

การวิเคราะห์วัตถุโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลาย ณ พื้นที่  
ด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงแบบเคลื่อนย้ายได้



นางสาวอรรวรรณ ธรรมานาถ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

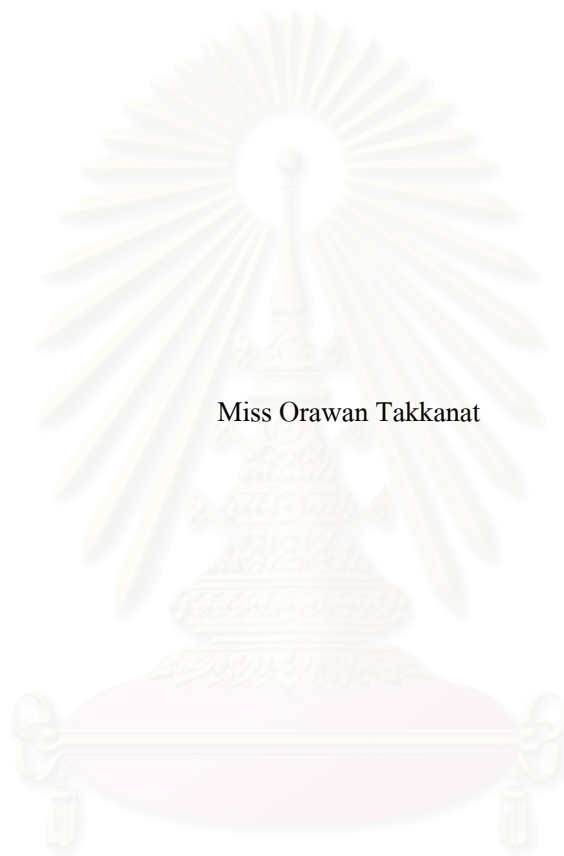
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6075-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IN SITU NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF LARGE ANCIENT OBJECTS  
USING A MOBILE XRF ANALYZER



Miss Orawan Takkanat

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6075-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หัวข้อทฤษฎีโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลาย ณ พื้นที่
	ด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงแบบเคลื่อนย้ายได้
โดย	นางสาวอรพรรณ ธรรมนาถ
สาขาวิชา	นิเวศวิทยาเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสัจฉิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุนันต์)

อรรณพ ธรรมกาน : การวิเคราะห์หัตถวัตถุโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลาย ณ พื้นที่ด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงแบบเคลื่อนย้ายได้. (IN SITU NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF LARGE ANCIENT OBJECTS USING A MOBILE XRF ANALYZER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล, 77 หน้า. ISBN 974-17-6075-2.

ได้ทำการทดสอบเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงที่ใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปเป็นตัวกระตุ้น และหัตถวัตถุชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานโลหะและโบราณวัตถุทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม สำหรับโพรบที่ใช้บรรจุหัตถวัตถุและต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ได้ออกแบบตามผลการทดลอง ซึ่งพบว่าระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับผิวตัวอย่างตั้งแต่ 0.5 – 1.5 ซม. มีค่าความเข้มข้นรังสีเอกซ์มากที่สุดหรือใกล้เคียงกับค่าที่มากที่สุด ส่วนการศึกษาเรื่องความโค้งหรือเว้าของผิวตัวอย่าง พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับผิวตัวอย่างตั้งแต่ 0.5 – 3.5 ซม. มีค่าอัตราส่วนของความเข้มข้นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวในตัวอย่างค่อนข้างคงที่ทางสถิติ

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมี 5 ชนิด ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ ทองเหลือง ตะกั่วบัดกรี สำริด และพระพุทธรูปขนาดเล็ก โดยค่าผลต่างระหว่างปริมาณจริงกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ มีค่าสูงสุดไม่เกิน 3.53 % ในส่วนของการวิเคราะห์ภาคสนาม ได้ทำการวิเคราะห์พระพุทธรูปจำนวน 4 องค์ โดยวิเคราะห์ที่วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม กรุงเทพมหานคร จำนวน 2 องค์ และวัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จำนวน 2 องค์ พบว่า พระพุทธรูป 3 องค์แรก มีส่วนประกอบหลัก คือ ทองแดงกับสังกะสี ส่วนประกอบรอง คือ ดีบุก ตะกั่ว และเหล็ก ธาตุปริมาณน้อย คือ เงินกับพลวง ส่วนพระพุทธรูปอีก 1 องค์ พบทองเพียงธาตุเดียวเท่านั้น เนื่องจากการบูรณะปฏิสังขรณ์ด้วยการลงลักปิดทองพระองค์นี้แล้ว

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4470650921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : X-RAY FLUORESCENCE / NON-DESTRUCTIVE / ANCIENT / QUANTITATIVE

ORAWAN TAKKANAT : IN SITU NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF LARGE  
ANCIENT OBJECTS USING A MOBILE XRF ANALYZER. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, THESIS COADVISOR : SIRICHA  
WANGCHAREONTRAKUL, Ph.D. 77 pp. ISBN 974-17-6075-2.

A compact radioisotope excited x-ray fluorescence (XRF) spectrometer using CdTe detector was tested both in laboratory and in the field for analysis of some metallic specimens and ancient objects. A source-detector assembly was designed and constructed according to the experimental results to obtain maximum fluorescent x-ray intensity for wide range of energy. It was found that the maximum source-to-specimen distance in the range of 0.5 – 1.5 cm would give maximum or near maximum x-ray intensity. Furthermore, effect of the curvature of the specimen surface on fluorescent x-ray intensity was also experimentally investigated. It was also found that the fluorescent x-ray intensity ratios of all elements in the tested multielement specimens were statistically constant for source-to-specimen distance between 0.5 – 3.5 cm from both flat and curved surface specimens.

In laboratory, five sets of specimens were analyzed including oxides, brass, lead-tin alloys, and bronze specimens as well as small Buddha images. The discrepancies between the known and the analytical values were not greater than 3.53 %. Finally, four Buddha images in 2 temples, namely Wat Rachabopithsathitmahasimaram in Bangkok. and Wat Naphramain in Ayuthaya Province, were analyzed. The major elements found in 3 Buddha images were Cu and Zn with Sn, Pb, and Fe as minor elements while Ag and Sb were found at trace levels. The other Buddha image was covered by gold foils thus only Au was found at all spots.



Department Nuclear Technology

Student's signature.....

Field of study Nuclear Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2004

Co- advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.ศิริชัย หวังเจริญตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆด้าน รวมถึงอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ต่างๆมากมาย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์จเด็จ เย็นใจ สำหรับความรู้ คำแนะนำ และคำสั่งสอนทางด้านเทคนิคการวิเคราะห์การเรียงรังสีเอกซ์

ขอกราบขอบพระคุณเจ้าอาวาสวัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และเจ้าอาวาสวัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม กรุงเทพมหานครฯ ที่กรุณาให้ใช้สถานที่และพระพุทธรูปในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ คุณศราวุธ ใจเย็น และคุณเฉลิมพงศ์ โพธิ์ดี สำหรับความช่วยเหลือที่ดีมากในการปฏิบัติงานภาคสนาม

ขอขอบคุณ ครูไพโรจน์ อนันตเศรษฐกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความกรุณาในการหล่อโลหะ

ขอขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกคน โดยเฉพาะ แอน เอก น้อง นุช และกอล์ฟ ที่คอยรับฟังปัญหาและมีกำลังใจให้กันมาตลอด

ท้ายสุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆ สำหรับคำอบรมสั่งสอนและความช่วยเหลือสนับสนุนในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุภาวดี นววิทย์ศิริกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ปัญหา ที่มา และเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2. หลักการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์และโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รังสีเอกซ์.....	4
2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลาง.....	6
2.3 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ.....	10
2.4 หัววัดรังสีเอกซ์.....	15
2.5 ส่วนของระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์.....	17
2.6 เทคนิคการวิเคราะห์.....	20
2.7 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง.....	25
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการวิจัย.....	44
4.1 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ กับตัวอย่าง.....	44
4.2 การศึกษาค่าอัตราส่วนของส่วนประกอบในตัวอย่างที่มีลักษณะผิว แตกต่างกัน.....	46
4.3 ผลการทดสอบโลหะผสมที่เตรียมขึ้นสำหรับการปรับเทียบ.....	48
4.4 ผลการทดสอบ โปรแกรม NBSGSC .....	51
4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ.....	52
4.6 ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ.....	55
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	59
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	77



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ลักษณะทางกายภาพของต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทป.....	15
2.2 แสดงค่า $K_{ab}$ และ $K_{\alpha}$ ของธาตุโครเมียม เหล็ก และนิกเกิล.....	22
2.3 สรุปการทำงานของโปรแกรม.....	31
4.1 แสดงจำนวนนับสุทธีที่ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสี Pu-238 กับตัวอย่าง ชนิดต่างๆ.....	44
4.2 แสดงจำนวนนับสุทธีที่ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสี Am-241 กับตัวอย่าง ชนิดต่างๆ.....	45
4.3 อัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดง ( $K_{\alpha}$ ) ต่อสังกะสี ( $K_{\beta}$ ).....	46
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตัวอย่างที่เป็นทองเหลือง.....	48
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตัวอย่างที่เป็นสำริด.....	48
4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตะกั่วบัดกรี (Pb/Sn Alloys) ด้วยโปรแกรม NBSGSC โดยใช้ระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแบบEDX.....	51
4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบออกไซด์ ด้วยโปรแกรม NBSGSC โดยใช้ระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแบบ EDX.....	52
4.8 ปริมาณของส่วนประกอบของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.....	55
4.9 ปริมาณของส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 1.....	55
4.10 ปริมาณของส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 2.....	56
4.11 ปริมาณของส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของพระพุทธรูป ที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2.....	56

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 สเปกตรัมแบบต่อเนื่องของรังสีเอกซ์ ณ ความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน ของหลอดรังสีเอกซ์.....	5
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล(Mass attenuation coefficient) ของตะกั่วกับพลังงานโฟตอน.....	7
2.3 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	8
2.4 การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน.....	9
2.5 ลักษณะสเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจาก หลอดรังสีเอกซ์.....	11
2.6 โครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	12
2.7 ลักษณะต้นกำเนิดรังสีแบบ ไอโซโทปชนิด Point Source.....	14
2.8 ลักษณะต้นกำเนิดรังสีแบบ ไอโซโทปชนิดวงแหวน (Annular Source).....	14
2.9 เปรียบเทียบการแยกพีคของหัววัด 3 ชนิด.....	16
2.10 แผนผังการจัดระบบวิเคราะห์ EDX.....	18
2.11 แผนผังการจัดระบบวิเคราะห์ WDX.....	19
2.12 เปรียบเทียบสเปกตรัม EDXRF และ WDXRF.....	20
2.13 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม Genie-2000.....	26
2.14 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม WinSPEDAC.....	26
2.15 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม WinQXAS.....	27
2.16 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม NBSGSC.....	30
3.1 หัววัดรังสีเอกซ์แบบกึ่งตัวนำชนิด CdTe (Cadmium Telluride).....	33
3.2 Inspector 2000.....	33
3.3 การจัดวางแผ่นทองเหลือง.....	35
3.4 โพรบ (Probe) สำหรับบรรจุหัววัดรังสีเอกซ์และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์.....	36
3.5 ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.....	40
3.6 พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 1.....	41
3.7 พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 2.....	41
3.8 พระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 1.....	41
3.9 ตำแหน่งการวิเคราะห์พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 2.....	42
3.10 ตำแหน่งการวิเคราะห์พระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2.....	43

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี (Pu-238) ถึงตัวอย่างกับจำนวนนับสุทธิ.....	44
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี (Am-241) ถึงตัวอย่างกับจำนวนนับสุทธิ.....	45
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีถึงตัวอย่าง กับอัตราส่วนระหว่างจำนวนนับสุทธิของทองแดงกับสังกะสี.....	46
4.4 ค่าจำนวนนับสุทธิของทองแดง ( $K_{\alpha}$ ) ที่ลักษณะผิต่างๆ.....	47
4.5 กราฟเปรียบเทียบของตัวอย่างทองเหลือง.....	49
4.6 กราฟเปรียบเทียบของตัวอย่างสำริด.....	50
4.7 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของชั้นสำริด.....	53
4.8 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 1.....	53
4.9 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 1.....	54
4.10 กราฟเปรียบเทียบของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ.....	57
4.11 กราฟเปรียบเทียบของพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2.....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ปัญหา ที่มา และเหตุผล

เนื่องจากประเทศไทยของเรานั้นมีโบราณสถาน และโบราณวัตถุอยู่มากมายกระจายอยู่ทั่วประเทศ ซึ่งในอดีตได้มีการสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นที่เคารพบูชาและเป็นที่ยึดเหนี่ยวจิตใจ บางพื้นที่มีมาก บางพื้นที่มีน้อย ถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับคนไทยมานานแล้ว จากสิ่งต่างๆเหล่านั้นจะแสดงได้ถึงความคิด ความสวยงาม และที่สำคัญคือความแข็งแรงคงทน ซึ่งในปัจจุบันเราก็ยังได้เห็นความสวยงามของสิ่งเหล่านั้นอยู่ ทำให้เกิดความสงสัยว่าวัตถุโบราณต่างๆเหล่านั้นทำมาจากอะไร มีสิ่งใดเป็นองค์ประกอบในปริมาณเท่าไรบ้าง โดยในแต่ละยุคแต่ละสมัยวัสดุที่นำมาทำอาจมีส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบเหล่านั้นเหมือนหรือแตกต่างกันบ้าง โดยในการหล่อพระพุทธรูป บางครั้งอาจจะไม่ได้หล่อทีเดียวทั้งองค์ กล่าวคือ อาจหล่อแยกเป็นชิ้นส่วนแล้วนำมาเชื่อมติดกันภายหลัง หรือถ้าเป็นการหล่อทั้งองค์จะมีเทคนิคในการหล่อคือจะเทราดจากยอดลงสู่ฐาน หรืออาจจะหงายฐานขึ้นแล้วเทราดจากฐานลงสู่ยอด ฉะนั้นใน 1 องค์ก็อาจจะมีปริมาณของส่วนประกอบต่างๆไม่เท่ากัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หลายๆตำแหน่งเพื่อเปรียบเทียบปริมาณกัน ซึ่งที่ผ่านมามงานในลักษณะแบบนี้ไม่สามารถกระทำได้หรือกระทำได้ยากมาก เนื่องจากว่าในการวิเคราะห์จะต้องเป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายตัวอย่าง และตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นวัตถุขนาดใหญ่ โดยต้องทำการวิเคราะห์ ณ สถานที่ที่มีวัตถุนั้นอยู่ ซึ่งเทคนิคทางนิวเคลียร์หลายเทคนิคสามารถใช้งานในลักษณะนี้ได้ และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ก็เป็นหนึ่งในเทคนิคเหล่านี้ที่ได้ผลดีในหลายประเทศ ซึ่งทางภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก็มีศักยภาพและอุปกรณ์ที่สามารถเริ่มดำเนินการในเรื่องนี้ได้ โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นี้ วิเคราะห์ได้เฉพาะที่ผิวของตัวอย่าง เนื่องจากว่ารังสีเอกซ์มีพลังงานไม่สูงมากนัก จึงทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงน้อย สำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว มีความแม่นยำสูง และไม่ต้องทำลายตัวอย่าง แต่ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณทำได้ค่อนข้างยาก ผู้วิเคราะห์จะต้องมีความรู้และความชำนาญมาก โดยอาจจะใช้เทคนิคอื่นที่เหมาะสมร่วมในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องได้ ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้เป็นฐานข้อมูลต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบที่ผิวของวัตถุโบราณขนาดใหญ่โดยไม่ทำลายและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ วิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อหาส่วนประกอบที่ผิวของวัตถุโบราณขนาดใหญ่ที่เป็นเนื้อโลหะ ณ พื้นที่
2. พัฒนาเทคนิคการปรับเทียบสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์แบบการเรืองรังสีเอกซ์
3. ทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อหาส่วนประกอบที่ผิวของวัตถุโบราณขนาดใหญ่
4. พัฒนาเทคนิคการปรับเทียบสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ
5. สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ทำให้ทราบองค์ประกอบหลัก และปริมาณขององค์ประกอบหลักที่ผิวของวัตถุโบราณขนาดใหญ่ที่ไม่มีข้อมูลอยู่ก่อน ซึ่งจะพื้นฐานข้อมูลและเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2543 P. Wobrauschek, G. Halmetschlager, S. Zamini, C. Jokubonis, G. Trnka และ M. Karwowski<sup>[1]</sup> ทำการวิจัยเรื่อง “Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis of Celtic Glasses” ศึกษาแก้วโบราณของชาวเคลต์ (Celt) ซึ่งเป็นคนพื้นเมืองที่อาศัยอยู่ในหมู่เกาะอังกฤษ โดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (EDXRF) วิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ แบบไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างนี้เป็นแก้วที่มีสีและรูปร่างแตกต่างกัน ทั้งที่บ่ง

และโปร่งแสง โดยในอดีตใช้เครื่องแก้วเหล่านี้เป็นเครื่องตกแต่งบ้าน ในการวิเคราะห์ได้มีการนำเอาโปรแกรม QXAS ของ IAEA มาช่วยในการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือ Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cu, Zn, Sr, Cd, Sb, Ba และ Pb โดยมีวิธีการวิเคราะห์เปรียบเทียบออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ คือ กลุ่มที่หนึ่ง ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 kV กระแสไฟฟ้า 0.35 mA ใช้เวลาวิเคราะห์ 1000 วินาที ในสุญญากาศ โดยไม่ใช้ฟิลเตอร์ ส่วนอีกกลุ่มหนึ่ง ใช้ศักย์ไฟฟ้า 35 kV กระแสไฟฟ้า 0.35 mA ใช้เวลาวิเคราะห์ 1000 วินาที ในอากาศ โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นฟิลเตอร์

2. ปี 2543 B. Constantinescu, V. Cojocaru, R. Bugoi และ A. Sasianu<sup>[2]</sup> ทำการวิจัยเรื่อง “Materials Analysis in Archaeometrical Studies at Bucharest Particle Accelerators” ศึกษาส่วนประกอบของเหรียญเงินโบราณของกรีกและเหรียญทองโบราณของดาเซียน รวมทั้งวิเคราะห์ในเชิงปริมาณด้วย สำหรับเหรียญเงินมีวิธีวิเคราะห์ 2 วิธี คือ PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) และ XRF โดยใช้ Am-241 เป็นต้นกำเนิดรังสี ส่วนเหรียญทองมีวิธีวิเคราะห์ 2 วิธี คือ XRF และ PAA (Proton Activation Analysis) โดยวิธีหลังนี้แต่ละเหรียญจะฉายรังสีในสุญญากาศเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และใช้พลังงานตกกระทบ 11 MeV ผลการวิเคราะห์พบ Ag, Cu, Sn, Pb และ Au แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเหรียญที่ทำเลียนแบบขึ้นในปัจจุบัน

3. ปี 2538 K. N. Yu และ J. M. Miao<sup>[3]</sup> ทำการวิจัยเรื่อง “Non-destructive and Quantitative Investigation of Blue and White Porcelains Using EDXRF” วิเคราะห์ถ้วยกระเบื้องโบราณสีฟ้าและสีขาวในราชวงศ์ต่างๆ ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (EDXRF) โดยได้ทำการวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ แบบไม่ทำลายตัวอย่าง พบธาตุปริมาณน้อย 13 ชนิด คือ Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Pb, Sr, Y และ Zr

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

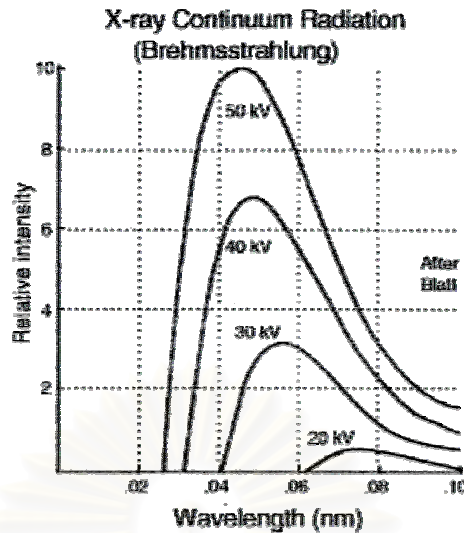
## บทที่ 2

### หลักการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ และโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุซึ่งมีพลังงานสูงลดความเร็วโดยฉับพลันหรือเกิดการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนภายในวงโคจรชั้นในของอะตอม จากวงโคจรชั้นนอกไปวงโคจรชั้นใน ซึ่งกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบนี้จะให้ลักษณะของสเปกตรัมรังสีที่แตกต่างกัน

รังสีเอกซ์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Fast electrons) เคลื่อนที่ผ่านสนามคูลอมบ์ของนิวเคลียส (Coulombic field) แล้วถูกหน่วง (Decelerate) อย่างฉับพลันทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจากการลดความเร็วหรือที่เรียกว่า “เบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung)” จะมีลักษณะสเปกตรัมเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous Spectrum) เนื่องจากการสูญเสียพลังงานเป็นไปแบบสุ่ม (Random) มีค่าได้ตั้งแต่ 0 จนถึงค่าสูงสุด คือ พลังงานจลน์ของอนุภาคนั้น ส่วนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเฉพาะสำหรับแต่ละธาตุหรือที่เรียกว่า “รังสีเอกซ์เรือง (Fluorescent X-ray)” หรือ “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray)” ลักษณะของสเปกตรัมจะเป็นแบบอนุกรมพลังงานเดี่ยว (Characteristic line spectrum) ด้วยลักษณะเฉพาะของรังสีเอกซ์เรืองแต่ละธาตุที่ไม่เหมือนกันนี้เองเราจึงนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุต่างๆในสารประกอบ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ว่าถึงแม้จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นธาตุอะไรแต่ก็ไม่สามารถระบุได้โดยตรงว่าเป็นไอโซโทป (Isotope) ใดของธาตุนั้นๆ เพราะการจัดเรียงชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นจะถูกกำหนดโดยจำนวนอิเล็กตรอนซึ่งเท่ากับจำนวนโปรตอน (Proton) ในนิวเคลียส (Z) เท่านั้นไม่ใช่น้ำหนักอะตอม (A) ดังนั้นการที่จะหาว่าเป็นไอโซโทปใดเราจะต้องทราบชนิดของการสลายตัว (Decay) ด้วยเพื่อให้ทราบว่ารังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการใด



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมแบบต่อเนื่องของรังสีเอกซ์ ณ ความต่างศักย์ที่แตกต่างกันของหลอดรังสีเอกซ์<sup>41</sup>

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ (E) กับความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$E = h \nu = h \frac{C}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

- เมื่อ  $h$  คือ Plank's constant =  $6.626 \times 10^{-34}$  Js
- $\nu$  คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์
- $c$  คือ ความเร็วแสง =  $3 \times 10^8$  m/s
- $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ถ้ารังสีเอกซ์มีความยาวคลื่น 1 A (angstrom) =  $10^{-10}$  เมตร จะมีพลังงานเท่ากับ

$$\begin{aligned} \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ js})(3 \times 10^8 \text{ m / s})}{10^{-10} \text{ m}} &= 2 \times 10^{-15} \text{ J} \\ &= \frac{2 \times 10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} \\ &= 12.4 \text{ keV} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (Kiloelectronvolt, keV) กับความยาวคลื่นในหน่วย Angstrom (A) เป็น

$$\lambda(A) = \frac{12.4}{E(keV)} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$



## 2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลาง

อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลางนั้น จะมีลักษณะเช่นเดียวกับอันตรกิริยาของรังสีแกมมา ซึ่งรังสีทั้งสองนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันเพียงแต่แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิด โดยรังสีแกมมานั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในนิวเคลียส ส่วนรังสีเอกซ์นั้นจะเกิดที่ชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส แต่เนื่องจากทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ก็เป็นรังสีที่ประพฤติตัวเป็นได้ทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาค (Wave particle duality) เรียกว่า “โฟตอน (Photon)” ดังนั้นโฟตอนจึงสามารถใช้เรียกแทนทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ อันตรกิริยาของโฟตอนกับตัวกลางนั้นสามารถแยกได้ตามลักษณะของอนุภาคที่ถูกเข้าทำอันตรกิริยาด้วย เช่น อิเล็กตรอนหรือนิวเคลียส

การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความเข้ม  $I_0$  เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Medium material) โฟตอนบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับอะตอมของตัวกลาง สามารถแยกได้ตามลักษณะของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) การกระเจิงแบบเรย์เลห์ (Rayleigh scattering) และแพร์โปรดักชัน (Pair production) ทำให้ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมาโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ ( $I_x$ ) มีค่าเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

- เมื่อ  $I_x$  คือ ความเข้มของโฟตอนที่ผ่านออกมาโดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ กับตัวกลาง  
 $I_0$  คือ ความเข้มของโฟตอนก่อนเข้าชนตัวกลาง  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation coefficient) รังสีเอกซ์  
 $x$  คือ ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น  $\mu$  เป็นค่าที่บอกถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ ของโฟตอนกับตัวกลาง ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

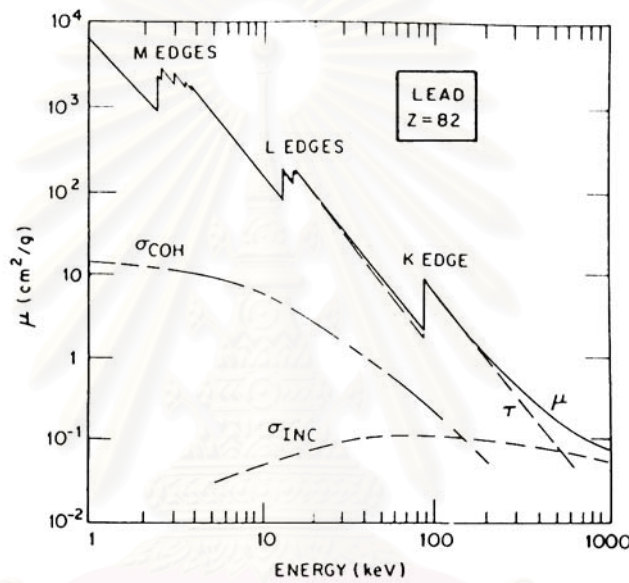
$$\mu = \mu_{pe} + \mu_{coh} + \mu_{inc} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

- เมื่อ  $\mu_{pe}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก  
 $\mu_{coh}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานเชิงเส้น  
 $\mu_{inc}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบสูญเสียพลังงานเชิงเส้น

ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์ อันตรกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์เนื่องจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ( $\mu_{pe}$ ) ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ (E) และเลขอะตอมของตัวกลาง (Z) ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_{pe} \propto Z^n E^{-3} \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ n คือ ค่าตัวเลขซึ่งแปรผันตามพลังงาน E ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์ n มีค่าประมาณ 3-4



รูปที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ของตะกั่วกับพลังงานโฟตอน<sup>[4]</sup>

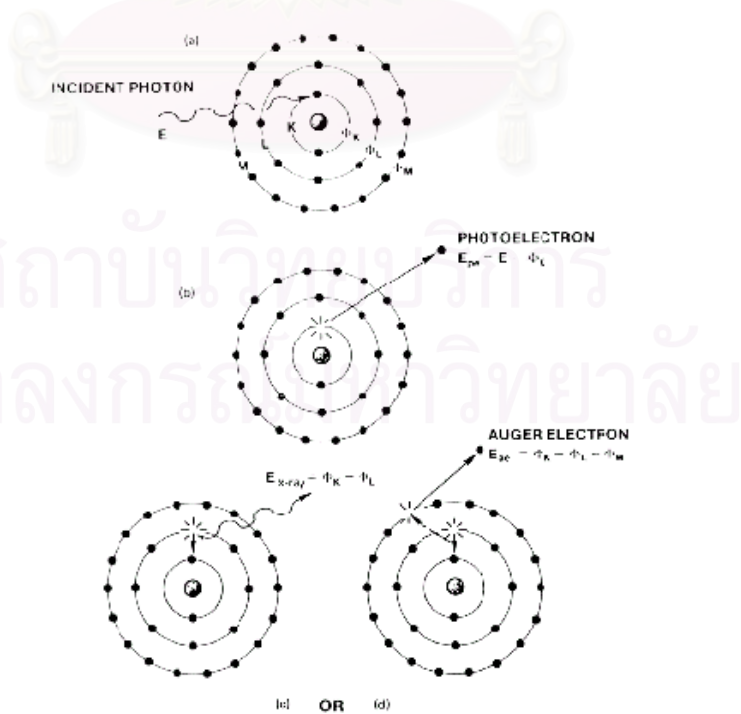
ถ้าพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\mu$  กับพลังงานของรังสีเอกซ์ตามรูป จะเห็นว่า ในบางช่วงพลังงานอะตอมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสูงขึ้นอย่างฉับพลัน ซึ่งค่าพลังงานเหล่านี้จะตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) หรือพลังงานไอออนไนเซชัน (Ionization energy) ของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรพอดี เราเรียกตำแหน่งเหล่านี้ว่า “absorption edge” เช่น K-absorption edge (มักเขียนย่อ เป็น  $K_{ab}$ ) L-absorption edge (มี 3 ค่า  $L_{Iab}$ ,  $L_{IIab}$  และ  $L_{IIIab}$ ) ค่า absorption edge ของธาตุจะมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอม

## 2.2.1 การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric absorption)

การดูดกลืนในลักษณะนี้ เกิดจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนไว้ทั้งหมด และทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกไปจากอะตอม อะตอมจึงสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Ion) ส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากอะตอมเรียกว่า “โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)” เนื่องจากอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสอยู่ในชั้นพลังงานยึดเหนี่ยวต่างกัน หากอิเล็กตรอนชั้นในๆ (ชั้น K หรือชั้น L) ดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและหลุดออกจากอะตอมก็จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกๆ ลำดับถัดไป ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าก็จะเข้าไปแทนที่ที่ว่างนั้น พร้อมปลดปล่อยพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรนั้น ดังสมการ ต่อไปนี้

$$E_{pe} = E - \phi_k \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

- เมื่อ  $E_{pe}$  คือ พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน  
 $E$  คือ พลังงานของโฟตอนที่เข้าชน  
 $\phi_k$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ชั้นวงโคจรนั้น ๆ



รูปที่ 2.3 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก<sup>[5]</sup>

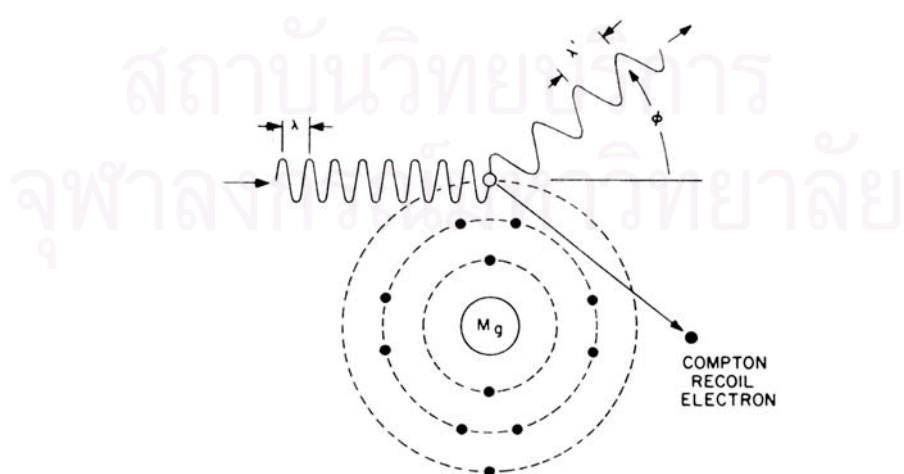
โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนั้น จะมีค่าลดลงเมื่อตัวกลางเป็นธาตุเบา และพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนมีค่าสูงขึ้น

### 2.2.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตัน หรือ incoherent scattering เกิดจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) การชนแบบนี้รังสีเอกซ์จะสูญเสียพลังงานไปบางส่วน ในการชนให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม รังสีเอกซ์ที่เหลือจะมีพลังงานลดลงและทิศทางเปลี่ยนแปลงไปด้วย การกระเจิงแบบนี้เกิดได้มากในธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำเพราะอิเล็กตรอนดึงดูดกับนิวเคลียสไม่แน่นมาก เมื่อชนอิเล็กตรอนจึงหลุดออกไปได้ง่าย โดยผลรวมของพลังงานระหว่างคอมป์ตันอิเล็กตรอนกับโฟตอนที่กระเจิงออกไปจะมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนเริ่มต้นที่เข้าชน พลังงานของโฟตอนที่เกิดการกระเจิงมีความสัมพันธ์กับพลังงานของโฟตอนที่เข้าชน ดังสมการที่ 2.7

$$E' = \frac{E}{\left[1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \phi)\right]} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

- เมื่อ  $E'$  คือ พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงออกไป ในหน่วย keV
- $E$  คือ พลังงานของโฟตอนที่เข้าชน ในหน่วย keV
- $\phi$  คือ มุมที่โฟตอนกระเจิงออกไปจากแนวเดิม
- $m_0$  คือ มวลของอิเล็กตรอน ( $9.11 \times 10^{-28}$  g)
- $c$  คือ ความเร็วแสง ( $3.0 \times 10^{10}$  cm/sec)



รูปที่ 2.4 การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน<sup>[5]</sup>

เมื่อมุมของการกระเจิงเปลี่ยนไปจะทำให้ค่าพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงออกมามีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยตามสมการที่ 2.7

โอกาสในการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโฟตอนที่เข้าชนมีพลังงานสูงขึ้นจนถึงช่วงพลังงานประมาณ 100 keV ตัวกลางที่ถูกระเจิงมีเลขอะตอมต่ำลง และมุมที่ตกกระทบมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้นจะเกิดขึ้นเป็นอันตรกิริยาหลักก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนมีค่าสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน การกระเจิงแบบคอมป์ตันนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์เนื่องจากจะก่อให้เกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำมากกว่าว่ารังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่รวมกันในสเปกตรัม

### 2.2.3 การกระเจิงแบบเรย์เลห์ (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบเรย์เลห์ หรือ coherent scattering เกิดจากการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ซึ่งไม่มีการสูญเสียพลังงานของรังสีเอกซ์แต่ทิศทางจะเปลี่ยนไป การกระเจิงแบบนี้เกิดได้มากในธาตุที่มีเลขอะตอมสูงเพราะอิเล็กตรอนดึงดูดนิวเคลียสไว้แน่นทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนไปได้ยาก

### 2.2.4 แพร่โปรดัคชัน (Pair production)

การเปลี่ยนแปลงจากพลังงานของโฟตอนกลายเป็นมวล จะเกิดกับโฟตอนที่มีพลังงานสูง (สูงกว่า 1.022 MeV) วิ่งเข้ามาในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส โฟตอนจะถูกทำลายไปและมีอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนเกิดขึ้น ทั้งอิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะวิ่งไปในตัวกลางจนพลังงานเหมาะสมก็จะถูกทำลายไป เกิดเป็นโฟตอน 2 กลุ่มโฟตอนที่มีพลังงานกลุ่มโฟตอนละ 0.511 MeV วิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม

## 2.3 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่นิยมใช้สำหรับระบบวิเคราะห์แบบเรืองรังสีเอกซ์แบ่งออกได้เป็นสองแบบ ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไอโซโทปรังสี (X-ray isotopic source) การประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิแต่ละแบบขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมในการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ระบบวิเคราะห์แบบเรืองรังสีเอกซ์ที่ต้องการให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าพลังงานและความเข้มของรังสีเอกซ์ได้สำหรับการวิเคราะห์ก็จะใช้ต้น

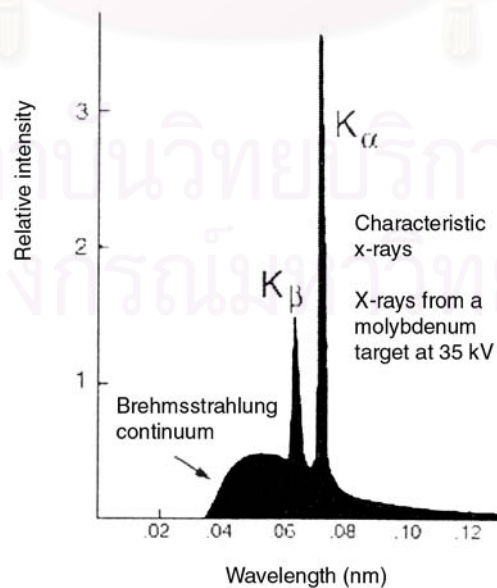
กำเนิดรังสีเอกซ์แบบหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แต่ถ้าลักษณะของการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงพลังงานของรังสีเอกซ์และในขณะเดียวกันต้องการขนาดของเครื่องมือที่มีขนาดเล็กก็จะใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไอโซโทปรังสีเป็นต้น

### 2.3.1 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

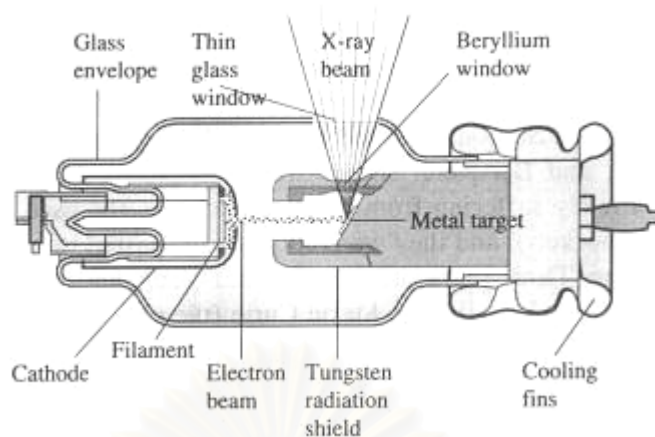
หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ จะมีหลักการโดยทั่วไปในการสร้างรังสีเอกซ์ คือ การเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงภายในหลอดสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปชนเป้า (Target) ซึ่งเป็นส่วนของขั้วแอโนด จากนั้นรังสีเอกซ์จะถูกปลดปล่อยออกมาจากเป้านั้น

โดยส่วนใหญ่แล้วหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆที่สำคัญได้แก่ หลอดที่เป็นสุญญากาศซึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจะเคลื่อนที่อยู่ภายในหลอดนี้ โครงสร้างของขั้วแคโทดประกอบด้วยส่วนที่เป็นไส้หลอด (Filament) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน โครงสร้างของขั้วแอโนดประกอบด้วยส่วนที่เป็นเป้า ซึ่งทำมาจากโลหะที่มีประสิทธิภาพสูงในการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

รังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์นั้น ประกอบไปด้วยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของวัสดุที่นำมาทำเป็นเป้า ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะสเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจากหลอดรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

### 2.3.2 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไอโซโทปรังสี<sup>61</sup>

ต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ต้นกำเนิดรังสีที่ให้โฟตอนพลังงานต่ำ (Low energy photon source) ต้นกำเนิดรังสีประเภทอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (Electron capture source) และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous x-ray source หรือ Bremsstrahlung source)

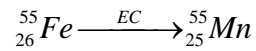
#### 2.3.2.1 ต้นกำเนิดรังสีที่ให้โฟตอนพลังงานต่ำ

ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้เป็นประเภทธาตุกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเอกซ์และ/หรือรังสีแกมมา

#### 2.3.2.2 ต้นกำเนิดรังสีประเภทอิเล็กตรอนแคปเจอร์

ต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่นิวเคลียสของอะตอมมีโปรตอนมากเกินไป (Proton excess) จึงมีการลดจำนวนโปรตอนลงโดยการจับเอาอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้น K เข้าไป (เรียกว่า K-capture) เพื่อไปรวมกับโปรตอนแล้วกลายเป็นนิวตรอน ภายหลังการเกิดอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (Electron capture, E.C) จะได้นิวไคลด์ใหม่ซึ่งเป็นไอโซบาร์ (Isobar) กับนิวไคลด์เดิม คือมีเลขมวลเท่าเดิม แต่มีจำนวนโปรตอนลดลงไป 1 ตัว (เลขอะตอมลดลง 1) เมื่อมี

อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K ขาดหายไป อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอก จะเข้าไปแทนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของนิวไคลด์ตัวใหม่ขึ้น เช่น



จากสมการข้างบนนี้จะได้รับรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของแมงกานีส

### 2.3.2.3 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ประเภทนี้ เป็นต้นกำเนิดรังสีที่สร้างขึ้นด้วยการผสมระหว่างต้นกำเนิดรังสีเบตาที่เสถียร (Stable) ชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้าเพื่อให้เกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ไรต์ริเดียม (Tritium,  ${}^3\text{H}$ ) เป็นต้นกำเนิดรังสีเบตาผสมกับเซอร์โคเนียม (Zirconium, Zr) ซึ่งจะเขียนสัญลักษณ์ของต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้เป็น  ${}^3\text{H}/\text{Zr}$  ต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “beta-excited x-ray source”

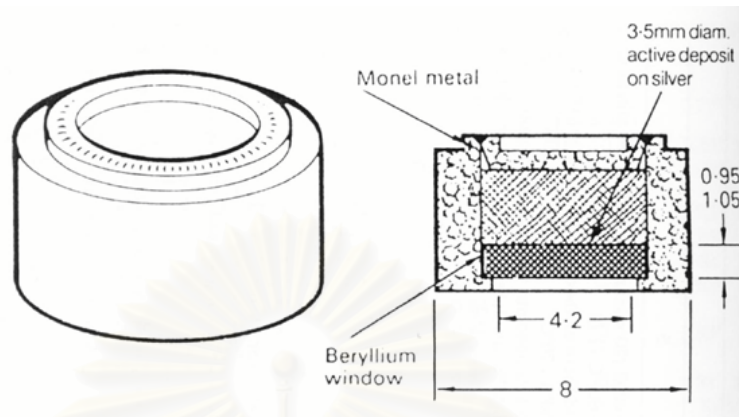
ความเข้มรังสีที่ได้จากต้นกำเนิดรังสีประเภทไอโซโทปรังสีนั้น ขึ้นอยู่กับกัมมันตภาพ (Activity) หรือความเข้มรังสี ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วงความเข้มเป็นมิลลิวูรี (mCi) ความเข้มรังสีจะมีค่าลดลงตามค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ส่วนพลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกมาเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของธาตุกัมมันตรังสีแต่ละชนิด การเปลี่ยนแปลงพลังงานของรังสีปฐมภูมิทำได้โดยการเปลี่ยนชนิดของธาตุกัมมันตรังสี

ลักษณะของต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปรังสีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีการออกแบบรูปร่างอยู่ 2 ลักษณะ คือ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

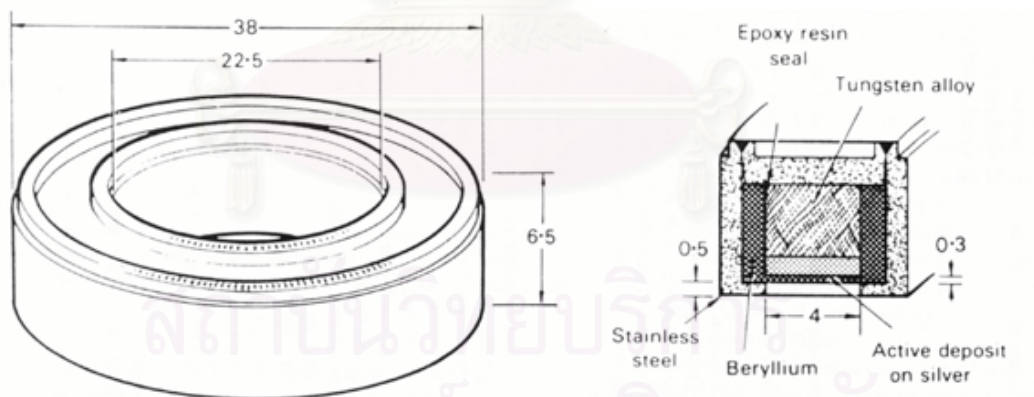


ก. Point or Disc source เป็นทรงกระบอกขนาดเล็กหรือแบบคล้ายเหรียญ มีรังสีผ่านออกได้ด้านเดียว



รูปที่ 2.7 ลักษณะต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปชนิด Point Source<sup>[7]</sup>

ข. Annular or Ring source เป็นแบบวงแหวน มีสารกัมมันตรังสีจําอยู่ด้านหนึ่งของวงแหวน



รูปที่ 2.8 ลักษณะต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปชนิดวงแหวน (Annular Source)<sup>[7]</sup>

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทป<sup>[4]</sup>

Radioisotope	Half-life (years)	Photon Energy in keV (%)	Elements Excited	
			K X-rays	L X-ray
<sup>55</sup> Fe	2.7	5.9-6.5 Mn K X-rays (28.5%)	Al-V	-
<sup>238</sup> Pu	86	13.6-20 U L X-rays (13%)	Ti-As	Nd-Bi
<sup>244</sup> Cm	17.6	14-21 Pu L X-rays (10%)	Ti-As	Nd-Bi
<sup>109</sup> Cd	1.3	22-25 Ag K X-rays (107%)	Ti-Mo	Nd-U
		88 gamma-ray (4%) <sup>0</sup>	Tm-Pb	-
<sup>241</sup> Am	458	13.7-20.8 Np L X-rays (37%)	Ti-Br	-
		59.5 gamma-ray (37%)	As-Tm	-
<sup>57</sup> Co	0.74	122 gamma-ray (89%)	Nd-U	-
		136 gamma-ray (8.8%)	Nd-U	-

## 2.4 หัววัดรังสีเอกซ์

โดยทั่วไปหัววัดรังสีที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดบรรจุก๊าซ (Gas-filled detector) หัววัดชนิดเรืองรังสี (Scintillation detector) และหัววัดชนิดกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

### 2.4.1 หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดบรรจุก๊าซ (Gas-filled detector)

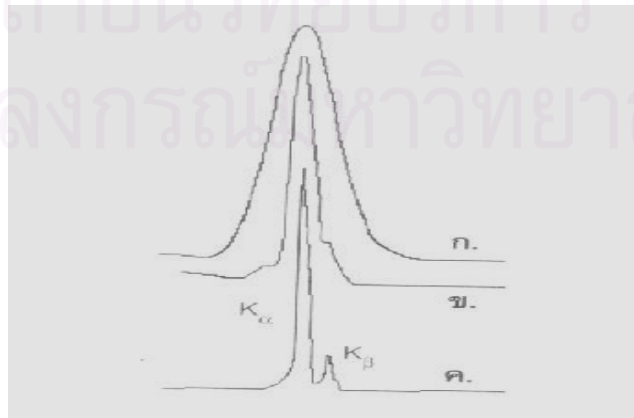
หัววัดชนิดนี้ใช้ก๊าซเป็นตัวกลางในการทำอันตรกิริยากับรังสี โดยอาศัยหลักการแตกตัวเป็นประจุ (Ionization) ของก๊าซ เมื่อโฟตอนเข้าชนกับอะตอมของก๊าซโฟตอนนั้นจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในชั้นวงโคจรทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจรพร้อมกับพลังงานจลน์ที่ได้รับจากโฟตอนและเคลื่อนที่ชนกับอะตอมของก๊าซอื่นๆ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นคู่ประจุ (Electron-hole Pair) ซึ่งจำนวนคู่ประจุที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีคู่ประจุที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดและแอโนดของหัววัดรังสีเกิดเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาพลังงานและความเข้มของรังสีได้ หัววัดที่นิยมใช้ได้แก่ gas proportional counter ที่บรรจุก๊าซอาร์กอน (Argon, Ar) ซีโนน (Xenon, Xe) คริปทอน (Krypton, Kr) หรือมีเทน (Methane, CH<sub>4</sub>) หัววัดชนิดนี้มีความสามารถในการแยกวัดพลังงานปานกลาง คือ มีค่า resolution ประมาณ 16 % ที่ 5.9 keV

#### 2.4.2 หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดเรืองรังสี (Scintillation detector)

หัววัดชนิดนี้จะอาศัยอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับอะตอมของตัวกลาง ทำให้เกิดการเรืองแสงของตัวกลางขึ้น โดยอันตรกิริยาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกที่เกิดจากรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมของตัวกลางแล้วทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้น ซึ่งโฟโตอิเล็กตรอนนี้จะไปทำอันตรกิริยากับอะตอมของสารเรืองแสง (Phosphor Atom) และให้โฟตอนแสงออกมา ความเข้มของโฟตอนแสงที่ปล่อยออกมาจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าทำอันตรกิริยาด้วย หัววัดที่ใช้งานได้แก่หัววัด NaI(Tl) ซึ่งโดยทั่วไปมีความสามารถในการแยกวัดพลังงานได้ไม่ดัดนัก คือจะมีค่า resolution ประมาณ 52 % ที่ 5.9 keV

#### 2.4.3 หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

หัววัดชนิดนี้จะใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำในการทำอันตรกิริยากับรังสี โดยอาศัยหลักการแตกตัวเป็นประจุภายในบริเวณดีพลีชัน (Depletion region) หรือที่เรียกว่าบริเวณแอคทีฟโวลุ่ม (Active Volume) เมื่อโฟตอนผ่านเข้าสู่บริเวณแอคทีฟโวลุ่มของผลึกจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำ พลังงานของโฟตอนจะถ่ายเทให้กับโฟโตอิเล็กตรอนซึ่งจะไปไอออไนซ์อะตอมอื่นๆทำให้เกิดคู่ประจุขึ้นตลอดทางที่โฟโตอิเล็กตรอนวิ่งไปจนหมดพลังงาน คู่ประจุที่ถูกสร้างขึ้นมาจะถูกดึงไปที่ขั้วแคโทดและแอโนดจากสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการไบอัสที่หัววัด จำนวนประจุที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามาทำอันตรกิริยาภายในหัววัดความสามารถในการแยกวัดพลังงานของหัววัดชนิดนี้จะดีที่สุด คือ มีค่า resolution ประมาณ 2.7 % ที่ 5.9 keV หัววัดชนิดกึ่งตัวนำที่ใช้วัดรังสีเอกซ์ มี 2 ชนิด คือ Si(Li) และ HPGe (High purity germanium or Hyperpure germanium) ชนิดหลังนี้ใช้สำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานสูง



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบการแยกพิคของหัววัด 3 ชนิด

ก.แบบเรืองรังสี ข.แบบบรรจุก๊าซ ค.แบบกึ่งตัวนำ

## 2.5 ส่วนของระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบ Non-dispersion และแบบ Dispersion

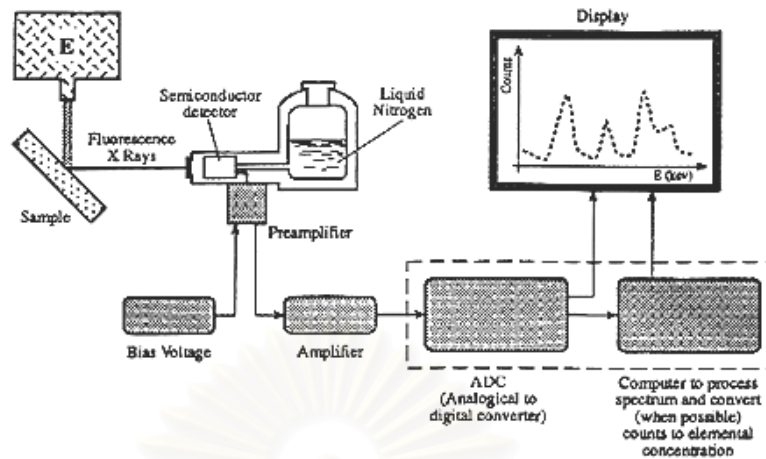
### 2.5.1 Non-dispersion

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบนี้ประกอบด้วย

- ก. หัววัดรังสีเอกซ์ (x-ray detector)
- ข. ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier)
- ค. ภาคขยายหลัก (amplifier)
- ง. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (analyzer)

หัววัดรังสีเอกซ์ ทำหน้าที่วัดรังสีเอกซ์เรืองจากตัวอย่างโดยตรง ความสามารถในการแยกพลังงาน (Energy resolution) จึงขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัดที่ใช้ สัญญาณจากหัววัดรังสีเอกซ์จะถูกแปลงรูป และขยายโดยภาคขยายส่วนหน้าและภาคขยายหลัก เพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องวิเคราะห์ เครื่องวิเคราะห์จะทำหน้าที่แยกนับรังสีเอกซ์ในแต่ละช่วงพลังงาน จากสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรือง จะทำให้สามารถทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ และโดยทั่วไปเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะเป็นเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel analyzer, MCA) บางกรณีอาจใช้เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว (Single channel analyzer; SCA)

วิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์แบบ Non-dispersion เรียกอีกอย่างว่า “Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analysis” หรือเรียกว่า “EDX” หรือ “EDXRF” หรือ “EDXRA”



รูปที่ 2.10 แผนผังการจัดระบบวิเคราะห์ EDX

### 2.5.2 Dispersion

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ประกอบด้วย

- ก. ผลึกเดี่ยว (single crystal)
- ข. หัววัดรังสีเอกซ์
- ค. ภาชนะยาสวนหน้า
- ง. ภาชนะยาสหลัง
- จ. เครื่องนับสัญญาณ (counter)

ผลึกเดี่ยวเป็นผลึกชนิด Simple crystal เช่น ผลึก LiF (Lithium fluoride) NaCl (Sodium chloride) ทำหน้าที่สะท้อนแยกพลังงานของรังสีเอกซ์เรื่องที่เกิดกระทบผลึก ตามหลักการของคลื่นสร้างเสริมและคลื่นหักล้าง (Constructive and destructive interference) คลื่นที่สะท้อนออกจากผลึกจะเสริมกันเมื่อค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) รังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบหรือมุมสะท้อนตามกฎของ Bragg ดังนี้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมของผลึก

$\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์

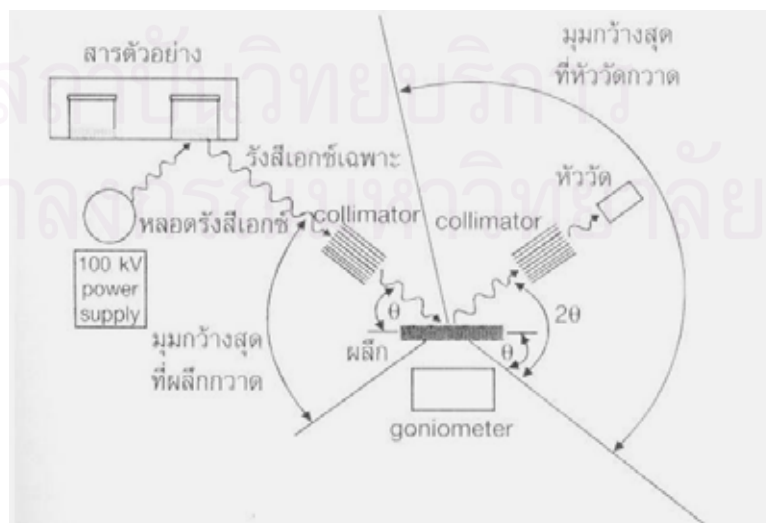
$n$  คือ ค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวก 1, 2, 3, ....

ความยาวคลื่นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ตามสมการ คือ มีค่าเท่ากับ  $2d$  นั่นก็หมายความว่าในการวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำจะต้องใช้ผลึก ซึ่งมีค่า  $d$  มาก และในการวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงๆ จะต้องใช้ผลึกที่มีค่า  $d$  น้อย

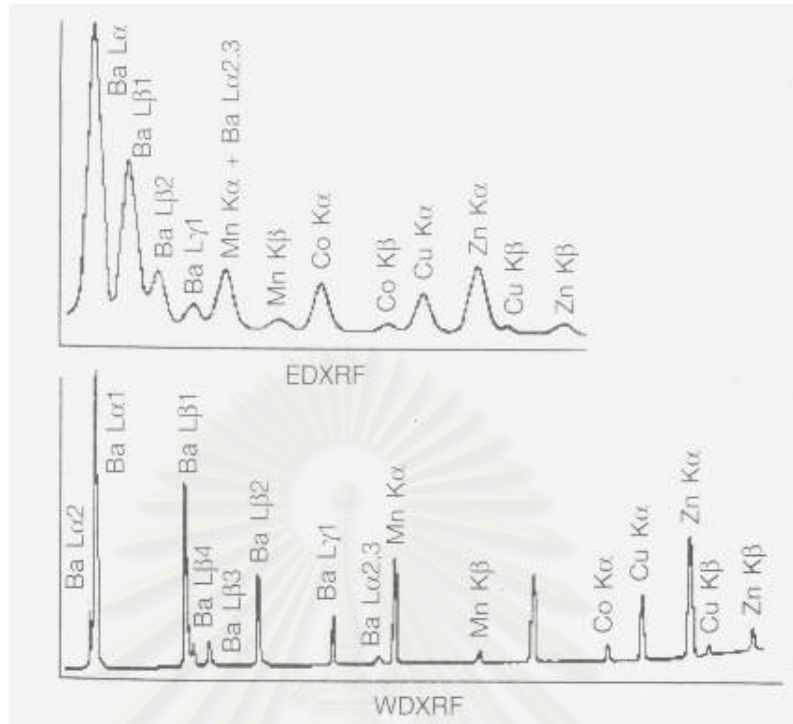
จากความสัมพันธ์ของ  $\lambda$  และ  $\theta$  ตามสมการ 2.8 จะเห็นได้ว่ารังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเป็น 2, 3, 4, ... เท่าของ  $\lambda$  จะเกิดคลื่นเสริมที่มุม  $\theta$  เดียวกันได้ เรียกว่า “Harmonic overlap” ตัวอย่างเช่น  $P K_{\alpha}$  มี  $\lambda = 6.16 \text{ \AA}$  และ  $Ca K_{\beta}$  มี  $\lambda = 3.09 \text{ \AA}$  จะเกิดคลื่นเสริมที่มุมใกล้เคียงกันได้

หัววัดรังสีหน้าทีเคลื่อนที่ไปรับรังสีเอกซ์ที่แยกความยาวคลื่นโดยผลึกแก้ว ผลึกจะหมุนเพื่อเปลี่ยนมุมที่รังสีเอกซ์เรื่องตกกระทบ โดยมีหัววัดหมุนตามไปรับรังสีตามมุมที่สอดคล้องกัน ดังนั้นหัววัดรังสีที่ใช้จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีคุณสมบัติในการแยกพลังงานได้อย่างเช่นที่ใช้ในแบบ non-dispersion หัววัดรังสีที่ใช้ส่วนใหญ่จึงเป็นชนิด NaI(Tl) แบบบาง และ gas proportional counter เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้หัววัดรังสีที่มีคุณสมบัติในการแยกพลังงานได้ดีมากอย่างหัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ

ในเมื่อผลึกเป็นตัวแยกพลังงานให้หัววัดรังสี ดังนั้นสัญญาณจากหัววัดรังสีที่ผ่านภาคขยายส่วนหน้าและภาคขยายหลัก แล้วจึงถูกส่งไปยังเครื่องนับได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแยกพลังงาน วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีเรอรังสีเอกซ์แบบ Dispersion นี้มักเรียกว่า “Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Analysis” เรียกย่อว่า “WDX” หรือ WDXRF” หรือ “WDXRA”



รูปที่ 2.11 แผนผังการจัดระบบวิเคราะห์ WDX



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบสเปกตรัม EDXRF และ WDXRF

## 2.6 เทคนิคการวิเคราะห์

### 2.6.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อค้นหาที่เป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นั้นสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและง่าย โดยระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์อาจเป็น EDXRF เนื่องจากระบบนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ทำให้สามารถจัดแบ่งช่องรับสัญญาณให้ครอบคลุมช่วงพลังงานกว้างๆได้ ด้วยเหตุนี้ การตรวจวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าสู่หัววัดรังสี จึงสามารถกระทำได้พร้อมๆกันหลายๆระดับพลังงาน แต่มีข้อเสียคือ มีปัญหาในการเกิดการซ้อนกันของสเปกตรัมที่มีพลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีขีดจำกัดในด้านความสามารถในการแยกพลังงานรังสี ส่วนระบบ WDXRF นั้น ระบบจะมีความยุ่งยากกว่า แต่มีข้อดีคือ สามารถแยกพลังงานรังสีเอกซ์ได้ดีกว่าระบบ EDXRF เพราะผลึกวิเคราะห์สามารถแยกพลังงานได้ดีกว่าการแยกพลังงานของหัววัด โดยเฉพาะในช่วงพลังงานรังสีเอกซ์ต่ำกว่า 20 keV ลงไป

## 2.6.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การวิเคราะห์ปริมาณด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นั้น เป็นการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการดูดกลืนและการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของธาตุชนิดต่างๆ เพื่อจะได้ช่วยในการแก้ไขและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ให้ถูกต้องแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะผันแปรไปตามความเข้มของธาตุที่สนใจและธาตุอื่นที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่างด้วย ผลจากแมทริกซ์ (Matrix effect) ที่สำคัญมี 2 แบบ ที่ควรทราบ คือ

1. ผลการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Absorption effect) เมื่อส่วนประกอบของตัวอย่างเปลี่ยนไป ย่อมทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจะมีผลต่อการดูดกลืนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและการดูดกลืนรังสีเอกซ์รองที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่าง ซึ่งจะมีผลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนาของสารตัวอย่าง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass absorption coefficient) ของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ถ้าเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของ  $Fe K_{\alpha}$  ใน Fe-Al กับใน Fe-Ag จะพบว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากัน เหล็กที่อยู่ใน Fe-Al จะให้ความเข้มของ  $Fe K_{\alpha}$  ออกมามากกว่า เนื่องจาก Fe-Al มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์น้อยกว่า Fe-Ag นั่นเอง

2. ผลการเสริมให้รังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น (Enhancement effect) เกิดขึ้นจากการที่รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่าง (Matrix Element) มีพลังงานสูงกว่า absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ดังนั้นธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งมี absorption edge ต่ำกว่าพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นส่วนประกอบนั้น สามารถที่จะถูกกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เรืองได้ด้วยอีกทางหนึ่งนอกเหนือจากถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว ปรัชญาการเช่นนี้จะมีผลมากในกรณีที่พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่างสูงกว่า absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เพียงเล็กน้อย ผลที่เกิดจากแมทริกซ์นี้ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์มากกว่าที่เป็นจริง

ตัวอย่างที่แสดงผลของแมทริกซ์ในด้านการเสริมให้รังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น เช่น ในสารตัวอย่างที่ประกอบด้วยธาตุ Cr, Fe และ Ni แสดงดังตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 แสดงค่า  $K_{ab}$  และ  $K_{\alpha}$  ของธาตุโครเมียม เหล็ก และนิกเกิล<sup>[8]</sup>

	$K_{ab}$ (keV)	$K_{\alpha}$ (keV)
Cr	5.989	5.414
Fe	7.112	6.40
Ni	8.33	7.477

ถ้าต้องการหาปริมาณของธาตุทั้งสาม พลังงานของรังสีเอกซ์ที่จะทำให้ธาตุทั้งสามเกิดการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ จะต้องมีพลังงานมากกว่า  $K_{ab}$  คือ 8.33 keV

เมื่อ Ni ให้รังสีเอกซ์  $K_{\alpha}$  มีพลังงาน 7.477 keV ถ้าวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้เทียบกับสารมาตรฐาน ก็จะหาปริมาณได้ แต่จะเห็นว่าพลังงานของ Ni  $K_{\alpha}$  สูงกว่า  $K_{ab}$  ของ Fe (7.112 keV) และ Cr (5.989 keV) รังสีเอกซ์ที่เกิดจากธาตุ Ni นี้ จะถูกดูดกลืนได้ด้วยธาตุ Fe และ Cr เมื่อเป็นเช่นนี้ ปริมาณของรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากธาตุ Ni จะน้อยกว่าปกติ เป็นผลของแมทริกซ์

สำหรับการหาปริมาณของ Fe นั้น ผลของแมทริกซ์จะเป็นได้ทั้งเกิดการดูดกลืนจากธาตุ Cr และเกิดการเสริมรังสีเอกซ์จากธาตุ Ni ผลการวิเคราะห์จะผิดพลาดมากขึ้นอยู่กับปริมาณของ Cr และ Ni และค่า  $\mu_m$  ของธาตุทั้งสองด้วย ถ้าหากการดูดกลืนมีมากกว่าการเสริม ผลการวิเคราะห์จะได้น้อยกว่าที่เป็นจริง แต่ถ้าการเสริมมีมากกว่าการดูดกลืน ผลการวิเคราะห์จะได้สูงกว่าที่เป็นจริง

แต่การหาปริมาณของ Cr พลังงานของ  $K_{\alpha}$  จากธาตุ Ni และ Fe ยังสูงกว่า  $K_{ab}$  ของ Cr ดังนั้น  $K_{\alpha}$  ของธาตุทั้งสองนี้จะช่วยเสริมให้เกิด Cr  $K_{\alpha}$  มากขึ้น ฉะนั้นเกิดได้เฉพาะการเสริมรังสีเอกซ์เท่านั้นที่เป็นผลของแมทริกซ์

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่างกับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารมาตรฐาน โดยความเข้มที่เกิดจากธาตุนั้นจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนและการปลดปล่อยของรังสีเอกซ์ของธาตุนั้น รวมทั้งธาตุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของสารต่างๆหรือเรียกว่า “Matrix Element” ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องแก้ไขหรือลดผลจากผลของแมทริกซ์นี้ ทำให้ในทางปฏิบัติมีเทคนิคการวิเคราะห์เชิงปริมาณหลายวิธี

เช่น Comparison-standard method, Thin film technique, Dilution technique, Standard addition technique, Internal standard technique, Scatter correction และ Mathematical correction

เทคนิคในการวิเคราะห์เชิงปริมาณต่างๆเหล่านี้ การเตรียมสารตัวอย่างจะต้องเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของอนุภาคจะต้องละเอียดมากๆ และผิวหน้าจะต้องเรียบ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดในการวิเคราะห์บางเทคนิค ดังนี้

### 1. วิธีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน (Comparison-standard method)

วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยการทำกราฟมาตรฐาน (calibration) จากการใช้สารมาตรฐานซึ่งมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน หรืออาจใช้วิธีเปรียบเทียบกันโดยตรงดังสมการที่ 2.9

$$\frac{I_x}{I_s} = \frac{C_x}{C_s} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ  $I_x$  และ  $I_s$  เป็นความเข้มของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน  
 $C_x$  และ  $C_s$  เป็นความเข้มข้นของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

### 2. วิธี Dilution (Dilution Technique)

วิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันทั่วไปเพื่อลดผลของเมทริกซ์ โดยใช้วิธีทำให้สารมาตรฐานและสารตัวอย่างเจือจางด้วยการเติมตัวทำละลาย (solvent) หรือ diluent ลงไป สารพวกนี้ จะมีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ต่ำ เช่น  $\text{LiCo}_3$  หรืออาจใช้วิธีหลอมสารตัวอย่างกับฟลักซ์ เช่น พวกรบแรกซ์ คาร์บอนเนต หรือ ไพโรซิลเฟต ดังนั้น

$$\lim_{W_u \rightarrow 0} \mu_{\text{sample}} = \mu_{\text{sovent}} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

เมื่อ  $W_u$  คือ weight fraction ของสารตัวอย่าง  
 $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของ linear absorption coefficient ของสารตัวอย่างและตัวทำละลายที่ความยาวคลื่นกำหนดให้

### 3. วิธีการเติมมาตรฐาน (Standard Addition technique)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ใช้วิธีเติมมาตรฐานลงไปในส่วนตัวอย่าง โดยธาตุที่เติมลงไปจะเป็นชนิดเดียวกันกับธาตุที่จะวิเคราะห์ เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เพิ่มขึ้นเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวก่อนเติมมาตรฐาน แล้วนำค่ามาคำนวณดังสมการ

$$\frac{I_X}{I_{X+\Delta X}} = \frac{C_X}{DC_X + C_{\Delta X}} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

- เมื่อ  $C_X$  คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ  
 $I_X$  คือ ความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่สนใจ  
 $D$  คือ dilution factor ซึ่งเท่ากับ  
 น.น.ตัวอย่าง / (น.น.ตัวอย่าง+น.น.สารมาตรฐานที่เติม)  
 $C_{\Delta X}$  คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจจากสารมาตรฐานที่เติมลงไป ซึ่งเท่ากับ  
 น.น.ของธาตุที่เติมลงไป / (น.น.ตัวอย่าง+น.น.ของสารมาตรฐานที่เติม)

### 4. วิธีการเติมมาตรฐานข้างเคียง (Internal Standard technique)

เป็นเทคนิคที่เติมมาตรฐานคนละธาตุกับธาตุที่สนใจลงไปในส่วนตัวอย่าง ธาตุที่เติมลงไปเป็น internal standard ปกติจะเติมธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่าหรือน้อยกว่าธาตุที่สนใจอยู่หนึ่งลงไป การคำนวณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจสามารถหาได้จาก

$$C_A = C_{IS} \left( \frac{1}{D} \right) \left( \frac{I_{IS}}{I_A} \right)_{std} \left( \frac{I_A}{I_{IS}} \right)_{sam} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

- เมื่อ  $C_A$  คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ  
 $C_{IS}$  คือ ความเข้มข้นของ internal standard ในตัวอย่าง  
 $(I_{IS} / I_A)_{std}$  คือ intensity correction factor เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ของ internal standard ต่อความเข้มรังสีเอกซ์ของธาตุที่สนใจ เมื่อ internal standard กับธาตุที่สนใจมีความเข้มข้นเท่ากัน  
 $(I_A / I_{IS})_{sam}$  คือ ส่วนระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ของธาตุที่สนใจต่อความเข้มรังสีเอกซ์ของ internal standard ในตัวอย่าง

## 5. วิธี scatter correction

สารตัวอย่างนอกจากจะให้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุแล้ว ยังสามารถทำให้รังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์เกิดการกระเจิงได้ การกระเจิงนี้อาจเป็น coherent นั่นคือ รังสีที่กระเจิงมีพลังงานเท่ากับรังสีเอกซ์เดิม หรืออาจเป็น incoherent ซึ่งรังสีที่กระเจิงนั้นจะมีพลังงานลดลงจากเดิมเล็กน้อย (Compton scatter) การกระเจิงนี้สามารถนำมาใช้แก้ค่าผลของแมทริกซ์ได้ เพราะทั้งรังสีเอกซ์ที่ใช้วิเคราะห์ และรังสีที่กระเจิงต่างก็มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวม (Total mass attenuation coefficient) ของตัวอย่าง เทคนิคนี้ให้ผลดีโดยเฉพาะกับสารตัวอย่างที่มีเลขอะตอมต่ำ

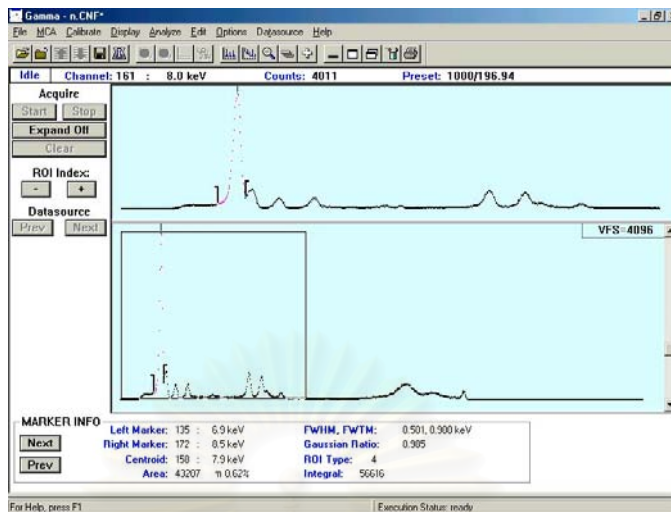
### 2.7 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.7.1 โปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมต่างๆมาช่วยในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสี ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้พัฒนาบนไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในงานวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมได้แก่ GENIE2000 SPEDAC และ WINQXAS โดยโปรแกรมจะแสดงสเปกตรัมบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ การวิเคราะห์ผลของสเปกตรัม รวมถึงการรายงานผลที่ได้จากการวิเคราะห์ มีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

##### 2.7.1.1 Genie-2000

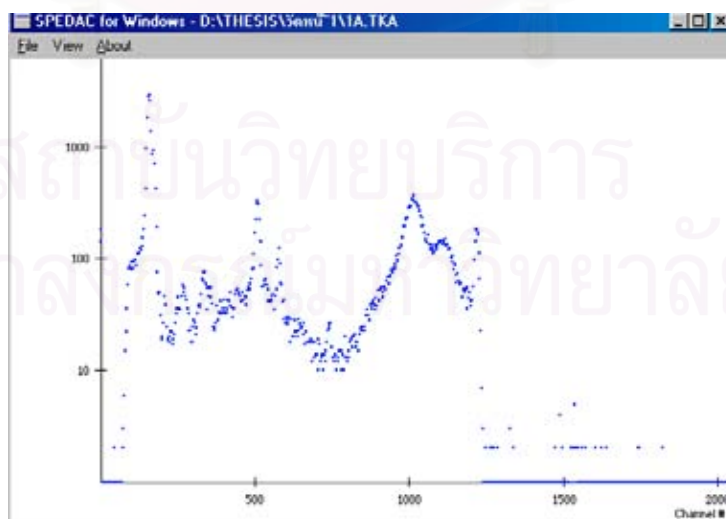
เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบ Windows 95 หรือ Windows NT ของบริษัท CANBERRA โดยจะทำงานร่วมกับ Model DSA-2000 Digital Spectrum Analyzer เป็นอุปกรณ์ที่รวมเครื่องวัดทางนิวเคลียร์ ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง ดิจิตอลซิกแนลโปรเซสเซอร์ (DSP) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage power supply: HVPS) จึงเป็นทั้งระบบวัดและระบบวิเคราะห์รังสี เช่น หาค่าพลังงานจากจุดกึ่งกลางพีค (Energy of the Peak Centroid) หาค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) พื้นที่ใต้พีค (Net Peak Area) เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ (Efficiency Calibration) เปรียบเทียบค่าพลังงาน (Energy Calibration) คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบวัด (Calculation of the Efficiency) และ Gaussian Ratio เป็นต้น



รูปที่ 2.13 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม Genie-2000

### 2.7.1.2 Spectrum reformatting and transfer programs (SPEDAC)

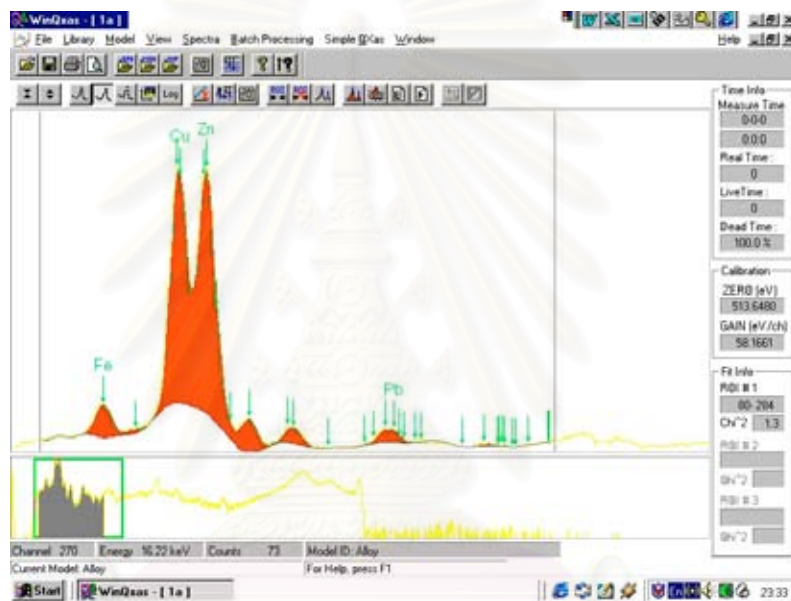
เป็นโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อจัดรูปแบบข้อมูลของสเปกตรัม เนื่องจากรูปแบบไฟล์ในการวิเคราะห์ของโปรแกรม WinQXAS เป็นรูปแบบเฉพาะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม โดยแปลงให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานของ IAEA เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 2.14 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม WinSPEDAC

### 2.7.1.3 WinQXAS

เป็นโปรแกรมที่พัฒนาจาก QXAS (Quantitative x-ray analysis system) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดย IAEA เพื่อใช้วิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ โดยรับข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (MCA) เป็นโปรแกรมที่ปฏิบัติการบน MS DOS โดยพัฒนาให้สามารถใช้งานบน Microsoft Windows ได้ เพื่อสะดวกในการใช้งาน มีความสามารถในการหาพื้นที่ใต้พีค (Net peak area) ในช่วงที่ต้องการทราบค่า (Select ROI) Fit Spectrum ปรับเทียบพลังงาน (Energy Calibration) เพื่อให้ทราบว่าเป็นธาตุชนิดใด และมีปริมาณเป็นสัดส่วนเท่าใด โดยตัวโปรแกรมจะมี x-ray libraries ไว้เป็นฐานข้อมูลประกอบการคำนวณ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม WinQXAS

### 2.7.2 โปรแกรม NBSGSC<sup>[9]</sup>

โปรแกรม NBSGSC เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้นโดย National Bureau of Standards (NBS) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (ปัจจุบัน NBS ได้เปลี่ยนชื่อเป็น “NIST” ซึ่งย่อมาจาก National Institute of Standards and Technology) และ Geological Survey of Canada (GSC) โดยขั้นตอนวิธี (Algorithm) แบบ Comprehensive Lachance (COLA) ในการแก้ผลของแมทริกซ์ ซึ่งมีหลักการดังนี้

ถ้าให้  $C_i$  เป็นความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ

และ  $R_i$  เป็นอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่สนใจในตัวอย่างต่อความเข้มข้นของธาตุที่สนใจเมื่อเป็นธาตุบริสุทธิ์ (ความเข้มข้น 100%)

$$\text{จะได้} \quad C_i = R_i \left( 1 + \sum_j \alpha'_{ij} C_j + \sum_j \sum_k \alpha'_{ijk} C_j C_k \right) \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

เมื่อ  $\alpha'_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์ผลของแมทริกซ์ของธาตุ  $i$  ต่อธาตุ  $j$   
 $\alpha'_{ijk}$  คือ สัมประสิทธิ์ผลของแมทริกซ์ของธาตุ  $j$  และ  $k$  ต่อธาตุ  $i$   
 $C_j$  และ  $C_k$  คือ ความเข้มข้นของธาตุ  $j$  และ  $k$  ตามลำดับ

$$\text{โดยที่} \quad \alpha'_{ij} = \alpha_1 + \frac{\alpha_2 C_m}{1 + \alpha_3 (1 - C_m)} \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

$C_m$  คือ ความเข้มข้นของธาตุอื่นๆทั้งหมดรวมกัน ยกเว้นธาตุ  $i$

$$\therefore C_m = C_j + C_k + \dots$$

$$\alpha'_{ijk} = \frac{1}{C_j C_k} \left[ \frac{C_i}{R_i} - (1 + \alpha'_{ij} C_j + \alpha'_{ik} C_k) \right] \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$\alpha'_{ik}$  คือ สัมประสิทธิ์ผลของแมทริกซ์ของธาตุ  $k$  ต่อธาตุ  $i$

โปรแกรม NBSGSC แบ่งออกเป็นโปรแกรมย่อยที่สำคัญ 4 โปรแกรม ดังนี้คือ

1. CALCO87 เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์แอลฟา ( $\alpha$  Coefficient) โดยวิธีพารามิเตอร์หลักมูล (Fundamental parameter) ด้วยขั้นตอนวิธีแบบ COLA เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาไปใช้ในการคำนวณแก้ค่าความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแมทริกซ์ โปรแกรมนี้มีพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นในการคำนวณ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว และค่าแอมซอร์ปชันเอจ (Absorption edge) ของแต่ละธาตุ ค่าจัมป์เรโซ (Jump ratio) ยีลด์ (Yield) ของรังสีเอกซ์เรืองและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ โดยผู้ใช้สามารถใส่ข้อมูลสเปกตรัมของรังสีปฐมภูมิได้ จากการคำนวณสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ด้วยวิธี NBS หรือ จากการสร้างแฟ้มข้อมูล (Data file) ขึ้นเองตามรูปแบบที่กำหนดให้ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอลฟานี้ CALCO87 ได้แบ่งตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ประเภท คือ ประเภทโลหะ ประเภท

ออกไซด์ และประเภทตัวอย่างที่ทำให้เจือจางโดยการหลอมรวม (Fused) ซึ่งมีความรุนแรงจากผลของแมทริกซ์น้อยลงตามลำดับ

2. COMP87 เป็นโปรแกรมคำนวณความเข้มข้นของธาตุแต่ละธาตุในตัวอย่าง โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาที่ได้จาก CALCO87 ประกอบกับข้อมูลต่างๆของสารมาตรฐานที่ได้จากโปรแกรม STDMAKE และของตัวอย่างจากโปรแกรม UNKMAKE โปรแกรม COMP87 จะทำการคำนวณแก้ค่าผลของแมทริกซ์ในสารมาตรฐานและตัวอย่าง ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบ (Calibration curve) คำนวณผล และแสดงผลความเข้มข้นของธาตุ

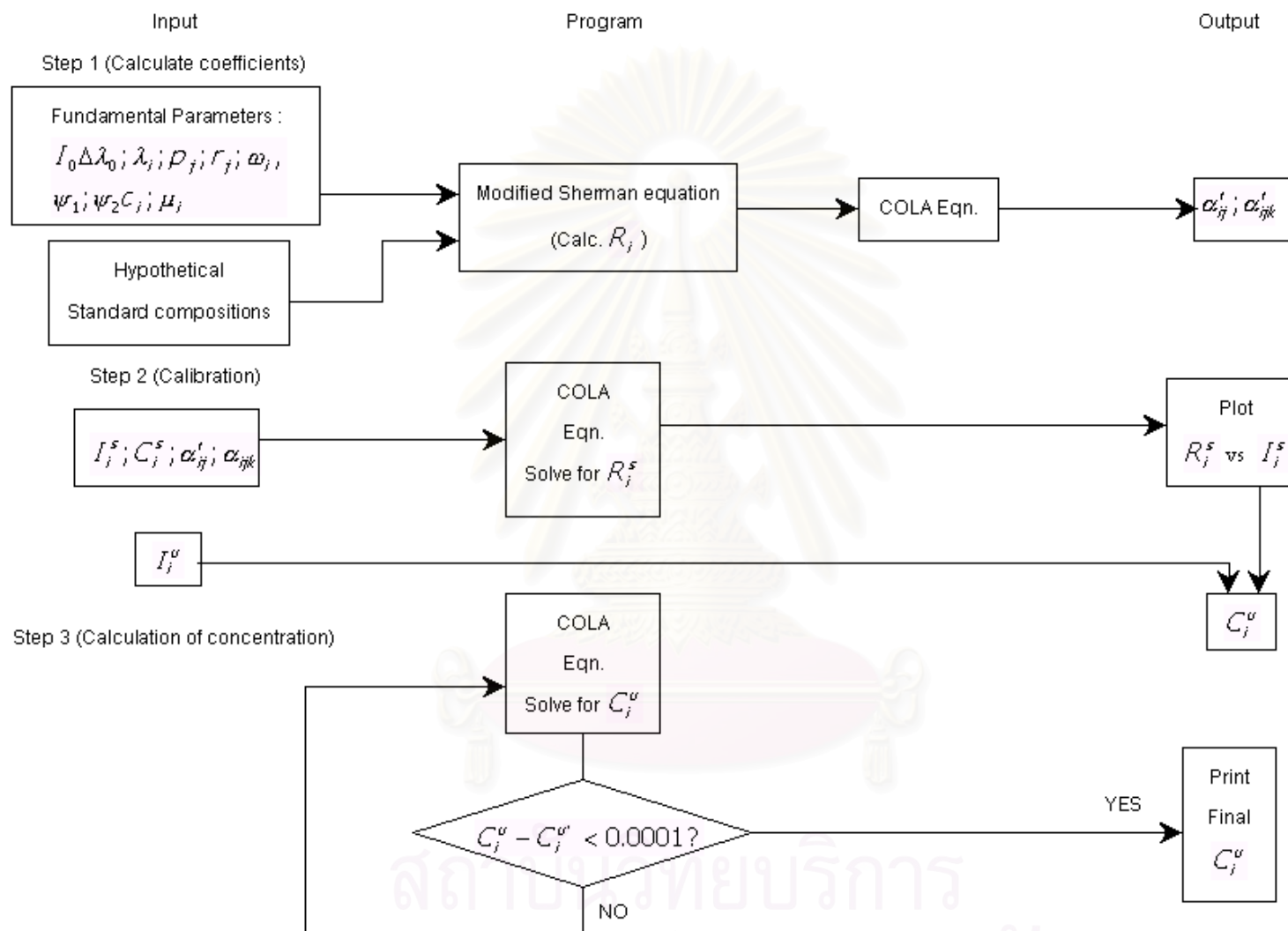
3. STDMAKE เป็นโปรแกรมสำหรับเตรียมข้อมูลต่างๆของสารมาตรฐานที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของธาตุ คือ ชนิดและความเข้มข้นของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ชนิดของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับโปรแกรม COMP87 และ CALCO87 รวมทั้งความเข้มข้นของธาตุเฉพาะตัวของธาตุที่สามารถจัดได้

4. UNKMAKE เป็นโปรแกรมสำหรับเตรียมข้อมูลของตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นของธาตุเฉพาะตัวของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ให้สอดคล้องกับโปรแกรม COMP87, CALCO87 และ STDMAKE

นอกจากนี้โปรแกรม NBSGSC ยังมีโปรแกรมอื่นๆที่ให้ผู้ใช้งานสะดวกยิ่งขึ้นในบางกรณี เช่น QC87 สำหรับใช้แทน COMP87 เมื่อเงื่อนไขการวิเคราะห์เป็นเงื่อนไขปกติ SDCC สำหรับปรับค่าความเข้มข้นของธาตุเฉพาะตัวอย่างที่มีความหนาไม่ถึงความหนาอิ่มตัว (Saturation thickness) รวมทั้งโปรแกรมเสริม (Utility program) สำหรับการจัดการเรื่องเพิ่มข้อมูลและกราฟิก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.16 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม NBSGSC

## ตารางที่ 2.3 สรุปการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรม	การใช้งาน
1.Genie 2000	-เป็นเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (MCA) -เปรียบเทียบค่าพลังงาน -หาพื้นที่ใต้พีค -หาค่า FWHM -หาค่าพลังงานจากจุดกึ่งกลางพีค -หา Gaussian Ratio
2.SPEDAC	-แปลงข้อมูลจาก MCA ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ ASCII คือ ไฟล์ 1 คอลัมน์ (*.spe) เพื่อนำไปเปิดในโปรแกรม WinQXAS
3.WinQXAS	-วิเคราะห์เชิงคุณภาพ -หาพื้นที่ใต้พีค -เปรียบเทียบพลังงาน
4.NBSGSC	-วิเคราะห์ปริมาณ

## บทที่ 3

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

3.1.1 หัววัดรังสีเอกซ์แบบกึ่งตัวนำ (Semi-conductor Detector) ชนิด CdTe (Cadmium Telluride)

3.1.2 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (High voltage power supply)

3.1.3 เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel analyzer, MCA)

3.1.4 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปรังสี

ก. ชนิดวงแหวน (Ring source) 2 ไอโซโทป มีความแรงรังสีดังนี้

Am-241 มีความแรงรังสี 30 mCi

Pu-238 มีความแรงรังสี 30 mCi

ข. Disc source ได้แก่ Co-57 ซึ่งมีความแรงรังสี 30 mCi

3.1.5 Inspector 2000 ของ CANBERRA

3.1.6 โปรแกรม ได้แก่ QXAS ของ IAEA, Genie-2000 ของ CANBERRA, SPEDAC ของ IAEA และ NBSGSC ของ Rainier Software

3.1.7 เครื่องคอมพิวเตอร์

3.1.8 ตัวอย่างวิเคราะห์ ได้แก่ พระพุทธรูปโบราณขนาดใหญ่ที่วัดหน้าพระเมรุ จำนวน 2 องค์ วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม จำนวน 2 องค์ ชั้นสำริด 1 ใบ พระพุทธรูปขนาดหน้าตักกว้าง 6 นิ้ว จำนวน 2 องค์ และพระพุทธรูปสมัยอยุธยาจากศูนย์ปฏิบัติการอนุรักษ์โบราณสถานนครประวัติศาสตร์ พระนครศรีอยุธยา

3.1.9 ตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ โลหะผสม (ตะกั่วบัตกรี) สารประกอบออกไซด์ และ สารมาตรฐานประเภททองเหลืองและสำริดของศูนย์เครื่องมือฯ

3.1.10 โลหะผสมที่เตรียมขึ้นมาสำหรับการเปรียบเทียบ 5 ชิ้น



รูปที่ 3.1 หัววัดรังสีเอกซ์แบบกึ่งตัวนำชนิด CdTe (Cadmium Telluride)



รูปที่ 3.2 Inspector 2000

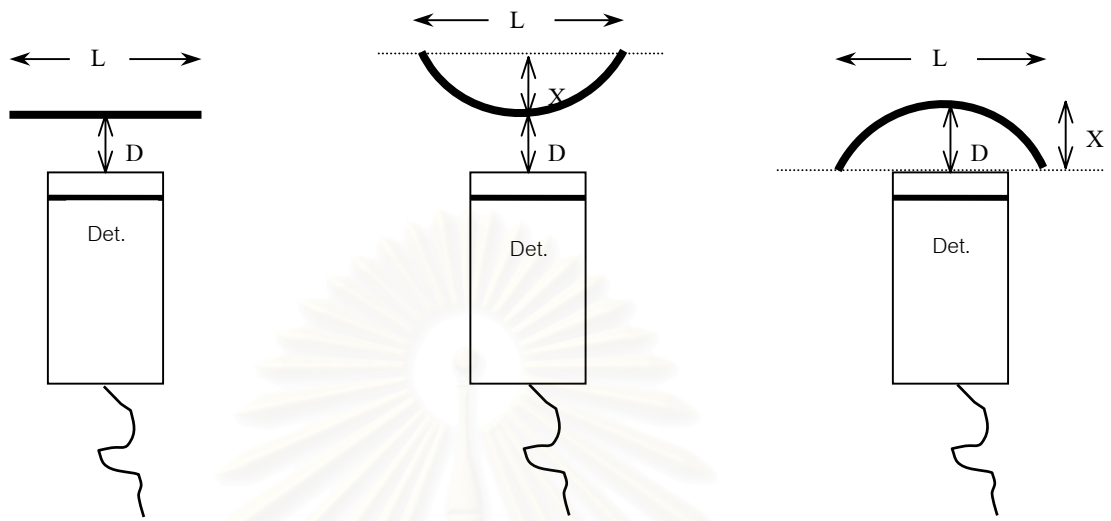
## 3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับตัวอย่าง

เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหลายไอโซโทป ได้แก่ Am-241, Pu-238 และ Co-57 ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองหาระยะที่เหมาะสมระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับตัวอย่าง ซึ่งระยะห่างที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิแต่ละไอโซโทปกับตัวอย่างนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยในการทดลองแต่ละไอโซโทปจะใช้วัตถุตัวอย่างที่มีพลังงานต่างๆกันมาเป็นตัวทดสอบ กล่าวคือ ต้นกำเนิดรังสีชนิด Pu-238 จะใช้แผ่นทองแดง แผ่นแคดเมียมและแผ่นตะกั่ว ส่วนต้นกำเนิดรังสีชนิด Am-241 จะใช้แผ่นทองแดง แผ่นแคดเมียมและแผ่นดีบุก แล้วนำมาจัดระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับตัวอย่าง โดยวิเคราะห์ที่ระยะ 0.0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.3, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ซม. จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาระยะที่เหมาะสมกับต้นกำเนิดรังสีแต่ละชนิด

### 3.2.2 การศึกษาค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวในตัวอย่างที่มีลักษณะผิวแตกต่างกัน

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างที่เป็นวัตถุโบราณ โดยเทคนิคไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งผิวของวัตถุเหล่านี้จะมีลักษณะความโค้งเว้าแตกต่างกัน จึงต้องศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวในตัวอย่างที่มีลักษณะผิวแตกต่างกัน ในการทดลองนี้ได้ใช้แผ่นทองเหลืองขนาด 15 นิ้ว x 15 นิ้ว ซึ่งประกอบด้วยทองแดงและสังกะสี โดยวิเคราะห์แผ่นทองเหลืองที่เป็นแผ่นเรียบ แผ่นโค้งนูนและแผ่นเว้า ได้มีการเพิ่มขนาดของความหนาแน่นความเว้า (X) ของแผ่นทองเหลืองมากขึ้น โดยวิเคราะห์ที่ระยะ X เท่ากับ 0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ซม. รวมถึงเปลี่ยนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับแผ่นทองเหลือง (D) ด้วย โดยวิเคราะห์ที่ระยะ 0.5-5.0 cm. เพื่อดูค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวระหว่างทองแดงกับสังกะสีว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงหรือไม่ และความโค้งของวัตถุมีผลต่ออัตราส่วนของธาตุที่เป็นส่วนประกอบอย่างไร



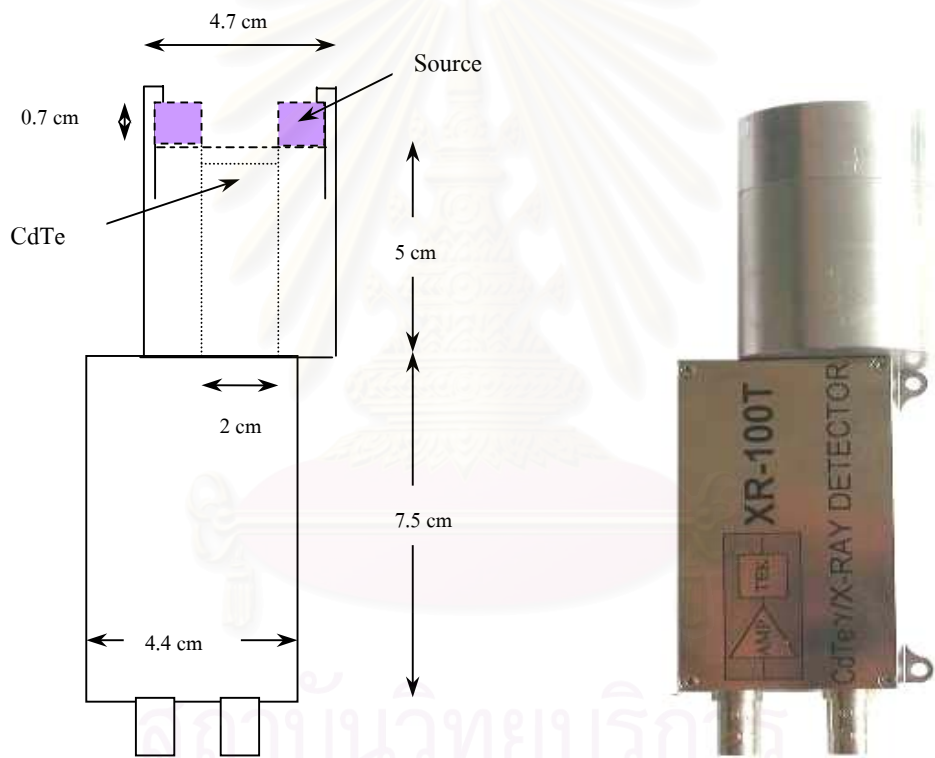
โดยที่  $D$  คือ ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับแผ่นทองเหลือง  
 $X$  คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของแผ่นทองเหลืองถึงแนวระนาบ  
 $L$  คือ ความกว้างของแผ่นทองเหลือง

รูปที่ 3.3 การจัดวางแผ่นทองเหลือง

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.3 การออกแบบโพรบ (Probe) สำหรับบรรจุห้วงรังสีเอกซ์และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องออกไปวิเคราะห์ตัวอย่างนอกสถานที่ โดยใช้ห้วงรังสีเอกซ์แบบกึ่งตัวนำชนิด CdTe ซึ่งมีช่องหน้าต่าง (Window) ทำด้วยเบริลเลียม (Be) เส้นผ่านศูนย์กลางกว้าง 0.3 ซม. ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบโพรบสำหรับบรรจุห้วงรังสีเอกซ์และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยโพรบที่ใช้จะเป็นวัสดุที่ทำมาจากอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โพรบ (Probe) สำหรับบรรจุห้วงรังสีเอกซ์และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

### 3.2.4 ศึกษาการทำงานของโปรแกรม NBSGSC

จากหลักการทำงานของโปรแกรม NBSGSC ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7.2 โปรแกรมนี้ได้แบ่งเป็นโปรแกรมย่อยที่สำคัญ 4 โปรแกรม คือ CALCO87, STDMAKE, UNKMAKE และ COMP87 โดยที่โปรแกรม CALCO87 เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์ผลของแมทริกซ์ เพื่อนำค่านี้ไปใช้คำนวณแก้ค่าความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ในโปรแกรมนี้อาจต้องใส่ข้อมูลของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิด้วย โดยเก็บไว้ในเท็กซ์ไฟล์ ตัวอย่างข้อมูลของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ Am-241 คือ

Np

0, 0, 0, 5

0.89065, 0.69551, 0.59519, 0.46983, 0.20793

0.133, 0.194, 0.049, 0.024, 0.3582

11\*0.0

11\*0.0

บรรทัดที่ 2 เป็นจำนวนพลังงานที่ต้นกำเนิดรังสีปล่อยออกมา ได้แก่ Np  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$ ,  $L_{\gamma}$ ,  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$

บรรทัดที่ 3 เป็นค่าความยาวคลื่น ( $\lambda = 12.4/E$ )

บรรทัดที่ 4 เป็นค่าความเข้มของแต่ละพลังงาน

บรรทัดที่ 5 และ 6 เป็นความยาวคลื่นและสัดส่วนในการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของช่วงอื่นๆ ตามลำดับ

ในส่วนของโปรแกรม STDMAKE และ UNKMAKE เป็นโปรแกรมสำหรับเตรียมข้อมูลของสารมาตรฐานและตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ต้องเตรียมสำหรับโปรแกรม STDMAKE ได้แก่ จำนวนของสารมาตรฐาน (มากที่สุด 20 ตัวอย่าง) จำนวนกับชนิดขององค์ประกอบรวมทั้งค่าความเข้มข้น (Concentration หรือ Weight fraction) และค่าความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารมาตรฐาน (จำนวนองค์ประกอบมีได้มากที่สุด 26 ธาตุ) และจำนวนกับชนิดของธาตุที่จะวิเคราะห์ (วิเคราะห์ได้มากที่สุด 25 ธาตุ)

ข้อมูลที่ต้องเตรียมสำหรับโปรแกรม UNKMAKE ได้แก่ จำนวนตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ (วิเคราะห์ได้มากที่สุด 20 ตัวอย่าง) และค่าความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์



สำหรับโปรแกรม COMP87 เป็นโปรแกรมที่คำนวณความเข้มข้นของธาตุแต่ละธาตุในตัวอย่าง ทำได้โดยเรียกไฟล์ข้อมูลที่เตรียมไว้ในโปรแกรม CALCO87, STDMAKE และ UNKMAKE ซึ่งโปรแกรมนี้จะทำการคำนวณแก้ค่าผลของแมทริกซ์ สร้างกราฟเปรียบเทียบและคำนวณผลความเข้มข้นของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์

### 3.2.5 การทดสอบโลหะผสมที่เตรียมขึ้นสำหรับการเปรียบเทียบ

เนื่องจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นในการเตรียมโลหะผสมสำหรับการเปรียบเทียบของงานวิจัยนี้ จึงใช้วิธีการจำลองขึ้นมาให้เหมือนกับตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด กล่าวคือตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์นี้เป็นวัตถุที่ประกอบด้วยโลหะหลายชนิดผสมกัน ฉะนั้นในการเตรียมจึงใช้โลหะบริสุทธิ์ชนิดเดียวกับตัวอย่างที่วิเคราะห์มาหลอมรวมกัน โดยได้เตรียมขึ้นมา 5 ชิ้น 5 ความเข้มข้น แล้วนำมาตรวจสอบความถูกต้องของโลหะผสมที่เตรียมขึ้นมาสำหรับการเปรียบเทียบ โดยนำตัวอย่างที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 14 ตัวอย่าง เป็นทองเหลือง 10 ตัวอย่าง และสัริด 4 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยโปรแกรม NBSGSC

### 3.2.6 การทดสอบโปรแกรม NBSGSC

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรม NBSGSC เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ หลักการทำงานของโปรแกรมนี้ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.7.2 แล้ว ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้อย่างสะดวกและมีความถูกต้องแม่นยำค่อนข้างมาก โดยในการวิเคราะห์จะประกอบด้วยค่าความเข้มรังสี (Intensity) ของตัวอย่างและสารมาตรฐาน และค่าความเข้มข้น (Concentration หรือ Weight fraction) ของสารมาตรฐาน ในส่วนของการทดสอบโปรแกรมนี้จะใช้ตัวอย่าง 2 ชนิด คือ ตัวอย่างที่เป็นตะกั่วบัดกรี ได้ทำการทดลอง 2 ครั้ง และตัวอย่างที่เป็นสารประกอบออกไซด์ โดยได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

### 3.2.7 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพนั้น จะเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี สามารถทำได้โดยใช้วัตถุที่ทราบสเปกตรัมรังสีและพลังงาน 2 ตัวอย่างขึ้นไป นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (keV) กับตำแหน่ง (Channel number) โดยการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งและพลังงาน (channel-energy calibration curve) เมื่อเราทำการวิเคราะห์ตัวอย่างวัตถุได้สเปกตรัมรังสีที่เป็นพลังงานออกมาแล้ว ก็จะสามารถทราบว่าตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นธาตุใด โดยใช้โปรแกรม WinQXAS ช่วยในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เชิงปริมาณรวมทั้งการคำนวณแก้ค่าผลของเมทริกซ์จะทำโดยใช้โปรแกรม NBSGSC ในส่วนของการหาค่าความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์ทั้งของตัวอย่างและสารมาตรฐาน จะใช้โปรแกรม WinQXAS ตัวอย่างผลการคำนวณจากโปรแกรม NBSGSC แสดงในภาคผนวก ก

สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ภาคสนาม กล่าวคือ

ก. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นพระพุทธรูปจำนวน 3 องค์ และขันสำริด 1 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ข. การวิเคราะห์ภาคสนาม เป็นการวิเคราะห์วัตถุโบราณขนาดใหญ่ โดยตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นพระพุทธรูปสมัยอยุธยาที่วัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จำนวน 2 องค์ และพระพุทธรูปสมัยรัตนโกสินทร์ที่วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม กรุงเทพมหานคร จำนวน 2 องค์ โดยในการวิเคราะห์นั้นใน 1 องค์จะเลือกวิเคราะห์หลายๆ ตำแหน่ง เพื่อเปรียบเทียบปริมาณ ณ ตำแหน่งต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6-3.10



ขันสำริด



องค์ที่ 1



องค์ที่ 2



องค์ที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.6 พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 1



รูปที่ 3.7 พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 2



รูปที่ 3.8 พระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 1



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการวิเคราะห์พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์กรที่ 2



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการวิเคราะห์พระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2

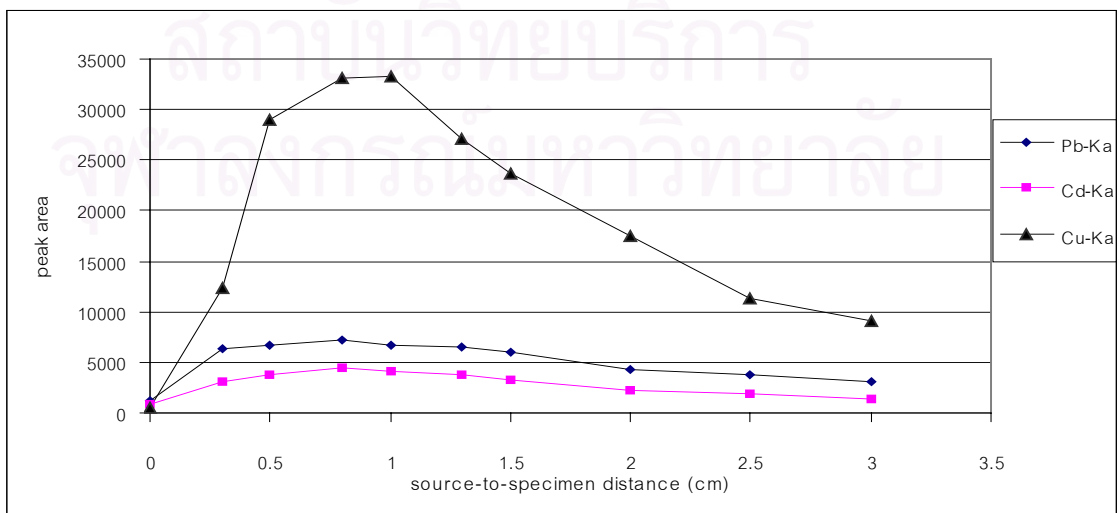
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนนับสุทธิที่ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสี Pu-238 กับตัวอย่างชนิดต่างๆ

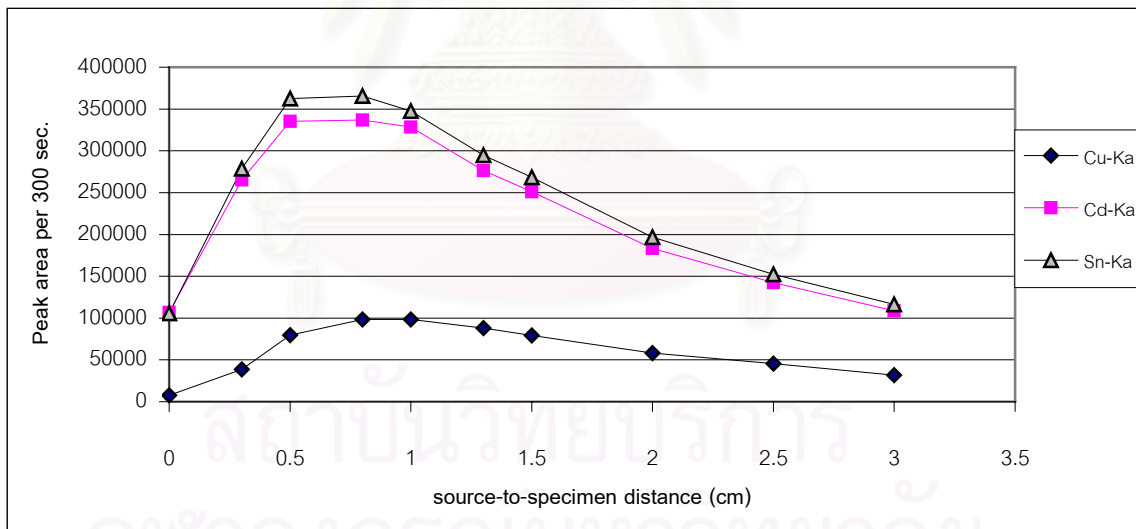
Distance (cm)	Peak area		
	Pb-K $\alpha$	Cd-K $\alpha$	Cu-K $\alpha$
0.0	1132	775	513
0.3	6394	3121	12273
0.5	6740	3743	29054
0.8	7176	4526	33051
1.0	6685	4032	33309
1.3	6536	3737	27119
1.5	6055	3325	23648
2.0	4204	2259	17438
2.5	3723	1879	11287
3.0	3145	1410	9123



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี (Pu-238) ถึงตัวอย่างกับจำนวนนับสุทธิ

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนนับสุทธิที่ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสี Am-241 กับตัวอย่างชนิดต่างๆ

Distance (cm)	Peak area per 300 sec.		
	Cu-K $\alpha$	Cd-K $\alpha$	Sn-K $\alpha$
0.0	7640	106922.5	105557.0
0.3	38808	265205.0	278725.0
0.5	79542	335451.5	362506.5
0.8	98186	336777.0	365483.5
1.0	98203	328455.0	347489.5
1.3	88064	276439.5	294834.5
1.5	79218	251014.5	268240.0
2.0	58363	183467.5	196891.0
2.5	45741	142386.5	152231.0
3.0	31756	108633.5	116420.5



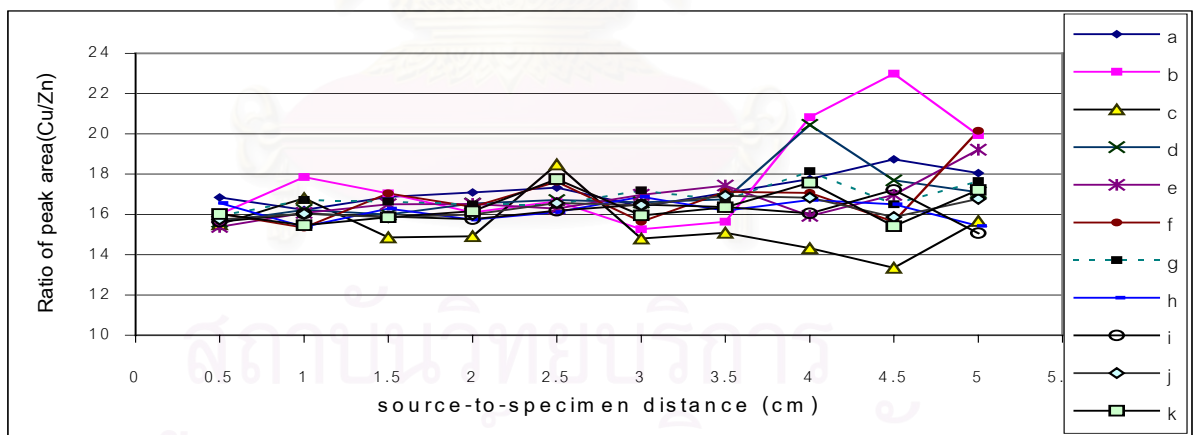
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี (Am-241) ถึงตัวอย่างกับจำนวนนับสุทธิ



#### 4.2 การศึกษาค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวในตัวอย่างที่มีลักษณะผิวแตกต่างกัน

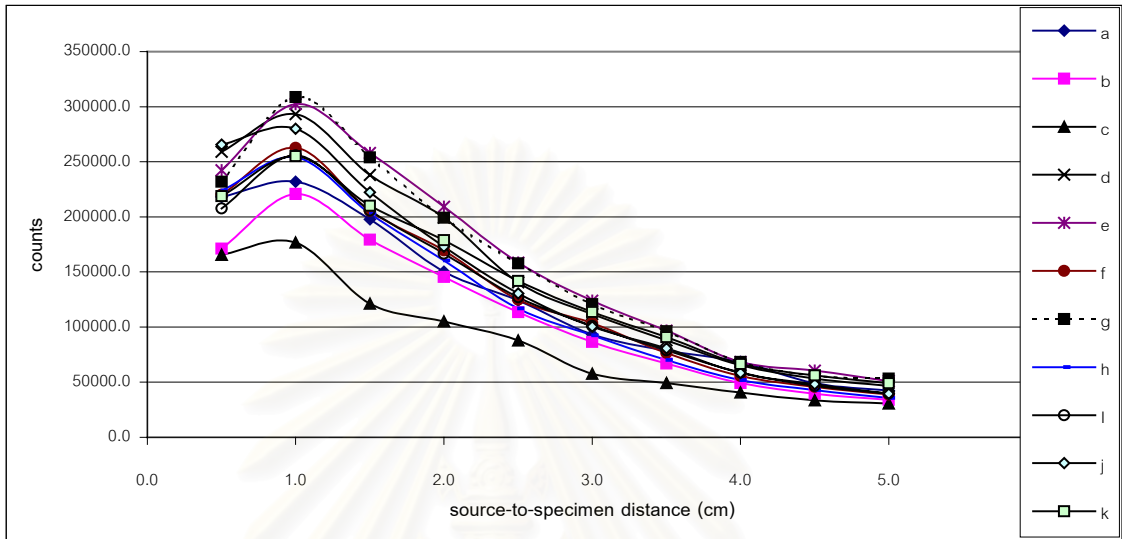
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดง ( $K_{\alpha}$ ) ต่อสังกะสี ( $K_{\beta}$ )

Distance (cm)	Peak area of Cu/Zn										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
0.5	16.84	16.01	15.51	15.63	15.38	16.04	15.93	16.57	15.64	15.75	16.02
1.0	16.23	17.85	16.81	16.23	16.08	15.35	16.72	15.38	16.04	16.03	15.46
1.5	16.87	17.04	14.86	16.00	16.51	17.04	16.63	16.29	15.89	15.85	15.85
2.0	17.09	16.10	14.92	16.54	16.52	16.38	16.50	15.74	15.76	16.00	16.16
2.5	17.33	16.66	18.48	16.71	16.28	17.62	16.48	16.11	16.18	16.57	17.75
3.0	16.39	15.26	14.80	16.60	16.97	15.63	17.19	16.88	16.48	16.46	15.95
3.5	17.06	15.63	15.09	16.75	17.44	17.12	16.69	16.18	16.37	16.93	16.36
4.0	17.76	20.83	14.32	20.44	15.93	17.06	18.15	16.72	16.05	16.83	17.57
4.5	18.74	22.99	13.35	17.69	16.97	15.64	16.51	16.51	17.22	15.87	15.41
5.0	18.05	19.93	15.67	17.10	19.21	20.15	17.66	15.43	15.07	16.77	17.21



- หมายเหตุ a คือ แผ่นเรียบ g คือ แผ่นเว้า X = 2.0 cm  
 b คือ แผ่นนูน X = 1.0 cm h คือ แผ่นนูน X = 2.5 cm  
 c คือ แผ่นเว้า X = 1.0 cm i คือ แผ่นเว้า X = 2.5 cm  
 d คือ แผ่นนูน X = 1.5 cm j คือ แผ่นนูน X = 3.0 cm  
 e คือ แผ่นเว้า X = 1.5 cm k คือ แผ่นเว้า X = 3.0 cm  
 f คือ แผ่นนูน X = 2.0 cm

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีถึงตัวอย่าง กับอัตราส่วนระหว่างจำนวนนับสุทธิของทองแดงกับสังกะสี



- หมายเหตุ
- |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| a คือ แผ่นเรียบ           | g คือ แผ่นเว้า X = 2.0 cm |
| b คือ แผ่นนูน X = 1.0 cm  | h คือ แผ่นนูน X = 2.5 cm  |
| c คือ แผ่นเว้า X = 1.0 cm | i คือ แผ่นเว้า X = 2.5 cm |
| d คือ แผ่นนูน X = 1.5 cm  | j คือ แผ่นนูน X = 3.0 cm  |
| e คือ แผ่นเว้า X = 1.5 cm | k คือ แผ่นเว้า X = 3.0 cm |
| f คือ แผ่นนูน X = 2.0 cm  |                           |

รูปที่ 4.4 ค่าจำนวนนับสุทธิต่อทงแดง ( $K_{\alpha}$ ) ที่ลักษณะผิวต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

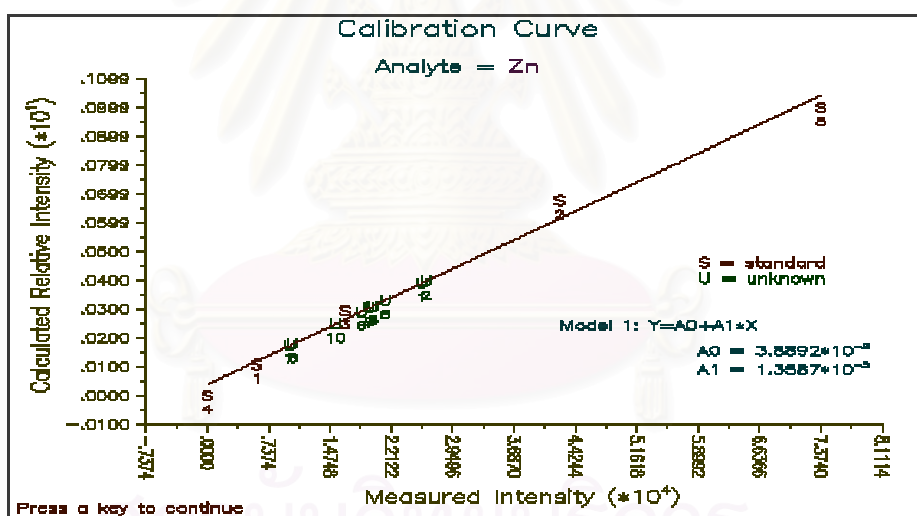
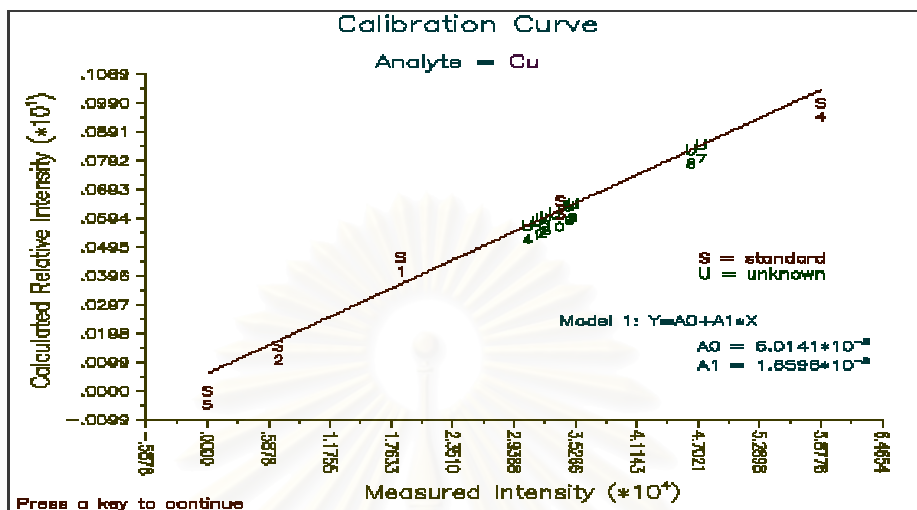
#### 4.3 ผลการทดสอบโลหะผสมที่เตรียมขึ้นสำหรับการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตัวอย่างที่เป็นทองเหลือง

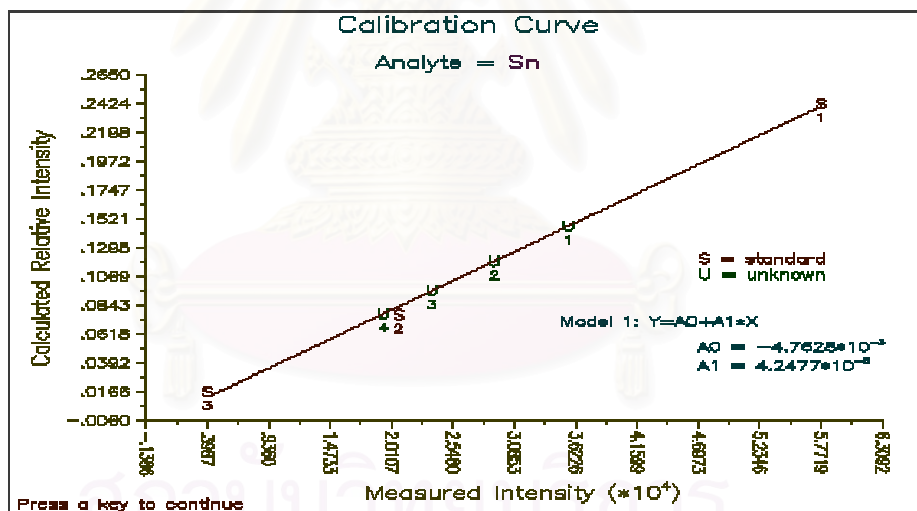
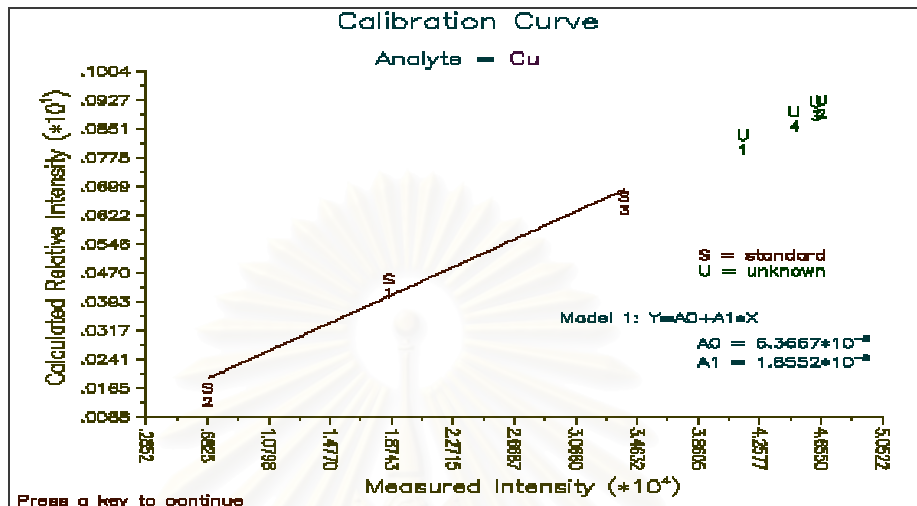
I.D. of sample	%Cu		Difference	%Zn		Difference
	analyzed	known		Analyzed	known	
1	60.62	60.91	-0.29	36.75	38.95	-2.20
2	61.41	59.80	+1.61	37.44	39.70	-2.26
3	65.74	65.70	+0.04	29.16	32.00	-2.84
4	58.55	60.85	-2.30	30.16	32.90	-2.74
5	61.67	62.57	-0.90	31.18	34.50	-3.32
6	65.22	66.95	-1.73	27.33	30.30	-2.97
7	85.90	83.62	+2.28	16.03	14.30	+1.73
8	84.28	83.25	+1.03	16.50	15.29	+1.21
9	66.00	65.85	+0.15	28.52	30.05	-1.53
10	62.56	65.25	-2.69	23.40	25.55	-2.15

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตัวอย่างที่เป็นสำริด

I.D. of sample	%Cu		Difference	%Sn		Difference
	analyzed	known		Analyzed	known	
11	83.55	82.70	+0.85	14.62	14.70	-0.08
12	85.55	86.50	-0.95	11.94	13.25	-1.31
13	86.29	87.10	-0.81	9.66	10.75	-1.09
14	84.31	86.20	-1.89	7.51	8.40	-0.89



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบของตัวอย่างทองเหลือง



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบของตัวอย่างสำริด

#### 4.4 ผลการทดสอบโปรแกรม NBSGSC

4.4.1 ทดสอบการวิเคราะห์โดยวิเคราะห์กับตะกั่วบัดกรี (Pb/Sn Alloys) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตะกั่วบัดกรี (Pb/Sn Alloys) ด้วยโปรแกรม NBSGSC โดยใช้ระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงแบบ EDX

I.D. of sample	%Pb		Difference	%Sn		Difference
	analyzed *	known		Analyzed *	known	
1	N.D.	-	0	101.15	100	+1.15
	N.D.		0	99.27		-0.73
2	N.D.	-	0	97.33	100	-2.67
	N.D.		0	98.47		-1.53
3	N.D.	-	0	97.21	100	-2.79
	N.D.		0	98.95		-1.05
4	38.52	40	-1.48	58.86	60	-1.14
	38.11		-1.89	62.27		+2.27
5	36.68	40	-3.32	59.21	60	-0.79
	36.82		-3.18	60.51		+0.51
6	37.95	40	-2.05	61.50	60	+1.50
	37.24		-2.76	61.87		+1.87
7	47.90	50	-2.10	50.09	50	+0.09
	45.50		-4.50	48.35		-1.65
8	47.36	50	-2.64	51.45	50	+1.45
	45.57		-4.43	47.40		-2.60

หมายเหตุ : N.D. คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (Not Detectable)

\* วิเคราะห์ซ้ำ 2 ครั้ง

4.4.2 ทดสอบการวิเคราะห์โดยวิเคราะห์กับสารประกอบออกไซด์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบออกไซด์ ด้วยโปรแกรม NBSGSC โดยใช้ระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแบบ EDX

I.D. of sample	%Zn		Difference	%Mn		Difference	%O**	%H**	%B**
	analyzed*	known		Analyzed*	Known				
9	24.59	26.78	-2.19	33.87	31.60	+2.27	N.D.	N.D.	N.D.
	26.91		+0.13	31.59		-0.01			
	26.85		+0.07	29.60		-2.00			
10	46.82	46.87	-0.05	17.19	15.80	+1.39	N.D.	N.D.	N.D.
	48.57		+1.70	17.08		+1.28			
	46.94		+0.07	16.09		+0.29			

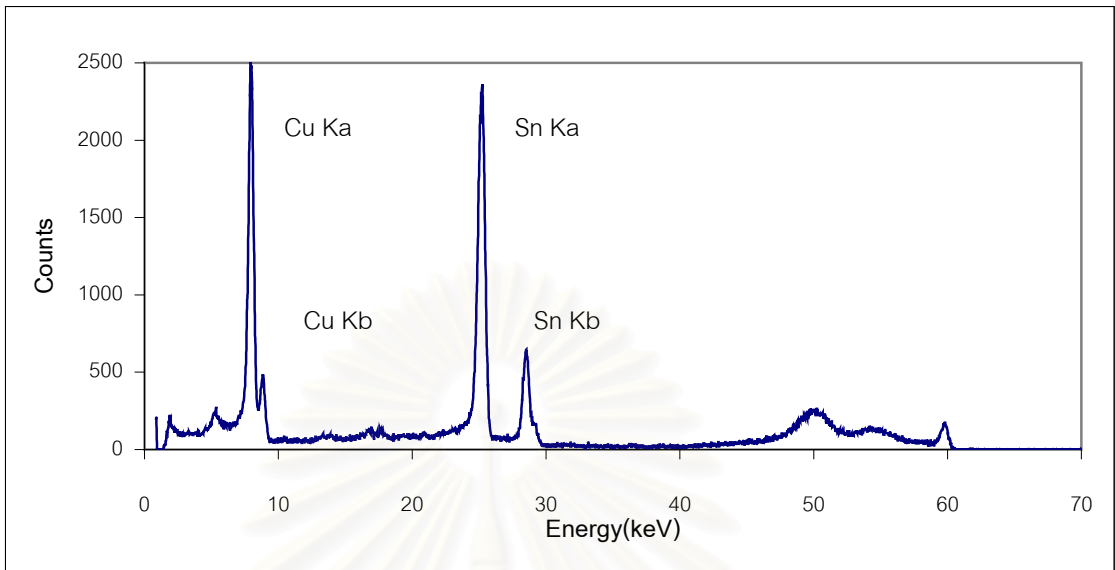
หมายเหตุ : \* วิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง

\*\* N.D. คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (Not Detectable)

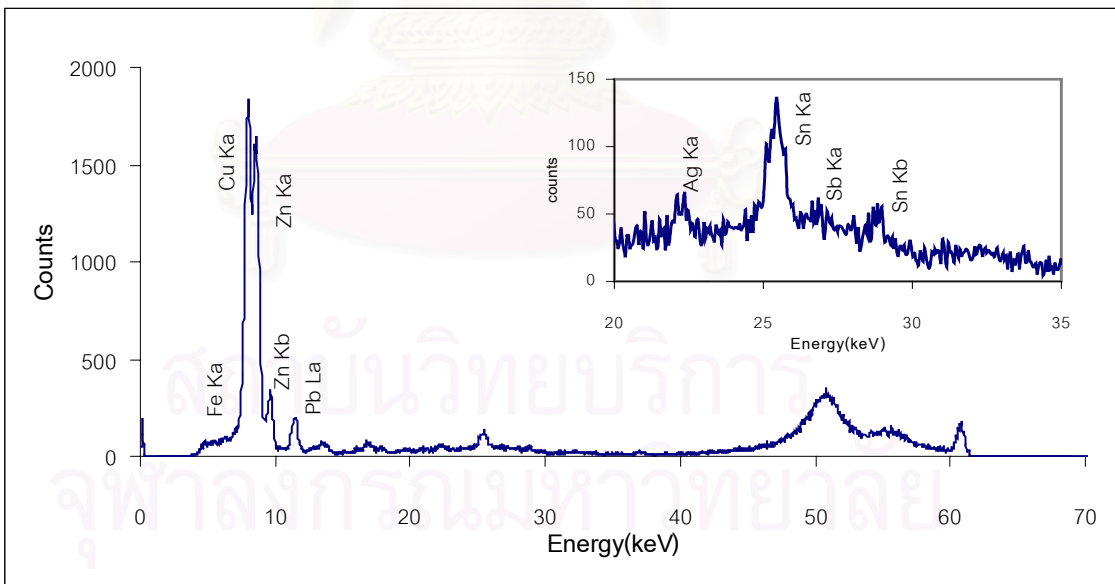
#### 4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ก. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์ขั้นสาริด พบส่วนประกอบ 2 ธาตุ คือ ทองแดง และดีบุก สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.7 ส่วนผลการวิเคราะห์พระพุทธรูปองค์ที่ 1, 2 และ 3 พบส่วนประกอบ 7 ธาตุ ได้แก่ ทองแดง ดีบุก สังกะสี ตะกั่ว เงิน เหล็ก และพลวง

ข. การวิเคราะห์ภาคสนามพบว่า พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ (ทั้ง 2 องค์) และวัดหน้าพระเมรุ (องค์ที่ 2) จะมีส่วนประกอบที่คล้ายกัน กล่าวคือ พบ 7 ธาตุ ได้แก่ ทองแดง ดีบุก สังกะสี ตะกั่ว เงิน เหล็ก และพลวง โดยส่วนประกอบหลักคือ ทองแดง และสังกะสี ตัวอย่างสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.8 ส่วนพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 1 พบเพียง 1 ธาตุ คือ ทอง สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.9

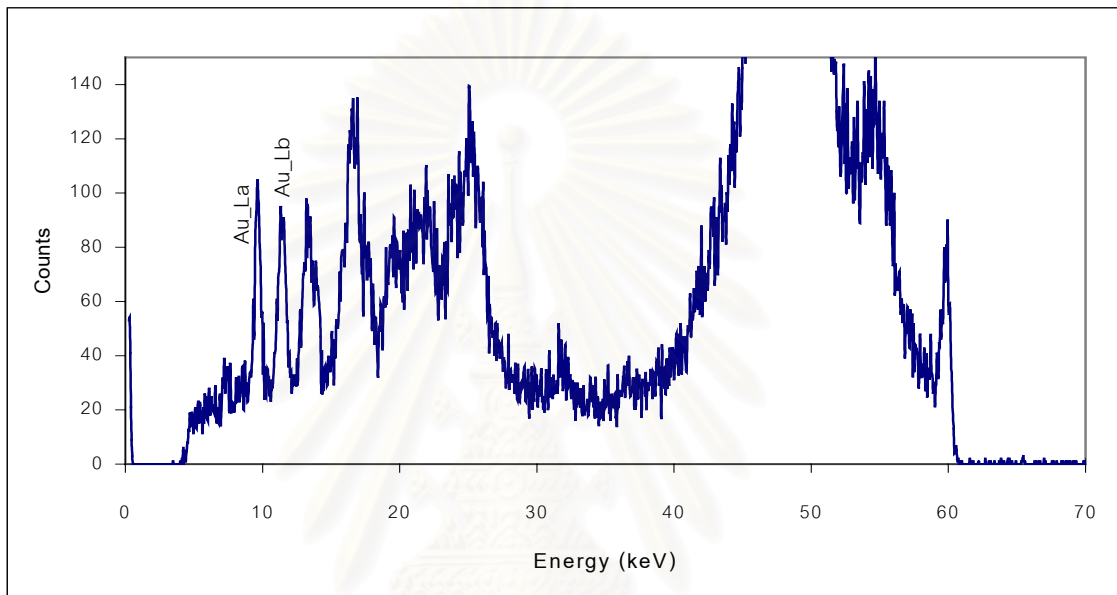


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของขันดำวัด



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 1





รูปที่ 4.9 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.6 ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

### 4.6.1 การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของส่วนประกอบของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่าง	ปริมาณ (%)						
	Cu	Zn	Sn	Pb	Ag	Sb	Fe
ก้นชั้นด้านใน	77.19	-	18.76	-	-	-	-
ก้นชั้นด้านนอก	80.40	-	17.21	-	-	-	-
องค์ที่ 1	77.16	6.32	3.04	13.98	0.11	0.02	1.46
องค์ที่ 2	49.70	21.56	0.96	3.64	0.06	0.16	1.02
องค์ที่ 3	58.04	5.80	0.96	6.60	0.10	0.07	1.12

### 4.6.2 การวิเคราะห์ภาคสนาม

ก. พระพุทธรูปที่วัดราชบพิศฯ องค์ที่ 1

ตารางที่ 4.9 ปริมาณของส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิศฯ องค์ที่ 1

ตำแหน่ง	ปริมาณ (%)						
	Cu	Zn	Sn	Pb	Ag	Sb	Fe
พระปราง	70.07	21.69	1.03	0.59	0.13	0.02	0.35
พระอุระ	50.33	30.32	0.16	0.54	0.17	0.02	2.25
พระอุทร	40.89	39.57	1.26	3.21	0.08	0.03	2.70
พระหัตถ์	74.96	26.03	0.66	2.21	0.10	0.08	0.99

ข. พระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 2

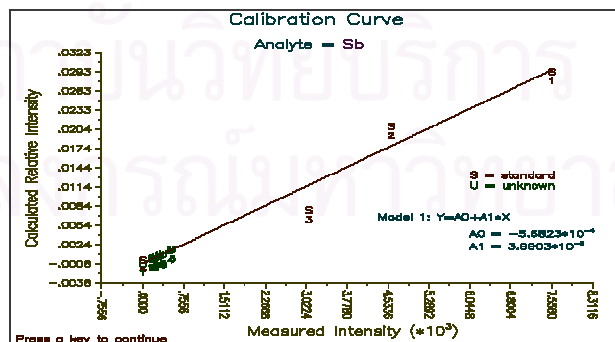
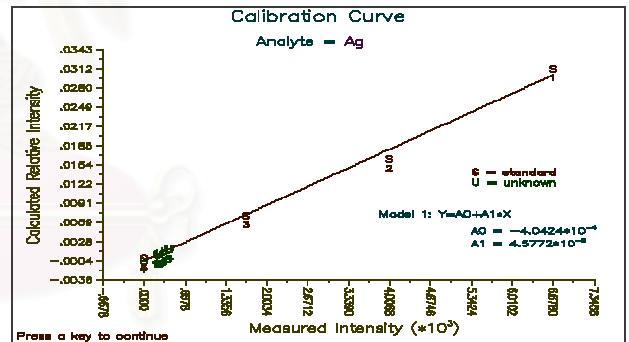
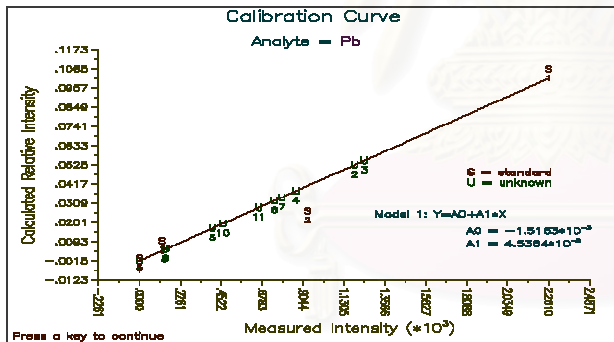
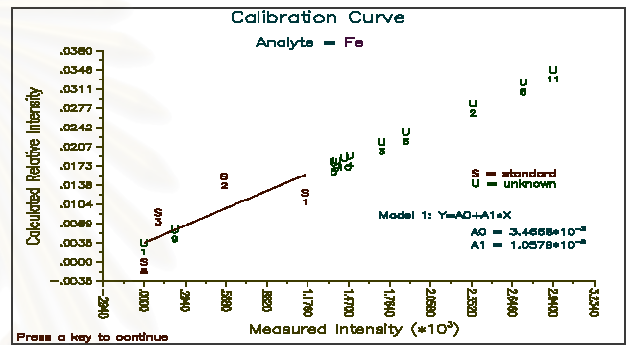
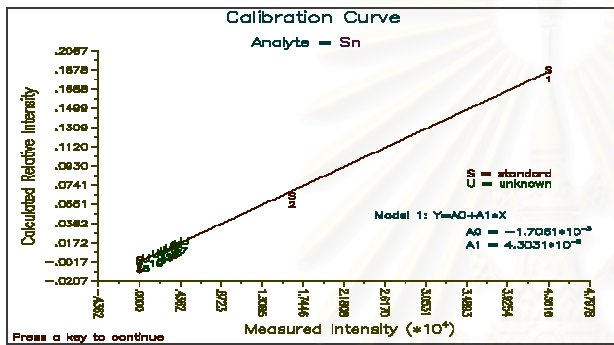
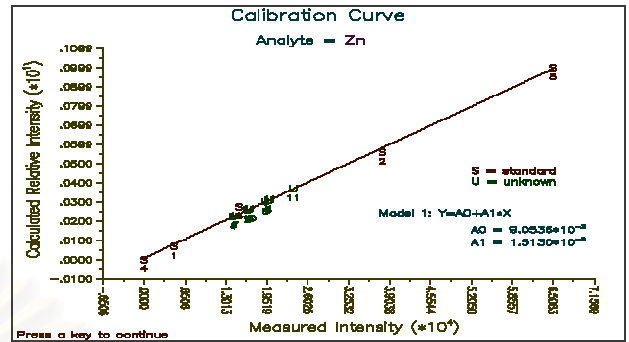
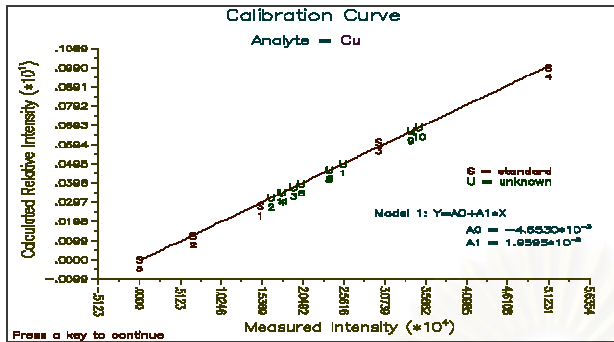
ตารางที่ 4.10 ปริมาณของส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ องค์ที่ 2

ตำแหน่ง	ปริมาณ (%)						
	Cu	Zn	Sn	Pb	Ag	Sb	Fe
พระเศียร	53.46	24.38	2.18	3.79	0.07	0.07	1.50
พระปราง	45.53	34.05	1.94	6.15	0.10	0.18	1.86
พระอุระ	38.73	28.71	1.42	5.76	0.10	0.10	2.69
ฝ่าพระหัตถ์	40.11	24.06	1.67	4.12	0.19	0.16	1.79
พระขานู	51.23	26.41	0.88	1.87	0.08	0.04	1.37
ฐาน	45.70	28.15	1.74	3.58	0.07	0.03	1.99

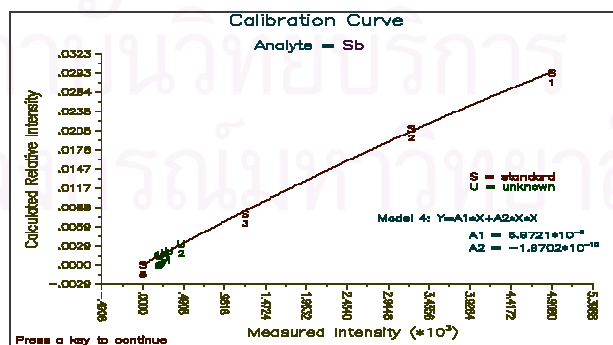
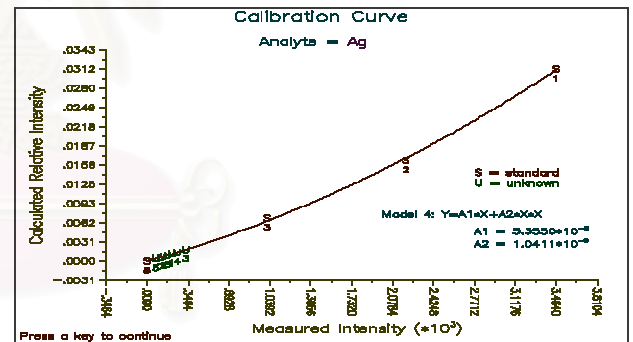
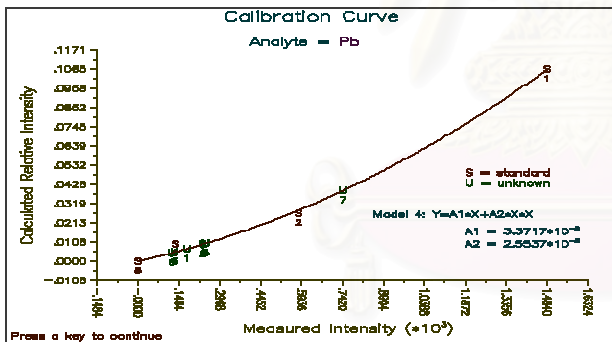
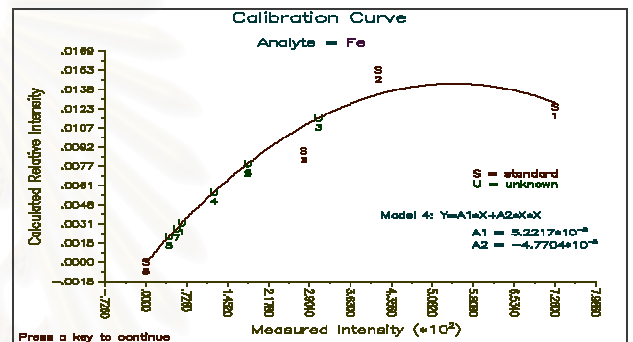
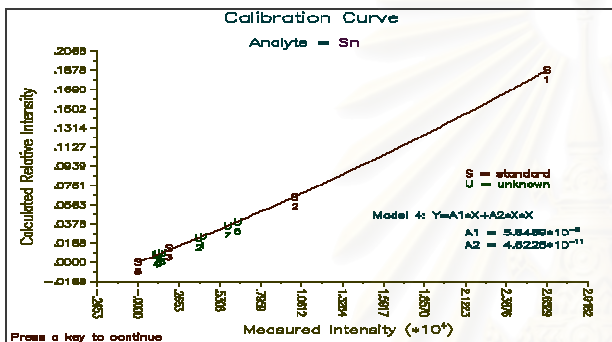
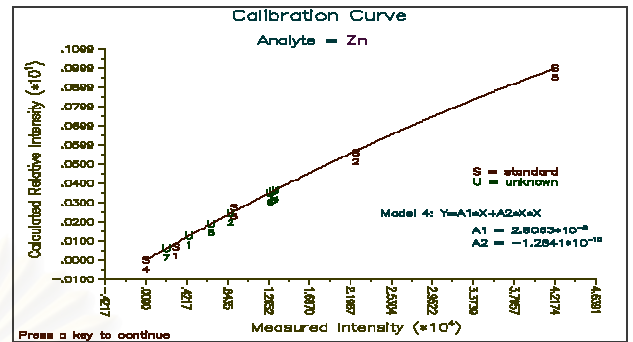
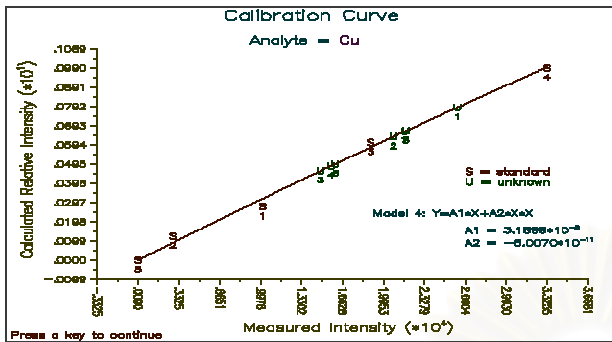
ค. พระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2

ตารางที่ 4.11 ปริมาณของส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2

ตำแหน่ง	ปริมาณ (%)						
	Cu	Zn	Sn	Pb	Ag	Sb	Fe
พระปราง	53.38	34.54	1.04	0.51	0.12	0.16	0.51
พระอุระ	70.25	24.33	2.66	1.04	0.10	0.33	0.49
หลังพระหัตถ์	52.56	36.14	0.80	1.13	0.18	0.15	0.37
ฝ่าพระหัตถ์	49.80	35.45	0.89	0.56	0.23	0.16	0.78
ชายจีวร	85.17	12.42	2.84	0.76	0.14	0.22	0.18
พระขานู	74.39	19.18	4.45	1.09	0.05	0.14	0.14
หลังพระบาท	76.85	6.45	4.12	4.28	0.08	0.19	0.22



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบของพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์กรที่ 2

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่า กราฟที่ได้ทุกๆเส้นมีลักษณะคล้ายกันคือ ในช่วงระยะแรกค่าจำนวนนับสุทธิตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงช่วงระยะหนึ่งที่ค่าจำนวนนับสุทธิตจะค่อยๆลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า ขณะที่ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิอยู่ชิดกับผิวตัวอย่าง บริเวณผิวของตัวอย่างที่ถูกรังสีเอกซ์ปฐมภูมิตกกระทบมีพื้นที่น้อย และรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นก็ถูกกับังจากตัวต้นกำเนิดรังสีเองและฐานรองรับต้นกำเนิดรังสี จึงไม่สามารถไปสู่หัววัดรังสีเอกซ์ที่อยู่ด้านล่างได้มากนัก เมื่อเลื่อนระยะให้ห่างขึ้น พื้นที่ที่ถูกกระตุ้นจะกว้างขึ้น รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นก็ถูกกับังน้อยลง และมีมุมเหมาะสมที่สามารถไปสู่หัววัดรังสีเอกซ์ได้มากขึ้น แต่เมื่อระยะห่างออกไปมาก ความเข้มรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ตกกระทบต่อพื้นที่ผิวของตัวอย่างย่อมน้อยลงมาก และตำแหน่งที่เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวกับหัววัดรังสีก็ห่างกันมากขึ้น ความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจึงลดลง นอกจากนั้นสำหรับรังสีเอกซ์พลังงานต่ำๆ เช่นกรณีของทองแดง ซึ่งมีพลังงานเพียงประมาณ 8 keV การดูดกลืนในอากาศที่อยู่ระหว่างผิวตัวอย่างกับหัววัดรังสีเอกซ์ย่อมมีมากเมื่อเทียบกับรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงกว่า

5.1.2 จากการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ 2 ชนิด คือ Pu-238 และ Am-241 กับผิวตัวอย่างชนิดต่างๆ พบว่า

- ก. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิชนิด Pu-238
  - ในการวิเคราะห์แผ่นทองแดง ( $K_{\alpha}$  E=8.04 keV) ระยะห่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่สุดอยู่ในช่วง 0.5-1.3 ซม. เนื่องจากเป็นช่วงที่ค่าจำนวนนับสุทธิตค่อนข้างคงที่
  - ในการวิเคราะห์แผ่นแคดเมียม ( $K_{\alpha}$  E=23.17 keV) ระยะห่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่สุดอยู่ในช่วง 0.3-1.5 ซม.
  - ในการวิเคราะห์แผ่นตะกั่ว ( $K_{\alpha}$  E=74.96 keV) ระยะห่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่สุดอยู่ในช่วง 0.3-1.5 ซม.

ข. ดัชนีการวัดรังสีเอกซ์ปัลซิมมูมิชนิด Am-241

-ในการวิเคราะห์แผ่นทองแดง ( $K_{\alpha}$  E=8.04 keV) ระยะห่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่สุดอยู่ในช่วง 0.5-1.5 ซม. เนื่องจากเป็นช่วงที่ค่าจำนวนนับสุทธิค่อนข้างคงที่

-ในการวิเคราะห์แผ่นแคดเมียม ( $K_{\alpha}$  E=23.17 keV) ระยะห่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่สุดอยู่ในช่วง 0.5-1.0 ซม.

-ในการวิเคราะห์แผ่นดีบุก ( $K_{\alpha}$  E=25.27 keV) ระยะห่างที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ที่สุดอยู่ในช่วง 0.5-1.0 ซม.

ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนระยะห่าง จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างดัชนีการวัดรังสีเอกซ์ปัลซิมมูมิ (ทั้ง 2 ชนิด) กับผิวตัวอย่างที่ระยะ 0.8 ซม. ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีค่าจำนวนนับสุทธิค่อนข้างคงที่และเป็นระยะที่มีค่าจำนวนนับสุทธิสูงที่สุดหรือใกล้เคียงกับค่าที่สูงที่สุด

5.1.3 จากการศึกษาถึงค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวในตัวอย่าง ที่มีลักษณะผิวแตกต่างกัน ในการทดลองนี้ได้เพิ่มความหนา ความเว้าของแผ่นทองเหลืองที่มีรัศมีความโค้งต่างกัน ในช่วง 0.0-3.0 ซม. และเพิ่มระยะห่างระหว่างดัชนีการวัดรังสีเอกซ์ปัลซิมมูมิกับแผ่นทองเหลือง พบว่าที่ระยะ 0.5-3.5 ซม. ค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดงต่อสังกะสีค่อนข้างคงที่ แต่ที่ระยะมากกว่า 3.5 ซม. ค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดงต่อสังกะสีจะแปรปรวน อาจเป็นผลมาจาก ที่ระยะดังกล่าวแผ่นทองเหลืองจะมีช่องว่างมากขึ้น ทำให้ค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวมีค่าไม่คงที่ เพราะการดูดกลืนรังสีเอกซ์พลังงานต่ำมีมากกว่าพลังงานสูง และจากการทดลองแรก เลือกระยะห่างระหว่างดัชนีการวัดรังสีเอกซ์ปัลซิมมูมิกับผิวตัวอย่างที่ระยะ 0.8 ซม. ซึ่งเป็นระยะที่ค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวคงที่ จึงเป็นระยะที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์

5.1.4 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ของโปรแกรม NBSGSC โดยใช้ตัวอย่างที่ทราบความเข้มข้น 2 ชุด คือชุดตะกั่วบัตกรีและชุดสารประกอบออกไซด์ พบว่าผลการคำนวณที่ได้ใกล้เคียงกับส่วนประกอบจริง โดยในการวิเคราะห์ตะกั่วบัตกรี ผลต่างสูงสุดระหว่างปริมาณที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณจริงมีค่าไม่เกิน  $\pm 3.53 \%$  ส่วนการวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ ผลต่างสูงสุดระหว่างปริมาณที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณจริงมีค่าไม่เกิน  $\pm 1.43 \%$

5.1.5 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ของโปรแกรม NBSGSC โดยใช้ตัวอย่างโลหะผสมที่เตรียมขึ้นมาสำหรับการเปรียบเทียบ 2 ชุด คือชุดทองเหลืองและชุดสำริด พบว่าผลการคำนวณที่ได้ใกล้เคียงกับส่วนประกอบจริง โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่างทองเหลือง ผลต่างสูงสุดระหว่างปริมาณที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณจริงมีค่าไม่เกิน  $\pm 3.32\%$  ส่วนการวิเคราะห์ตัวอย่างสำริด ผลต่างสูงสุดระหว่างปริมาณที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณจริงมีค่าไม่เกิน  $\pm 1.89\%$

5.1.6 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ พบว่าส่วนประกอบของตัวอย่างที่เป็นชิ้นสำริดประกอบด้วยทองแดงและดีบุก วิเคราะห์ด้านในและด้านนอกของกันชน ปริมาณที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนตัวอย่างที่เป็นพระพุทธรูปทั้ง 3 องค์ จะประกอบด้วยทองแดง สังกะสี ดีบุก เหล็ก ตะกั่ว เงิน และพลวง

5.1.7 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของพระพุทธรูปที่วัดราชบพิธฯ (ทั้ง 2 องค์) และวัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 2 พบว่ามีส่วนประกอบที่คล้ายกัน คือมีจำนวน 7 ธาตุ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี ดีบุก เหล็ก ตะกั่ว เงิน และพลวง โดยที่มีทองแดงกับสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลัก และจากการวิเคราะห์เชิงปริมาณพบว่าที่ตำแหน่งต่างกันปริมาณจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้อาจมีผลมาจากกรรมวิธีในการหล่อและการไม่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวของส่วนประกอบ สำหรับการวิเคราะห์พระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ องค์ที่ 1 พบเพียง 1 ธาตุ คือ ทอง เนื่องจากได้มีการบูรณะปฏิสังขรณ์พระองค์นี้แล้วด้วยการลงลักปิดทอง จึงเห็นแต่รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทอง เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานค่อนข้างต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการทะลุผ่านผิวตัวอย่างซึ่งเป็นทองเข้าไปยังเนื้อวัสดุด้านใน ค่าความหนาของผิวโลหะที่ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะสามารถทะลุผ่านไปได้แสดงในภาคผนวก ข

5.1.8 สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างของงานวิจัยนี้ ได้เลือกวิเคราะห์บริเวณผิวตัวอย่างที่มีลักษณะไม่มีความโค้งเว้า อย่างไรก็ตามจากการศึกษาถึงค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวในตัวอย่างที่มีลักษณะผิวโค้งและเว้าแตกต่างกัน พบว่าที่ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับผิวตัวอย่าง ตั้งแต่ 0.5-3.5 ซม. จะมีค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวค่อนข้างคงที่ แต่ค่าจำนวนนับสุททิจของแต่ละลักษณะผิว (ความโค้งหรือเว้า) จะไม่เท่ากัน ถ้าหากจำเป็นต้องวิเคราะห์บริเวณที่มีลักษณะผิวโค้งหรือเว้า สามารถทำวิธีเปรียบเทียบได้โดยการวัดรัศมีความโค้งหรือเว้า แล้วนำไปอ่านค่าปรับแก้จากกราฟ เพื่อเทียบไปหาตัวอย่างผิวราบ โดยการคูณแฟกเตอร์ปรับแก้เข้าไป ซึ่งค่าแฟกเตอร์นี้จะป็นค่าของจำนวนนับสุททิจของวัตถุผิวเรียบต่อจำนวนนับสุททิจของวัตถุผิวโค้งหรือเว้า ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4



## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.2.1 การหาปริมาณของตัวอย่างที่เป็นพระพุทธรูป อาจมีค่าคลาดเคลื่อนบ้างเนื่องจากไม่สามารถขัดผิวหรือทำความสะอาดผิวตัวอย่างได้ ทำให้ที่ผิวของตัวอย่างยังมีธาตุเบา เช่น ออกซิเจน กำมะถัน เป็นต้น ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์ไม่สามารถเห็นฟิคของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุเบาเหล่านั้นได้ เพราะมีพลังงานต่ำมาก ดังที่เห็นจากผลการวิเคราะห์ ผลรวมของปริมาณความเข้มข้นที่ได้ บางครั้งจึงได้ค่าไม่ถึง 100 %

5.2.2 สำหรับธาตุรอง ความเข้มข้นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุรองหรือธาตุปริมาณน้อยจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนได้

5.2.3 สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมโลหะผสมสำหรับการปรับเทียบขึ้นมา โดยผสมโลหะตามส่วนประกอบของตัวอย่าง ซึ่งมีทั้งหมด 7 ธาตุ คือ ทองแดง สังกะสี ดีบุก เหล็ก ตะกั่ว เงิน และพลวง ในการหล่อโลหะที่มีส่วนประกอบหลายชนิดนั้นจะมีความยุ่งยากมาก เนื่องจากแต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลวไม่เท่ากัน จึงอาจมีปัญหาในการเข้ากันเป็นเนื้อเดียวของสาร แต่ได้มีการทดสอบการหาปริมาณด้วยโปรแกรม NBSGSC ของโลหะผสมที่เตรียมขึ้นมาสำหรับการปรับเทียบแล้ว ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงกับปริมาณจริง ทั้งนี้จะเป็นเพราะผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการหลอมเตรียมโลหะผสมดังกล่าวมีความชำนาญสูง ทำให้ไม่มีปัญหาในการวิเคราะห์

5.2.4 งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเบื้องต้นในการใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแบบเคลื่อนย้ายได้ วิเคราะห์วัตถุโบราณ ณ พื้นที่ ซึ่งจะเป็ประโยชน์สำหรับเป็นฐานข้อมูลต่อไปในอนาคต จึงควรมีการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ให้ดียิ่งขึ้นต่อไป ตัวอย่างเช่น ควรจะมีการจำกัดพื้นที่ในการวิเคราะห์ให้เล็กลง เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนในเรื่องรูปร่างและลักษณะของผิวตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่มีความเข้มข้นสูงจึงจะทำให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.2.5 เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ซึ่งรังสีเอกซ์มีพลังงานค่อนข้างต่ำ ทำให้วิเคราะห์ได้เพียงที่ผิวของตัวอย่างเท่านั้น หากต้องการทราบส่วนประกอบของเนื้อวัสดุข้างใน ควรเลือกใช้เทคนิคอื่นที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ เช่น เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

1. P. Wobrauschek, G. Halmetschlager, S. Zamini, C. Jokubonis, G. Trnka and M. Karwowski. *Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis of Celtic Glasses*. X-Ray Spectrometry, 29 (2000) : 25-33.
2. B. Constantinescu, V. Cojocaru, R. Bugoi and A. Sasianu. *Materials Analysis in Archaeometrical Studies at Bucharest Particle Accelerators*. EPAC. Vienna, Austrai, 2000.
3. K. N. Yu and J. M. Miao. *Non-destructive and Quantitative Investigation of Blue and White Porcelains Using EDXRF*. X-Ray Spectrometry, 25(1996) : 281-285.
4. D. Ertel. *X-Ray Fluorescence Analysis*. Karlsruhe : Kernforschungszentrum Karlsruhe GmgH, 1988.
5. Eugene P. Bertin. *Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis*. New York : Plenum Press, 1979.
6. นเรศร์ จันทน์ขาว. *เทคนิคการวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองเชิงปริมาณ*. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
7. Amersham International plc. *Industrial Gauging and Analytical Instrumentation Source*. Englands : Buckinghamshire, 1984.
8. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์, 2534.
9. R.L. Martin. *NBSGSC Version 4.0 : Fundamental Parameters X-Ray Analysis for Personal Computers*. Enumclaw : Rainier Software, 1988.

## บรรณานุกรม

- ธนพงษ์ ทองประภาพ. *การตัดแปดระบบรังสีเอกซ์เรียงแบบแยกส่วนเพื่อความเหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ธาตุ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- นเรศร์ จันทน์ขาว. *เทคนิคการวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองเชิงปริมาณ*. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์, 2534.
- วสันต์ อัมพูชนิ. *การพัฒนาส่วนเชื่อมโยงสัญญาณและโปรแกรมอิมูเลเตอร์สำหรับเครื่องวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ชนิดแจกแจงพลังงาน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- สัมพันธ์ วงศ์นาวา. *เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรีแบบกระจายพลังงาน*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- A.S.Serebryakov, and others. *Energy dispersive X-ray flourescent (EDXRF) analyzer X-Art for investigation of artworks*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 213 (2004) : 699-702.
- Amersham International plc. *Industrial Gauging and Analytical Instrumentation Source*. Englands : Buckinghamshire, 1984.
- B. Constantinescu, V. Cojocaru, R. Bugoi and A. Sasianu. *Materials Analysis in Archaeometrical Studies at Bucharest Particle Accelerators*. EPAC. Vienna, Austrai, 2000.
- D. Ertel. *X-Ray Fluorescence Analysis*. Karlsruhe : Kernforschungszentrum Karlsruhe GmgH, 1988.
- Eugene P. Bertin. *Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis*. New York : Plenum Press, 1979.
- Glenn.F.Knoll. *Detection and Measurement*. 3<sup>rd</sup> ed. Newyork : John Willey&Sons, 1999.
- K. N. Yu and J. M. Miao. *Non-destructive and Quantitative Investigation of Blue and White Porcelains Using EDXRF*. X-Ray Spectrometry. 25 (1996) : 281-285.

Mario Milazzo. *Radiation applications in art archaeometry X-ray Fluorescence applications to archeometry Possibility of obtaining non-destructive quantitative analyses*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 213 (2004) : 683-692.

P. Wobrauschek, G. Halmetschlager, S. Zamini, C. Jokubonis, G. Trnka and M. Karwowski. *Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis of Celtic Glasses*. X-Ray Spectrometry, 29 (2000) : 25-33.

R.L. Martin. *NBSGSC Version 4.0 : Fundamental Parameters X-Ray Analysis for Personal Computers*. Enumclaw : Rainier Software, 1988.

Roberto Cesareo, and others. *Portable equipment for energy dispersive X-ray Fluorescence analysis of Gitto's frescoes in the Chapel of the Scrovegni*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 213 (2004) : 703-706.

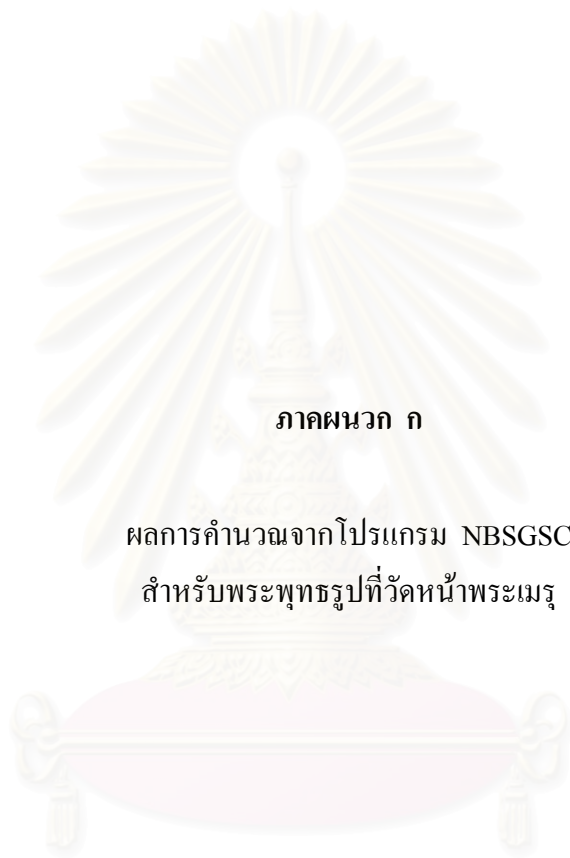


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการคำนวณจากโปรแกรม NBSGSC  
สำหรับพระพุทธรูปที่วัดหน้าพระเมรุ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CALCO87 (NBSGSC) Version 4.3

This MS-DOS implementation (C) Copyright, Rainier Software, 1991.

Runtime portions (C) copyright, Microsoft Corp., 1987.

All rights reserved.

Adapted for MS-DOS from the NBS mainframe by R. Martin, Rainier Software.

The original NBS authors: G.Y. Tao, P.A. Pella, R.M. Rousseau.

See NBS Technical Note 1213 for a full description.

Serial No. 92-0105 for D.K. Book House client, Thailand.

Date: 08-19-2004 Time: 00:44:39

Be sure CAPS LOCK is OFF.

For best output format, use a 132 column printer or 80 column printer in compressed mode. The system should be booted with DEVICE=ANSI.SYS in the CONFIG.SYS file.

How do you wish to enter data:

1-from the keyboard 2-from spreadsheet file? 1

Which system do you wish to analyze:

1-element system 2-oxide system 3-fused disk system? 1

Input number of analytes (Max.=25): 7

Input names of elements (Max.=25), right-justified (A2); e.g., Cr or \_P:

I= 1 Cu

I= 2 Zn

I= 3 Fe

I= 4 Pb

I= 5 Ag

I= 6 Sn

I= 7 Sb

What mass absorption coefficient algorithm do you want to use:

1-Leroux algorithm 2-Heinrich algorithm? 2

Do you want to save calculated alpha coefficients to a datafile (y/n)? y

Input datafile name of alpha coefficients: w1.coe

Sample geometry: input incidence & emergence angles (degrees from horizontal);

two numbers on one line separated by a comma: 90,90

Do you want to filter the incident radiation for any analytes (y/n)? n

Input the characteristic line number you wish to measure,

1-KA, 2-KB, 3-LA1, 4-LB1, 5-LB2, followed by y/n for use of filter.

No space between integer and letter; e.g., 1y or 3n, (I1,A1):

I= 1 Cu 1n

I= 2 Zn 1n

I= 3 Fe 1n

I= 4 Pb 3n

I= 5 Ag 1n

I= 6 Sn 1n

I= 7 Sb 1n

Do you want to print out calculated alpha coefficients (y/n)? n

Which X-ray tube spectral distribution do you prefer:

1-Calculated spectrum from NBS algorithm; 2-measured spectrum? 2

Input the datafile name of X-ray tube spectrum: am241.txt

Do you want to print out the spectral distribution (y/n)? n

Do you want to save the spectral distribution to a datafile (y/n)? n

Date: 08-19-2004

Start time: 00:44:39 End time: 00:48:42

Stop - Program terminated.



STDMAKE (NBSGSC)

Program to enter standards data onto disk file.

What type of standards are available?

1-pure element standards 2-multielement standards: 2

Input number of standards (Max.=20): 5

Do the unknowns contain known concentrations of unanalyzed elements? (y/n) y

Input number of all constituents (Max.=26), number of analytes (Max.=25);

two numbers on one line separated by a comma: 7,7

Input names of all constituents, 8 characters max., left-justified:

I=1 Cu  
I=2 Zn  
I=2 Fe  
I=2 Pb  
I=2 Ag  
I=2 Sn  
I=7 Sb

Input names of analytes, 8 characters max., left-justified:

I=1 Cu  
I=2 Zn  
I=3 Fe  
I=4 Pb  
I=5 Ag  
I=6 Sn  
I=7 Sb

Input I.D. of standards, 8 characters max., left-justified:

I=1 s1  
I=2 s2  
I=3 s3  
I=4 s4  
I=5 s5

Input concentrations (weight fraction) of constituents in the standards;  
listed in analyte order on one line; separate numbers with commas;  
max. line length is 80 characters:

```
I= 1  s1  0.46326,0.10303,0.2182,0.10216,0.03949,0.23235,0.0365  
I= 2  s2  0.16549,0.66687,0.0146,0.02979,0.02056,0.07569,0.02389  
I= 3  s3  0.67237,0.27608,0.0055,0.01088,0.00856,0.01559,0.0082  
I= 4  s4  0.99,0,0,0,0,0  
I= 5  s5  0,0.999,0,0,0,0
```

Input net intensities for analytes in standards and enter 0 for each  
unanalyzed element; listed in analyte order on one line; separate numbers with  
commas; max. line length is 80 characters:

```
I= 1  s1  10118,3057,726,1484,3464,26529,4908  
I= 2  s2  2824,21658,413,582,2191,10165,3219  
I= 3  s3  18921,9104,280,135,1018,1993,1229  
I= 4  s4  33255,0,0,0,0,0  
I= 5  s5  0,42174,0,0,0,0
```

Input datafile name for standards: w1.std

Finished.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UNKMAKE (NBSGSC)

Program to enter unknown data onto disk file.

Do you want to input known concentrations of unanalyzed elements? (y/n) n

Input number of analytes (Max.=25), and number of unknowns to be analyzed (Max.=20); two numbers on one line separated by a comma: 7,7

Input names of analytes, 8 characters max., left-justified:

I= 1 Cu  
I= 2 Zn  
I= 3 Fe  
I= 4 Pb  
I= 5 Ag  
I= 6 Sn  
I= 7 Sb

Input I.D. of unknowns to be analyzed, 8 characters max., left-justified:

I=1 1a  
I= 2 1b  
I= 3 1c  
I= 4 1d  
I= 5 1e  
I= 6 1f  
I=7 1g

Input net intensities for analytes in unknowns; listed in element order on one line; separate numbers with commas; max. line length is 80 characters:

I= 1 1a 25959,4467,64,177,211,4222,309  
I= 2 1b 20770,8725,180,234,141,3915,464  
I= 3 1c 14835,13044,306,134,323,1339,218  
I= 4 1d 15691,13359,121,248,254,1203,201  
I= 5 1e 21792,6754,41,245,73,6452,190  
I= 6 1f 16039,12793,181,122,1742,1572,217  
I= 7 1g 21685,2137,54,744,115,5826,261

Input datafile name for unknowns: w1.unk

Finished.

COMP87 (NBSGSC) Version 4.3

This MS-DOS implementation (C) Copyright, Rainier Software, 1991.

Runtime portions (C) copyright, Microsoft Corp., 1987.

All rights reserved.

Adapted for MS-DOS from the NBS mainframe by R. Martin, Rainier Software.

The original NBS authors: G.Y. Tao, P.A. Pella, R.M. Rousseau.

See NBS Technical Note 1213 for a full description.

Serial No. 92-0105 for D.K. Book House client, Thailand.

Date: 08-19-2004 Time: 01:08:11

Be sure CAPS LOCK is OFF.

For best output format, use a 132 column printer or 80 column printer in compressed mode. The system should be booted with DEVICE=ANSI.SYS in the CONFIG.SYS file.

What type of unknowns do you wish to analyze:

1-element system 2-oxide system 3-fused disk system? 1

Do you want to input standards and unknowns data by:

1-UNKMAKE and STDMAKE datafiles

2-UNKLOTUS and STDLOTUS spreadsheet files

3-keyboard? 1

Input datafile name for unknowns: w1.unk

Do you want to input alpha coefficients by: 1-datafile 2-keyboard? 1

Input datafile name of alpha coefficients: w1.coe

Input datafile name for standards: w1.std

Do you want to correct intensities for dead time (y/n)? n

Do you want to print out calculated relative intensities of standards & calculated pure intensities from standards? (y/n) n

What type of LSF curves do you want to use for calibration:

(1)  $Y=A_0+A_1*X$  (2)  $Y=A_0+A_1*X+A_2*X*X$

(3)  $Y=A_1*X$  (4)  $Y=A_1*X+A_2*X*X$  ? 4

Do you want to print out LSF coefficients? (y/n) n

Enter graphics device driver to load to display calibration curve:

0 - Continue without further plotting

1 - Screen driver file SCREEN.DRV

2 - Plotter driver file PLOTTER.DRV

3 - Printer driver file PRINTER.DRV: 0

Smp.No.	Total	Cu	Zn	Fe	Pb	Ag	Sn	Sb
1a	101.74	85.171	12.425	.181	.756	.143	2.837	.218
1b	99.21	70.249	24.334	.486	1.045	.095	2.657	.331
1c	87.87	49.795	35.449	.780	.564	.226	.886	.157
1d	91.34	52.558	36.139	.368	1.130	.177	.805	.147
1e	99.43	74.392	19.183	.135	1.091	.048	4.446	.136
1f	90.26	53.384	34.536	.514	.510	.118	1.043	.156
1g	92.19	76.853	6.454	.219	4.279	.079	4.124	.194

Do you wish to save the TABULATION OF RESULTS to disk (y/n)? n

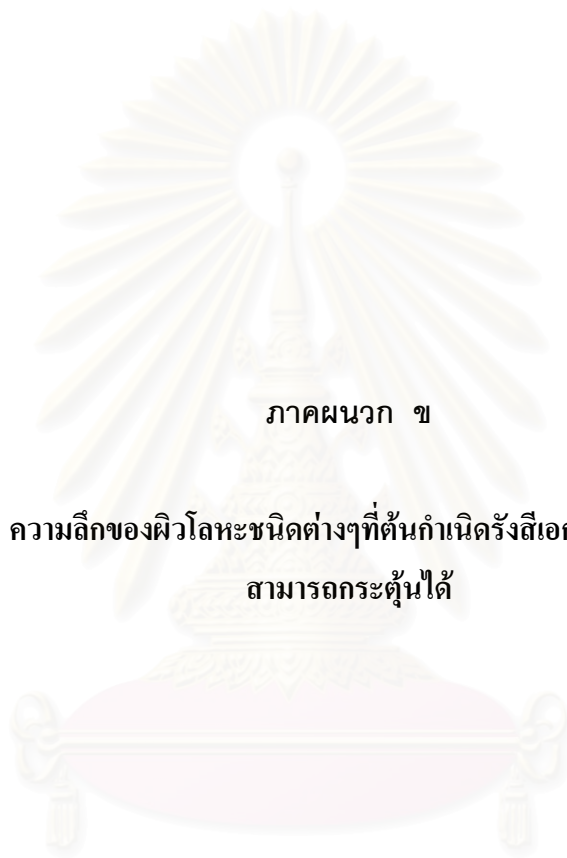
Do you wish to compare these results with other previously known values for these specimens (y/n)? n

Do you want to try another type of calibration curve (y/n)? n

Date: 08-19-2004

Start time: 01:08:11 End time: 01:11:07

Stop - Program terminated.



ภาคผนวก ข

ความลึกของผิวโลหะชนิดต่างๆที่ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ  
สามารถกระตุ้นได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การหาค่าความลึกของผิวโลหะชนิดต่างๆที่ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิสามารถกระตุ้นได้

เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานค่อนข้างต่ำ ฉะนั้นจึงมีข้อจำกัดในการทะลุเข้าผิวโลหะชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงจะคำนวณหาค่าความหนาของผิวโลหะที่ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะสามารถทะลุผ่านไปได้ ทำได้โดยการคำนวณจากสูตร

$$m_{sat} = 3/(\mu_e + \mu_f)$$

โดย  $m_{sat}$  คือ ความหนา หน่วยเป็น  $g/cm^2$

$\mu_e$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อโฟตอนปฐมภูมิ

$\mu_f$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อรังสีเอกซ์เรือง

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ 3 ชนิด คือ Am-241 (พลังงาน 60 keV) Pu-238 (พลังงาน 99 keV) และ Co-57 (พลังงาน 122 keV) โดยได้คำนวณกับโลหะ 7 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี เงิน ดีบุก ตะกั่วและทอง

ตารางที่ 1 ค่าความลึกของผิวโลหะชนิดต่างๆที่ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิสามารถกระตุ้นได้

ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์	ความลึกของผิวโลหะ ( $\mu m$ )						
	Fe	Cu	Zn	Ag	Sn	Pb	Au
Am-241	56.34	57.96	90.37	142.22	220.88	16.75	19.45
Pu-238	57.05	59.16	93.05	179.81	296.32	16.83	19.11
Co-57	57.20	59.42	93.59	190.35	319.87	16.97	19.79

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรรรณ ตรีรกนาถ เกิดเมื่อวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยบูรพา ในปีการศึกษา 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2544 สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย