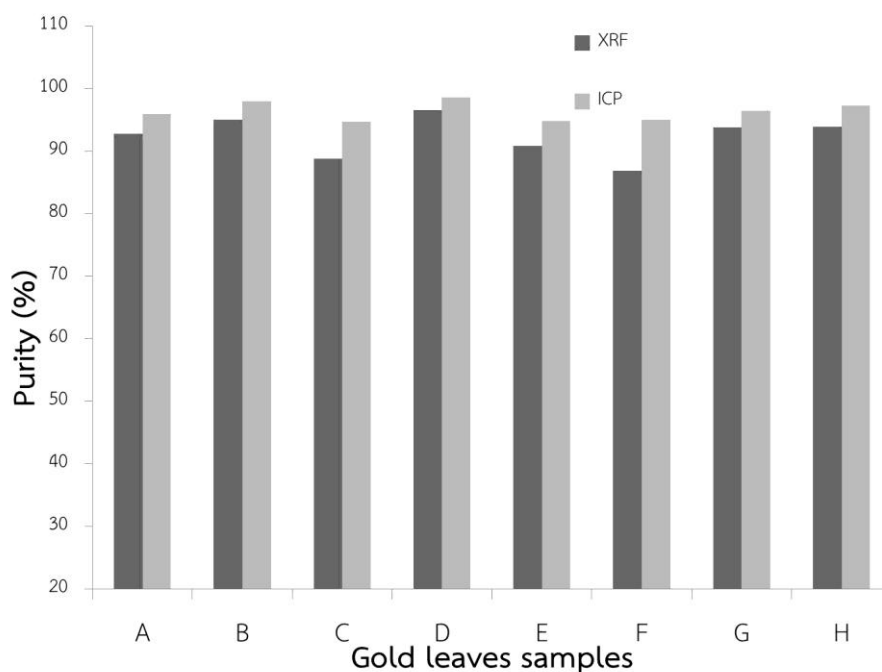
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวที่คำนวณได้จากรังสีเอกซ์ส่งผ่าน และที่ได้จากเทคนิค NAA เป็นดังกราฟในรูป 5.2 พบว่าความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลว A, C, E และ F มีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งจากที่คำนวณได้จากเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์และจากเทคนิค NAA



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่คำนวณได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ถูกส่งผ่าน กับเทคนิค NAA

5.2.3 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ และเทคนิค ICP

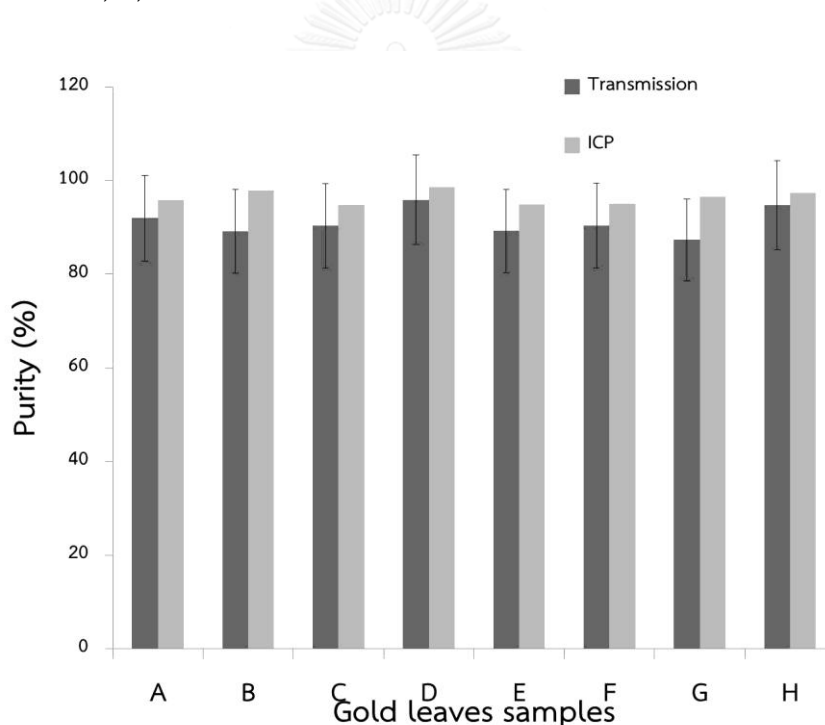
เมื่อเปรียบเทียบลำดับความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างทองคำเปลวที่มีความบริสุทธิ์ในลำดับที่ 1-5 คือ ตัวอย่างทองคำเปลว D, B, H, G และ A มีลำดับความบริสุทธิ์สอดคล้องกัน ตัวอย่างทองคำเปลว E, C และ F ที่ได้จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลว E, C และ F ที่ได้จากเทคนิค ICP มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์กับเทคนิค ICP

5.2.4 เปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวจากเทคนิคเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์และเทคนิค ICP

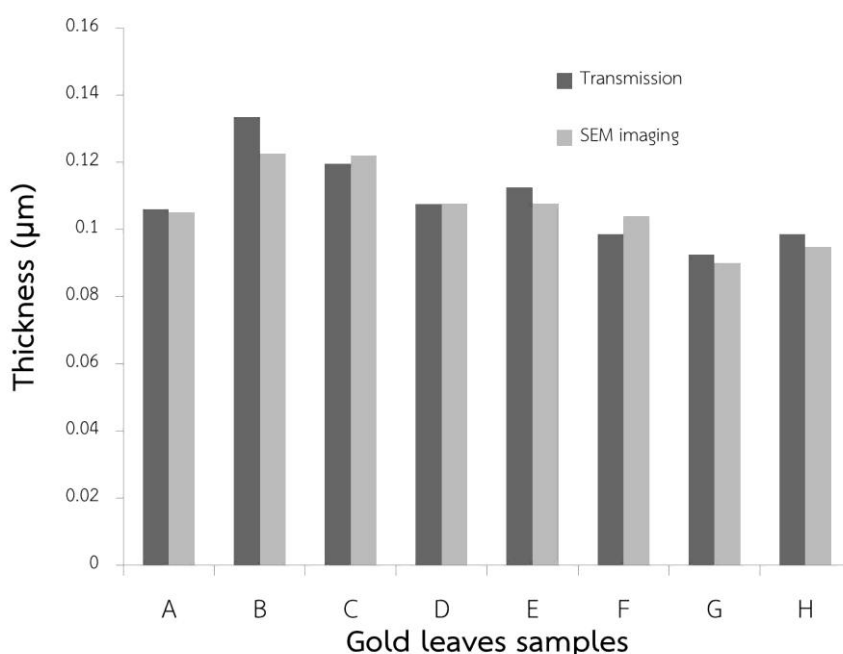
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของตัวอย่างทองคำเปลวทั้ง 8 ตัวอย่างที่คำนวณได้จากค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแผ่นทองคำเปลวที่พลังงาน 12.6 และ 10.5 keV พบว่ามีค่าต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากเทคนิค ICP แต่เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยจะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิค ICP มีค่าอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนของการวัดความบริสุทธิ์ของแผ่นทองคำเปลวด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของตัวอย่างแผ่นทองคำเปลว A, C, E และ F มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละเทคนิค



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบผลความบริสุทธิ์ที่คำนวณได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ถูกส่งผ่านกับเทคนิค ICP

5.2.5 เปรียบเทียบผลความหนาของตัวอย่างทองคำเปลว

เมื่อนำผลความหนาของตัวอย่างทองคำเปลวที่คำนวณได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์จากตะกั่วที่ ถูกส่งผ่านแผ่นทองคำเปลวซึ่งมี 2 ค่า คือค่าได้คำนวณได้จากพลังงาน 10.5 และ 12.5 keV มาหา ค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับความหนาที่วิเคราะห์จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ผล ดังกราฟในรูปที่ 5.5 พบว่าความหนาที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่ได้จากรังสีเอกซ์ส่งผ่าน และจากภาพถ่าย SEM

ความหนาของแผ่นทองคำเปลวที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้จากการเลือกตำแหน่งและลากสเกลในโปรแกรม SemAfore 5.21 ความหนาที่ได้จึงเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่ายจากการลากสเกล นอกจากนี้แผ่นทองคำเปลวยังถูกทุบและตีให้เป็นแผ่นบางด้วยค้อนทองเหลืองซึ่งไม่สามารถทำให้เรียบเท่ากันทั้งแผ่นได้ การเตรียมตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวสำหรับใช้กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่สามารถติดแผ่นทองคำเปลวลงบน stub ได้โดยตรง แม้ว่าจะติดบนคาร์บอนเทปให้เรียบเมื่อมองด้วยตาเปล่าแล้ว เนื่องจากแผ่นทองคำเปลวมีความบางมากจึงพับย่น โค้งงอและฉีกขาด ภาพถ่ายแผ่นทองคำเปลวที่ได้จึงไม่สามารถวัดหาความหนาได้ จึงได้ทำการฝังแผ่นทองคำเปลวลงในเรซินเพื่อทำให้แผ่นทองคำเปลวไม่พับย่นหรือฉีกขาดง่าย จากนั้นทำการตัดขวาง

เรซินผ่านแผ่นทองคำเปลว การตัดขวางเรซินนั้นจะทำให้รอยตัดของแผ่นทองคำเปลวบางตำแหน่งพับและโค้งงอไปตามทิศทางการตัดได้ การขีดเรซินให้เงาก็ทำให้รอยตัดของแผ่นทองคำเปลวพับและโค้งงอได้เช่นกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการเพิ่มรอยพับและความโค้งงอที่รอยตัดของแผ่นทองคำเปลว ผู้วิจัยจึงใช้ตัวอย่างชิ้นที่ไม่ผ่านการขีดเงาในการถ่ายภาพ ทำให้พื้นผิวเรซินในภาพถ่ายไม่สวยงาม ซึ่งไม่ส่งผลต่อการลากสเกลวัดภาพตัดขวางของแผ่นทองคำเปลว



รายการอ้างอิง

1. พิมลพรรณ พิทยานุกุล. ท้องคำบริสุทธ์ช่วยฟื้นฟูผิวหน้าให้เต่งตึงได้จริงหรือ? 2554;
Available from: <http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/63/>.
2. N.M. Mukhamedshin and A.A. Mirsagatova, *Application of X-ray fluorescence for the analysis of some technological material*. Applied Radiation and Isotope, 2005. **63**: p. 715-722.
3. K.-H. Stephen, et al., *Characterization of thin films by x-ray transmission measurements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997(397): p. 150-158.
4. J. A. M. Vrielink, et al., *Applicability of x-ray fluorescenc spectroscopy as method to determine thickness and composition of stacks of metal thin films: A comparison with imaging and profilometry*. Thin solid films, 2011. **520**: p. 1740-1744.
5. Tomas Trojek and Martin Hlozek, *X-ray fluorescence analysis of archaeological finds and art objects: Recognizing gold and glinding* Applied Radiation and Isotope 2012. **70**: p. 1420-1423.
6. Roberto Cesareo, *Multilayered sample reconstructed by measuring $K\alpha/K\beta$ or $L\alpha/L\beta$ X-ray intensity ratio by EDXRF* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2013. **312**: p. 15-22.
7. Bertin, E.P., *Principles and Practice of X-ray Spectrometric Analysis*. 2 ed. 1975, New York: A Division of Plenum Publishing Corporation.
8. Rene E. Van Grieken and A.A. Markowicz, *Handbook of x-rays spectrometry: methods and techniques*. 3 ed. 1992, New York: Marcel Dekkker. Inc.
9. บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน. Available from: <http://www.nst.or.th/article/article5001/article5001i.htm>.



ภาคผนวก ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1507-008 ใบสั่งงาน / Order No. 1507070020002
วันที่รับของ / Date received 07/07/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 10/07/2015
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic ทองคำเปลว
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 5 แผ่น
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 2 แผ่น
รายละเอียด / Description ทอง B
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	97.93	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit


 (ณัฐฉัตร วงษ์สุวรรณ)
 ผู้รับรอง / Approved


 (คำสิงห์ วิชายุทธ์)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. สวอ รวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมด ขอสงวนสิทธิ์ไม่เข้าไปยุ่งเกี่ยวในกรณีพิพาทใดๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการอ้างอิงผลการตรวจนี้ รวมทั้งไม่ต้องรับผิดชอบในการชี้แจงหรือเป็นพยานในกรณีที่เกิดการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ"

End of Report P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
140, 140/1-3, 140/5 ITF-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th FM-IST-11



รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว B



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1510-030 ใบสั่งงาน / Order No. 1510210060001
 วันที่รับของ / Date received 21/10/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 28/10/2015
 ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic แผ่นทองคำเปลว
 น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 30 แผ่น
 น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 5 แผ่น
 รายละเอียด / Description C
 วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	94.70	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit


 (จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)
 ผู้รับรอง / Approved


 (มนัสพงษ์ แววศรี)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. สวอ รวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมด ขอสงวนสิทธิ์ไม่เข้าไปยุ่งเกี่ยวในกรณีพิพาทใดๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการอ้างอิงผลการตรวจนี้ รวมทั้งไม่รองรับคดีขอพบ
การชี้แจงหรือเป็นพยานในกรณีที่เกิดการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ" ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอม
เป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ "

End of Report P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงค์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
140, 140/1-3, 140/5 ITF-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th FM-IST-11



รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว D



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1510-031 ใบสั่งงาน / Order No. 1510210060002
วันที่รับของ / Date received 21/10/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 28/10/2015
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic แผ่นทองคำเปลว
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 30 แผ่น
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 5 แผ่น
รายละเอียด / Description D
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	98.60	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit


 (จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)
 ผู้รับรอง / Approved


 (มนัสพงษ์ แวควรี)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. สวอ รวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมด ของสวอไม่มีเข้าไปยุ่งเกี่ยวในการมีพิพาทใดๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการอ้างอิงผลการตรวจนี้ รวมทั้งไม่ต้องรับผิดชอบในการชี้แจงหรือเป็นพยานในการดำเนินคดีการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ" ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งหมด โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ "

End of Report

P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
140, 140/1-3, 140/5 IT-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th FM-IST-11

รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว E



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1510-032 ใบสั่งงาน / Order No. 1510210060003
วันที่รับของ / Date received 21/10/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 28/10/2015
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic แผ่นทองคำเปลว
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 30 แผ่น
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 0 แผ่น
รายละเอียด / Description E
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	94.82	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit


 (จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)
 ผู้รับรอง / Approved


 (มนัสพงษ์ แววศรี)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. สวอ รวมถึงเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานทั้งหมด ขอสงวนสิทธิ์ไม่เข้าไปยุ่งเกี่ยวในการตีพิมพ์ใดๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการอ้างอิงผลการตรวจนี้ รวมทั้งไม่ต้องรับผิดชอบในการชี้แจงหรือเป็นพยานในกรณีที่เกิดการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นที่จำเป็น โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ"

End of Report P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
140, 140/1-3, 140/5 IT-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th FM-IST-11



รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว F



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1510-033 ใบสั่งงาน / Order No. 1510210060004
วันที่รับของ / Date received 21/10/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 28/10/2015
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic แผ่นทองคำเปลว
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 25 แผ่น
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 1 แผ่น
รายละเอียด / Description F
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	94.97	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit

(จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)

ผู้รับรอง / Approved

(มนัสพงษ์ แววศรี)

ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. ขอ รวบรวมเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมด ของสถานที่มีเข้าไปยุ่งเกี่ยวในกรณีพิพาทใดๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการอ้างถึงผลการตรวจนี้ รวมทั้งไม่ยอมรับผิดชอบในการชี้แจงหรือเป็นพยานในกรณีที่เกิดการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ"

End of Report

P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
140, 140/1-3, 140/5 ITF-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th

FM-IST-11

รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว G



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สอว)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1510-034 ใบสั่งงาน / Order No. 1510210060005
 วันที่รับของ / Date received 21/10/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 28/10/2015
 ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic แผ่นทองคำเปลว
 น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 25 แผ่น
 น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 0 แผ่น
 รายละเอียด / Description G
 วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	96.48	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit


 (จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)
 ผู้รับรอง / Approver


 (มนัสพงษ์ แววศรี)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. สอว รวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมด ขอสงวนสิทธิ์ไม่เข้าไปยุ่งเกี่ยวในกรณีพิพาทใดๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการอ้างอิงผลการตรวจนี้ รวมทั้งไม่รองรับคดีขอใบ
การชี้แจงหรือเป็นพยานในกรณีที่เกิดการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ" ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพื่อบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอม
เป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ "

End of Report P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
 140, 140/1-3, 140/5 ITF-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
 Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th FM-IST-11



รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว H



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No. ASI1510-035 ใบสั่งงาน / Order No. 1510210060006
วันที่รับของ / Date received 21/10/2015 วันที่วิเคราะห์ / Date Assay 28/10/2015
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic แผ่นทองคำเปลว
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying 25 แผ่น
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying 0 แผ่น
รายละเอียด / Description H
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP – OES (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / Element	ผลวิเคราะห์ / Result	หน่วย / Unit	หมายเหตุ / remark
Au (Gold)	97.27	%	

* Abbreviation N.D. denotes Not Detected (<MDL)
MDL denotes Method Detection Limit


 (จิกพันธ์ สุวรรณวิจิตร)
 ผู้รับรอง / Approved


 (เมย์พงษ์ แววศรี)
 ผู้ตรวจสอบ / Assayer

หมายเหตุ : 1. สวอ รวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมด ขอสงวนสิทธิ์ไม่เข้าไปยุ่งเกี่ยวในกรณีพิพาทใดๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการอ้างอิงผลการตรวจวิเคราะห์ รวมทั้งไม่ต้องรับผิดชอบในการชี้แจงหรือเป็นพยานในกรณีที่เกิดการพิพาทในชั้นศาลใดๆ ทั้งสิ้น
2. รายงานนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และ "รายงานผลการทดสอบ ต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งหมด โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันฯ"

End of Report

P1/1

140, 140/1-3, 140/5 อาคารไอทีเอฟ-ทาวเวอร์ ชั้น 1-4 และชั้น 6 ถนนสีลม แขวงสุริยวงศ์ เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร 10500
140, 140/1-3, 140/5 ITF-Tower Building, 1st-4th and 6th Floor, Silom Road, Suriyawong, Bangkok, Bangkok 10500, Thailand
Tel: (662) 634-4999 Fax: (662) 634-4970 Website: <http://www.git.or.th> E-mail: jewelry@git.or.th FM-IST-11



รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองคำเปลว A



ภาคผนวก ข

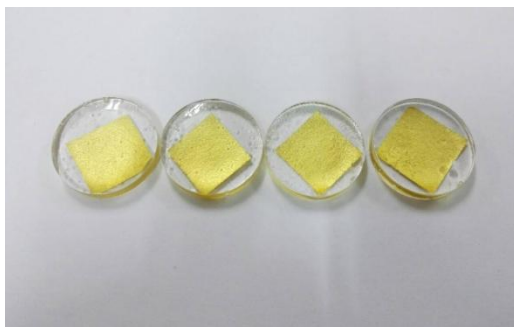
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

วิธีการเตรียมแผ่นทองคำเปลวสำหรับใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

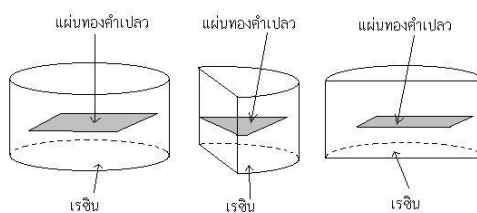
วิธีการเตรียมแผ่นทองคำเปลวสำหรับใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

เนื่องจากแผ่นทองคำเปลวมีความบางมากไม่สามารถถ่ายภาพความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้โดยตรง ต้องทำการเตรียมตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวเพื่อใช้งานกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยการฝังตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวในเรซินซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 5.14 ตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ฝังในเรซิน

1. ตัดแผ่นทองคำเปลวให้ได้ขนาดตามที่สามารถใส่ในเครื่องวัดได้ จากนั้นผสมเรซินแล้วเทใส่หลุมพิมพ์ เมื่อรอให้ฟองอากาศหายไปแล้วจึงค่อยๆ วางแผ่นทองคำเปลวที่ได้ตัดเตรียมไว้บนเรซิน
2. หลังจากวางแผ่นทองคำเปลวแล้วให้พักไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้เรซินไม่เหลวจนเกินไปก่อนที่จะเทเรซินทับลงบนแผ่นทองคำเปลวอีกครั้งหนึ่ง
3. รอให้เรซินแห้งและแข็งจึงนำไปตัดตามขวางและขัดเงาให้เรียบและใสไม่มีรอยขีดข่วนเพื่อวัดความหนาของแผ่นทองคำเปลว

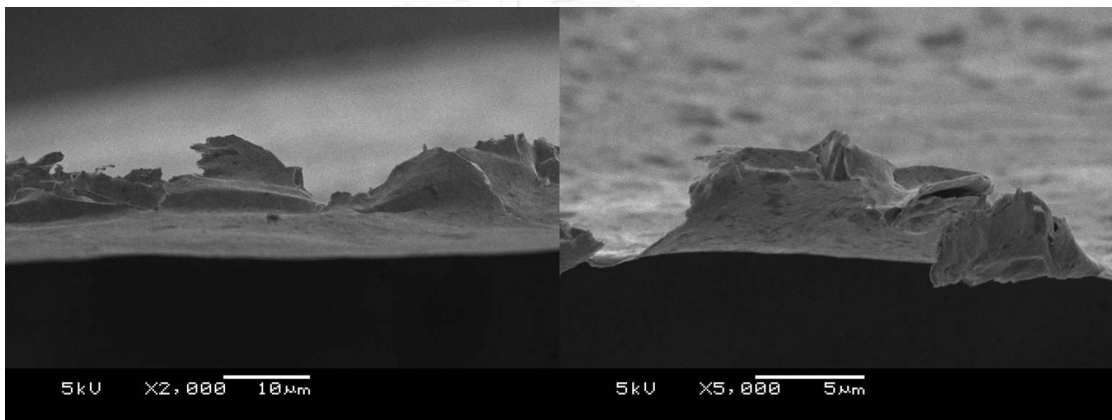


รูปที่ 5.15 ตัดขวางตัวอย่างแผ่นทองคำเปลวที่ฝังในแผ่นทองคำเปลว

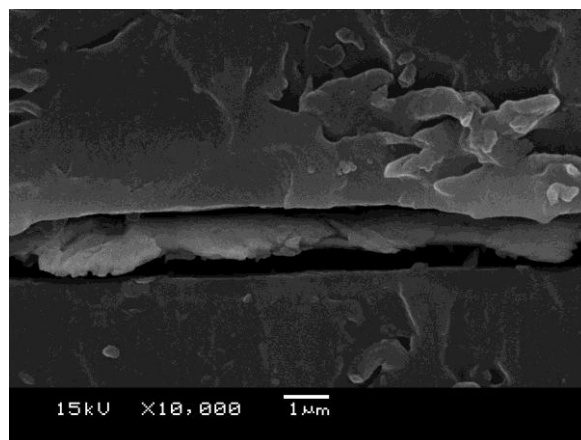
4. ทำการเคลือบชิ้นงานที่ฝังในเรซินด้วยโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (ในการวิจัยนี้เคลือบด้วยทองคำ) ก่อนนำเข้าถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



รูปที่ 5.16 แผ่นทองคำเปลวที่ฝังในเรซินหลังจากเคลือบด้วยโลหะ



รูปที่ 5.17 ตัวอย่างภาพถ่ายแผ่นทองคำเปลวที่ไม่ได้ฝังในเรซิน



รูปที่ 5.18 ตัวอย่างภาพถ่ายแผ่นทองคำเปลวที่ฝังในเรซิน



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริลักษณ์ สาทรา ชื่อเล่น เกต เกิดวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด นครสวรรค์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีผลงานตีพิมพ์ลงในวารสาร วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (เดือนกรกฎาคม - เดือนธันวาคม 2558)

