

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบของศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอกซ์
ในระบบการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น



นางสาวพรพรรณ ศิลามาศ
นายโอฬาร คุณสมบัติกุล

11/21/8
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62297**
วัน,เดือน,ปี... **8** . **8** . **2549**

b. 11620018
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EFFECT OF X-RAY TUBE POTENTIAL OF WAVELENGTH
DISPERSIVE X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY
SYSTEM**




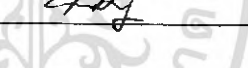


A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง ผลกระทบของการปรับคักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์
 ในระบบการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น
นักศึกษา นางสาวพรพรรณ ศีลามาศ
 นายโอฬาร คุณสมบัติกุล
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์	
กรรมการ ดร.ปิติพร ถนอมงาม	
กรรมการ รศ.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการที่ปรึกษา ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	



(รศ.วิชาญ เดชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	ผลกระทบของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์ ในระบบการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น
นักศึกษา	นางสาวพรพรรณ สีลามาศ นายโอฬาร คุณสมบัติกุล
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงของหลอดรังสีเอ็กซ์ในระบบการวัดและวิเคราะห์ด้วยการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบการแจกแจงความยาวคลื่น รุ่น PW2400 นี้ ศักดาไฟฟ้าสูงที่ปรับให้กับหลอดรังสีเอ็กซ์ตั้งแต่ 25 kV-50 kV ที่กระแสคงที่ 45 mA , ปรับที่ศักดาไฟฟ้าสูง 25 kV-50 kV ที่กระแสคงที่ 50 mA และปรับที่ศักดาไฟฟ้าสูง 25 kV-50 kV ที่กระแสคงที่ 60 mA เพื่อนำไปกระตุ้นสารตัวอย่าง คือ แมกนีเซียม (Mg), ซิลิคอน (Si), แคลเซียม (Ca), วานาเดียม (V), แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) จากผลการศึกษาจะพบว่าความเหมาะสมของศักดาไฟฟ้าสูงที่ปรับให้กับหลอดรังสีเอ็กซ์เพื่อไปกระตุ้นสารตัวอย่างควรมีค่าอยู่ตรงจุดกึ่งกลางนั่นก็คือ 40 kV ซึ่งศักดาไฟฟ้าสูงที่ปรับให้นี้จะสัมพันธ์กับค่าแอมซอร์บชันเอจ (absorption edge) ของธาตุ ส่วนกระแสที่ปรับนั้นไม่มีผลต่อการกระตุ้นมากนัก ดังนั้นการปรับศักดาไฟฟ้าสูงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบเพื่อไปกระตุ้นต่อธาตุและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความไวในการวิเคราะห์ธาตุ โดยที่ธาตุพลังงานต่ำ การปรับศักดาไฟฟ้าเมื่อมีค่าสูงขึ้นทำให้ความไวในการวัดและวิเคราะห์ธาตุลดลง ส่วนธาตุที่พลังงานสูงการปรับศักดาไฟฟ้าเมื่อมีค่าสูงขึ้นทำให้ความไวในการวัดและวิเคราะห์ธาตุสูงขึ้นตาม

Special Project Title Effect of X-Ray Tube Potential of Wavelength Dispersive
X-Ray Fluorescence Spectroscopy System

Name Miss.Pompan Silamas
Mr.Olam Koonsombatkul

Department Applied Physics Faculty of Science

Program Applied Physics-Science and Industry Instrumentation

Academic Year 2005

Special Project Advisor Sarai Lekcha-um

ABSTRACT

Studying the effect of high variable potential of x-ray tube on the measurement and analyzing by wavelength dispersive x-ray fluorescence spectroscopy system model PW2400. Assigning to fix the current at 45, 50 and 60 mA, respectively then tune the voltage suitable for the x-ray tube at 25-50 kV in every element of current in order to stimulate some samples such as Mg, Si, Ca, V, Mn and Fe. From the experiment, it was found that high voltage used to stimulate the sample should be about ~40 kV which the effect of variable high potential correspond to the absorption edge but the current has less effect than that. Therefore, the high potential has the direct proportion to an effective energy of x-ray for the stimulation of sample and corresponded to sensitivity on measurement and analysis. For the low energy elements, the increasing of x-ray tube potential makes sensitivity decrease. In the case of the high energy elements, the increasing potential also makes sensitivity increase.

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาโครงการพิเศษเรื่องผลกระทบของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงต่อการวิเคราะห์ธาตุ ด้วยการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่นในครั้งนี้จะไม่สำเร็จเลยถ้าไม่มีบุคคลเหล่านี้

ขอขอบคุณพี่สมบูรณ์ เจริญภูมิการกิจ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทุกอย่างในการทดลอง ไม่ว่าจะเป็น การเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐาน การใช้เครื่องมือ ช่วยหาข้อมูลของเครื่อง WDXRFs model PW2400 และช่วยไขปัญหาข้อสงสัยต่าง ๆ เกี่ยวกับเครื่องมือและระบบ รวมถึงวิธีการเขียนกราฟ

ขอขอบคุณพี่มานพ ศิระรัตนสมโภชน์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้สารตัวอย่างมาตรฐานและคำแนะนำที่ดี รวมถึงการจุดประกายความคิดบางอย่างในการทำงาน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคนที่ให้ความสะดวกในการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนผู้ร่วมงานที่ดีที่คอยช่วยเหลือทุกอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการทำรูปเล่ม โครงการพิเศษนี้ การเตรียมสารตัวอย่าง รวมถึงการทดลอง

และที่สำคัญขอขอบคุณ ผศ.สาทรราช เล็กชะอุ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่แสนใจดี ที่ช่วยหาสถานที่ฝึกงานให้ซึ่งเป็นสถานที่ที่เป็นจุดเริ่มต้นในการทำโครงการพิเศษ ช่วยชี้แนะแนวทางการทดลอง แนวทางการทำงานจริง การแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นและช่วยสอนหลายสิ่งหลายอย่างที่ไม่ได้พบแค่ในตำราเรียนหรือในห้องสี่เหลี่ยมเท่านั้น

และต้องขอขอบคุณบิดา มารดาผู้ให้กำเนิด ให้ทุกสิ่งทุกอย่างในชีวิต ไม่ว่าจะเป็นการศึกษา การเงิน ความสุขต่าง ๆ มากมายในชีวิต คอยดูแลเราจนเติบโตพร้อมที่จะยืนได้ด้วยขาของเราเองและคอยให้คำปรึกษาต่าง ๆ ที่ผ่านมามีในชีวิต และที่สำคัญคือได้สอนให้รู้จักที่จะเติบโตเป็นผู้ใหญ่ในวันข้างหน้าที่จะมาถึงในไม่ช้า

นายโอฬาร คุณสมบัติกุล

นางสาวพรพรรณ สีลามาศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 บทนำ	5
2.2 หลักการทั่วไปและการเกิดสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์	7
2.3 คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (Properties of X-rays)	14
2.4 ประวัติการเกิดและการพัฒนาเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer)	20
2.5 ระบบเครื่องมือวัดของสเปกโตรมิเตอร์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ แบบแจกแจงความยาวคลื่น (Instrumentation of Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; WDXRFS)	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	52
3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของระบบ WDXRFS Model PW 2400	53
3.2 ศึกษาโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ	64
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	66

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	71
4.1 การทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวิเคราะห์ของระบบ	71
4.2 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพของสารมาตรฐานตัวอย่าง	72
4.3 การปรับศักคาไฟฟ้าสูงสำหรับการวัดและวิเคราะห์	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	104
5.1 สรุปผลการทดลองจากการวัดและวิเคราะห์	104
5.2 วิจาร์ณผลการทดลอง	105
5.3 ข้อเสนอแนะ	105
บรรณานุกรม	106
ภาคผนวก	
- Appendix 1 Wavelengths of the x-ray absorption edges of the chemical elements	
- Appendix 2 X-ray properties	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 Electron shell and quantum number designations	11
ตารางที่ 2.2 แสดงสัญลักษณ์สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์และการเปลี่ยนสภาวะของระดับพลังงาน	13
ตารางที่ 2.3 ลำดับเวลาในการพัฒนาเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรมิเตอร์	21
ตารางที่ 2.4 สภาพไวที่สุดในการวิเคราะห์ระดับจุลภาคโดยเครื่องมือหรือวิธีการต่าง ๆ ภายใต้ง่อนไขที่ดีที่สุด	23
ตารางที่ 2.5 Physical properties of radioisotopes used in non-dispersive x-ray fluorescence analysis	27
ตารางที่ 2.6 แสดงการเลือกเป่าโลหะที่เหมาะสมกับงานวิเคราะห์	31
ตารางที่ 2.7 แสดงผลของความต่างศักย์ (kV) และกระแส (mA) ต่อการผลิตรังสีเอ็กซ์	36
ตารางที่ 2.8 แสดงการเลือกใช้ฟิลเตอร์ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์	42
ตารางที่ 2.9 แสดงการเลือกใช้ผลึกทั่ว ๆ ไปกับช่วงความยาวคลื่นของธาตุ	45
ตารางที่ 3.1 ตารางธาตุ	52
ตารางที่ 3.2 อธิบายการทำงานของไอคอนต่าง ๆ	65
ตารางที่ 3.3 แสดงวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์	70
ตารางที่ 4.1 แสดงการปรับเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ WDXRFS Model PW2400 โดยใช้สารตัวอย่างมาตรฐานที่เป็น SemiQF ซึ่งทำการทดสอบเมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2547	71
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบของแต่ละธาตุในเชิงปริมาณด้วยวิธีการปกติ	80
ตารางที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 45 mA	82
ตารางที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 50 mA	83
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 60 mA	84
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของ Sensitivity และ Relative Sensitivity ของแต่ละธาตุ โดยการปรับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 45 mA	92
ตารางที่ 4.7 แสดงผลของ Sensitivity และ Relative Sensitivity ของแต่ละธาตุ โดยการปรับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 50 mA	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.8 แสดงผลของSensitivity และ Relative Sensitivityของแต่ละธาตุ โดยการปรับ ศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 60 mA	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 The electromagnetic spectrum	5
รูปที่ 2.2 Intensity output from a Molybdenum target x-ray at 10, 20 and 30 kV	8
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว	9
รูปที่ 2.4 แสดงการเกิด Auger effect	10
รูปที่ 2.5 Fluorescence yield as a function of atomic number	11
รูปที่ 2.6 Typical series of electron transition that may follow creation of a K-shell vacancy	12
รูปที่ 2.7 Interaction of the primary x-ray beam with the sample	15
รูปที่ 2.8 Incoherent (Compton) scatter of an x-ray photon	16
รูปที่ 2.9 Planes of high atomic density	17
รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	17
รูปที่ 2.11 Diffraction by an ordered array of atoms	18
รูปที่ 2.12 Diffraction by crystals-Bragg version	18
รูปที่ 2.13 Original of peaks and background in measured X-ray spectra	20
รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของระบบ WDXRFS	25
รูปที่ 2.15 Single section hot-cathode, high vacuum, copper-backed, self-rectifying, x-ray tube (radiator type)	26
รูปที่ 2.16 Wave guide structure for a linear accelerator x-ray tube	26
รูปที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบของหลอดรังสีเอ็กซ์	28
รูปที่ 2.18 Schematic diagram of a side window x-ray tube	29
รูปที่ 2.19 Schematic diagram of an end window x-ray tube	29
รูปที่ 2.20 Diagram of cathode	30
รูปที่ 2.21 Diagram of anode	31
รูปที่ 2.22 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์	33
รูปที่ 2.23 วงจรเบื้องต้นของหลอดรังสีเอ็กซ์	34
รูปที่ 2.24 กราฟแสดงผลของกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และเลขอะตอม ของธาตุที่เป็น ขั้วบวกต่อสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง	35

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 The output of a tungsten tube at various operating voltage (left hand diagram) and the corresponding fluorescence intensity produced from a copper specimen (right hand diagram)	37
รูปที่ 2.26 The effect of kV on sensitivity	38
รูปที่ 2.27 Variation of output count rate with dead time	39
รูปที่ 2.28 Function of primary-beam enhancement filter	40
รูปที่ 2.29 The use of primary-beam filters	41
รูปที่ 2.30 Layout of a typical wavelength dispersive spectrometer	43
รูปที่ 2.31 Dispersion of common analyzer crystals as a function of interplanar spacing ($2d$)	46
รูปที่ 2.32 A comparison of the pulse height spectra from incident silver K-series x-rays as recorded by three different detectors with varying energy resolution	47
รูปที่ 2.33 Schematic diagram of a proportional counter	48
รูปที่ 2.34 Gas-amplification factor as a function of applied potential for the gas-filled x-ray detector	48
รูปที่ 2.35 Schematic diagram of a scintillation counter	49
รูปที่ 2.36 Basic element of a PM. Tube	50
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของ WDXRFS Model PW 2400	53
รูปที่ 3.2 Super sharp x-ray tube	54
รูปที่ 3.3 Emission characteristic	55
รูปที่ 3.4 Filament characteristic	55
รูปที่ 3.5 Maximum power characteristic	56
รูปที่ 3.6 แสดงโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ	64
รูปที่ 3.7 ซ้ำต - เป็นตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน ขวา - เป็นตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	68

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง	69
(ก) ถ้วยบดสารตัวอย่าง	69
(ข) วงอะลูมิเนียม	69
(ค) เครื่องชั่งสาร	69
(ง) เครื่องบดสาร Ball Mill	69
(จ) เครื่องอัดสารตัวอย่าง	70
รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุแมกนีเซียม (Mg)	77
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุซิลิกอน (Si)	77
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุแคลเซียม (Ca)	78
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุวานาเดียม (V)	78
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุแมงกานีส (Mn)	79
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุเหล็ก (Fe)	79
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (kcps) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Mg	85
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (kcps) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Si	86
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (kcps) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Ca	87
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (kcps) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ V	88
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (kcps) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Mn	89
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (kcps) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Fe	90
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Mg	95
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Si	96
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Ca	97
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ V	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Mn	99
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Fe	100
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ที่กระแส 45 mA	101
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ที่กระแส 50 mA	102
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ที่กระแส 60 mA	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

(Introduction)

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

การวิเคราะห์หาส่วนผสม (ปริมาณ) ของธาตุที่มีอยู่ในวัสดุต่าง ๆ สำหรับงานทางด้านการศึกษา การวิจัยและโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น วิเคราะห์หาส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน (Fly ash) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของ โรงงาน ไฟฟ้าถ่านหิน (อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง) การวิเคราะห์หาส่วนผสมของธาตุในดิน หิน สำหรับบริเวณที่จะสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำ การวิเคราะห์หาส่วนผสมของธาตุจากปริมาณฝุ่นที่มีผลต่อรถยนต์ การวิเคราะห์หาส่วนผสมของธาตุในน้ำมันสำหรับ โรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์หาส่วนผสมของธาตุในวัสดุหรือตัวอย่างในแต่ละชนิดที่จะผลิตขึ้นใหม่หรือที่จะนำเข้ามาในประเทศถือว่าเป็นเรื่องสำคัญมาก ซึ่งจะพบว่าวิธีการวิเคราะห์หาส่วนผสมของธาตุในวัสดุมีหลากหลายวิธีเช่น วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสปาร์กเอมิสชัน (Spark emission spectrometer) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน (Atomic absorption spectrometer) วิธีการวิเคราะห์ด้วยระบบการเรืองรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectrometer) เป็นต้น เครื่องมือวิเคราะห์แต่ละแบบนี้จะมีลักษณะและหลักการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยในที่นี้จะสนใจศึกษาเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณด้วยระบบการเรืองรังสีเอ็กซ์ เพราะเนื่องจากวิธีนี้เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive) วิเคราะห์ตัวอย่าง ได้ทั้งของแข็งและของเหลว ซึ่งมีความสะดวก รวดเร็ว และให้ผลที่แม่นยำ

ระบบการวัดและการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอ็กซ์แบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกัน คือ

1. ระบบวิเคราะห์การเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงพลังงาน (Energy Dispersive X-Rays Fluorescence Spectrometer; EDXRFS)
2. ระบบวิเคราะห์การเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Rays Fluorescence Spectrometer; WDXRFS)

ระบบการวิเคราะห์แบบ EDXRFS และ WDXRFS จะออกแบบแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (x-ray source) ได้ 2 แบบด้วยกัน คือ แหล่งกำเนิดแบบกัมมันตภาพรังสี (radioisotope) และแหล่งกำเนิดแบบหลอดรังสีเอ็กซ์ (x-ray tube) ถ้าเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดทั้ง 2 แบบจะพบว่า

ประการแรก สารกัมมันตภาพรังสีไม่สามารถปรับความเข้มแสง (intensity) และพลังงาน (energy) ได้ เมื่อเทียบกับหลอดรังสีเอกซ์

ประการที่สอง อายุการใช้งานของหลอดรังสีเอกซ์จะมากกว่าสารกัมมันตภาพรังสี

ประการที่สาม หลอดรังสีเอกซ์จะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าสารกัมมันตภาพรังสี แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบหลอดรังสีเอกซ์จะสามารถปรับความเข้มแสงและพลังงานของหลอดโดยอาศัยหลักการของขนาดกำลังไฟฟ้าและเป้าโลหะ (target) โดยการปรับเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าซึ่งจะขึ้นอยู่กับธาตุในวัสดุที่ต้องการจะวิเคราะห์ เพราะเนื่องจากธาตุแต่ละธาตุจะมีระดับพลังงานในการกระตุ้นที่ไม่เท่ากัน

โครงการพิเศษนี้จะศึกษาจะศึกษาผลกระทบของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงต่อผลการวิเคราะห์ธาตุ ซึ่งเครื่องมือที่จะศึกษาเป็นระบบ WDXRFS Model PW2400 ของบริษัทฟิลิปป์ (Phillip) ประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งเป้าโลหะของหลอดรังสีเอกซ์จะทำด้วยธาตุโรเดียม (Rh) และกำลังของหลอดรังสีเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 3 kW ระบบนี้จะสามารถวัดธาตุได้ตั้งแต่ $Z = 11$ ซึ่งก็คือ โซเดียม (Na) ขึ้นไปจนถึงธาตุหนัก (hard element) ซึ่งก็คือ ยูเรเนียม (U) โดยในโครงการพิเศษนี้จะศึกษาผลกระทบในช่วงพลังงาน 1.3 ถึง 7.1 keV หรือธาตุตั้งแต่ Mg ถึง Fe

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลอดรังสีเอกซ์ (X-Ray tube) ของระบบ WDXRFS Model PW2400

X-Ray Spectrometer ของ Philip ประเทศเนเธอร์แลนด์

1.2.2 เพื่อศึกษาการปรับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ให้เหมาะสมสำหรับงานวิเคราะห์ตัวอย่างที่สนใจ

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงต่อพลังงาน absorption edge

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอ็กซ์
- 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ WDXRFS Model PW2400 X-Ray Spectrometer ของ Phillip ประเทศเนเธอร์แลนด์
- 1.3.3 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของหลอดรังสีเอ็กซ์ (X-Ray tube) ของระบบ WDXRFS Model PW2400 X-Ray Spectrometer ของ Philip ประเทศเนเธอร์แลนด์
- 1.3.4 ศึกษาและเตรียมตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เครื่องมือ WDXRFS Model PW2400 X-Ray Spectrometer ของ Philip ประเทศเนเธอร์แลนด์
- 1.3.5 ศึกษาและทำการปรับค่าศักดาไฟฟ้าสูงและวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณพร้อมเปรียบเทียบความแตกต่างของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงโดยใช้ระบบอัตโนมัติและระบบปรับด้วยมือ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน	ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ธาตุจากเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ (XRF) ทั้ง 2 ชนิด คือ EDXRFS และ WDXRFS
กรกฎาคม	ศึกษาทฤษฎีของหลอดรังสีเอ็กซ์ของเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ (XRF) ทั้ง 2 ชนิด คือ EDXRFS และ WDXRFS
สิงหาคม	ศึกษาการเตรียมตัวอย่างและการใช้เครื่องจากหลักการในหนังสือ
กันยายน	หาตัวอย่างในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลใช้เป็นค่ามาตรฐานในการทดลอง
ตุลาคม	ฝึกฝนการใช้เครื่อง XRF จากเครื่องที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พฤศจิกายน	ทำการทดลองจากตัวอย่างมาตรฐานชนิดผง
ธันวาคม	วิเคราะห์และประเมินผลตามจุดประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำความรู้พื้นฐานทางด้านรังสีเอ็กซ์มาประยุกต์กับระบบการวัดและวิเคราะห์ด้วยการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น
2. การปรับค่าศักดาไฟฟ้าสูงให้เหมาะสมต่อย่านการวัดธาตุในเชิงปริมาณจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความถูกต้อง (Accuracy) สูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการวัดและวิเคราะห์ของระบบ WDXRF สำหรับงานในด้านการศึกษา ค้นคว้า วิจัย และในด้านอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

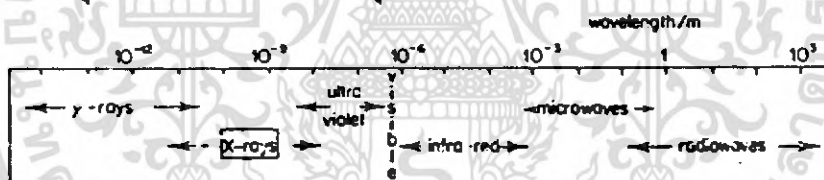
บทที่ 2

หลักการเกิดและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์

(Production and Properties of X-Rays)

2.1 บทนำ

ในวันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1895 Wilhelm Conrad Roentgen ค้นพบรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ที่ University of Wurzburg ประเทศเยอรมนี ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.0001-100 อังสตรอม (\AA) ดังรูปที่ 2.1 และก่อนปี ค.ศ.1950 ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ต่างๆ จากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างรังสีเอ็กซ์กับสสาร ซึ่งผลจากอันตรกิริยานี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับปฏิบัติการทางฟิสิกส์อย่างมาก เพราะปรากฏการณ์ต่างๆ ของรังสีเอ็กซ์จะมีลักษณะเฉพาะของแต่ละสสาร ทำให้เกิดเป็นเทคนิคการวิเคราะห์อย่างกว้างขวาง อย่างเช่น การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และสามารถใช้หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) วิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 The electromagnetic spectrum

รังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ซึ่งเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค (wave-particle duality) แล้วแต่กรณี สำหรับคุณสมบัติที่เป็นอนุภาคในที่นี้จะเรียกว่า “โฟตอนรังสีเอ็กซ์ (X-ray photon)” ซึ่ง โฟตอนรังสีเอ็กซ์ที่นำไปใช้ประโยชน์จะมีพลังงานที่สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน โฟตอนรังสีเอ็กซ์และความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} Joule·second

ν คือ ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ดังนั้นสมการที่ 2.1 จึงกลายเป็น

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที
 λ คือ ความยาวคลื่น

จากสมการที่ (2.2) เมื่อแทนค่าคงที่ (hc) และจัดหน่วยความยาวคลื่นเป็นอังสตรอม
 $(1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 0.0001 \mu\text{m})$ จะได้พลังงานในหน่วยของกิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) และ
 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$E (\text{keV}) = \frac{12.396}{\lambda} \quad (2.3)$$

โฟตอนรังสีเอ็กซ์เกิดจากการหลุด (ejection) ของอิเล็กตรอนจากวงโคจรของอะตอมแล้ว
 เกิดการปลดปล่อยรังสีซึ่งเป็นพลังงานส่วนเกินจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูง
 ไปสู่ระดับพลังงานต่ำ เมื่อลำโฟตอนรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนวัตถุจะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่าง
 วัตถุกับลำโฟตอนรังสีเอ็กซ์ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ขึ้น อย่างเช่น เกิดการเปล่งแสง (emission)
 การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) หรือการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น เมื่อลำแสง
 ของโฟตอนรังสีเอ็กซ์ผ่านตัวกลางความเข้มแสงจะลดลงตามทิศทางที่ผ่าน โดยเป็นผลมาจากอันตร-
 กิริยาการกระเจิงของปรากฏการณ์การดูดกลืนโฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric absorption) และส่วนที่
 สำคัญในการทำให้ความเข้มแสงลดลงก็คือผลการดูดกลืนและความเข้ม (magnitude) ตัวอย่างเช่น
 โฟตอนรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบตัวกลางจะเกิดการสูญเสียความเข้มเนื่องจากการดูดกลืนตามทิศทาง
 ที่ผ่าน โดยการดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่า Z (atomic number) ของธาตุในตัวกลาง นั่นคือ
 ธาตุที่มีค่า Z สูงจะลดความเข้มโฟตอนรังสีเอ็กซ์ได้มากกว่าธาตุที่มีค่า Z ต่ำ

2.2 หลักการทั่วไปและการเกิดสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์

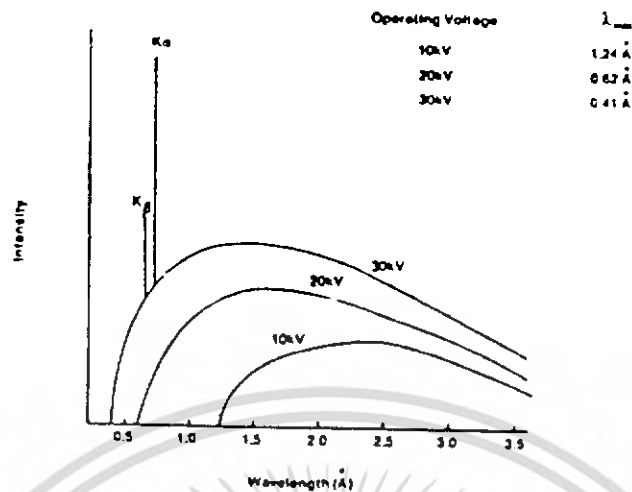
รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมจากระดับพลังงานสูงไปสู่ระดับพลังงานต่ำ รังสีเอ็กซ์นี้อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (isotope) หรือเกิดจากกลไกอิเล็กตรอนิกส์ที่มนุษย์ผลิตขึ้น กล่าวคือเมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้น (excite) จะทำให้วงโคจรของอะตอมนอกนิวเคลียสได้รับผลการกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนจากสภาวะปกติ (ground state) ไปสู่สภาวะกระตุ้น (excited state) และจะลดระดับพลังงานกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยที่มวลอะตอมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่กลับเข้าสู่สภาวะปกตินั้นจะเกิดการแทนที่ว่างจากอิเล็กตรอนวงนอกซึ่งมีพลังงานสูงเข้าแทนที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออกไปจากวงโคจรนั้น การแทนที่นี้จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน ออกมาจากอะตอมทุกครั้งที่ได้รับการกระตุ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า “รังสีเอ็กซ์ (X-ray)” แต่ถ้าสภาวะรับการกระตุ้นให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานเกิดขึ้นในนิวเคลียส การลดระดับพลังงานสู่สภาวะปกติบริเวณนิวเคลียสที่ปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาจะเรียกว่า “รังสีแกมมา (γ -ray)” ซึ่งจะเห็นได้ว่ารังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมามีคุณสมบัติที่เหมือนกัน แต่ต่างกันตรงที่แหล่งกำเนิดเท่านั้น

2.2.1 การปล่อยรังสีเอ็กซ์

ในทางปฏิบัติมักใช้วิธีการกระตุ้นหรือยิงด้วยอิเล็กตรอนหรือโฟตอนทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของรังสีเอ็กซ์ตามกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอนได้ 2 ชนิดคือ

2.2.1.1 รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray)

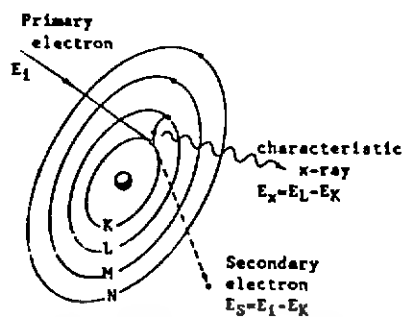
รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นรังสีที่มีพลังงานต่อเนื่องกระจายจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุด บางครั้งเรียกว่า “โพลีโครมาติก (Polychromatic)” หรือ “รังสีขาว (White radiation)” หรือ “เบรมสตราลุง (Bremsstrahlung or Breaking radiation)” ซึ่งปรากฏการณ์เกิดรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องนี้เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าสู่สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้นิวเคลียส ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตจะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และลดความเร็วลงพร้อมทั้งสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา ซึ่งความเข้มและความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์จะกระจายอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.2 โดยลักษณะรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเลขอะตอม (atomic number) ที่นำมาทำเป้าของหลอดรังสีเอ็กซ์ (target x-ray tube)



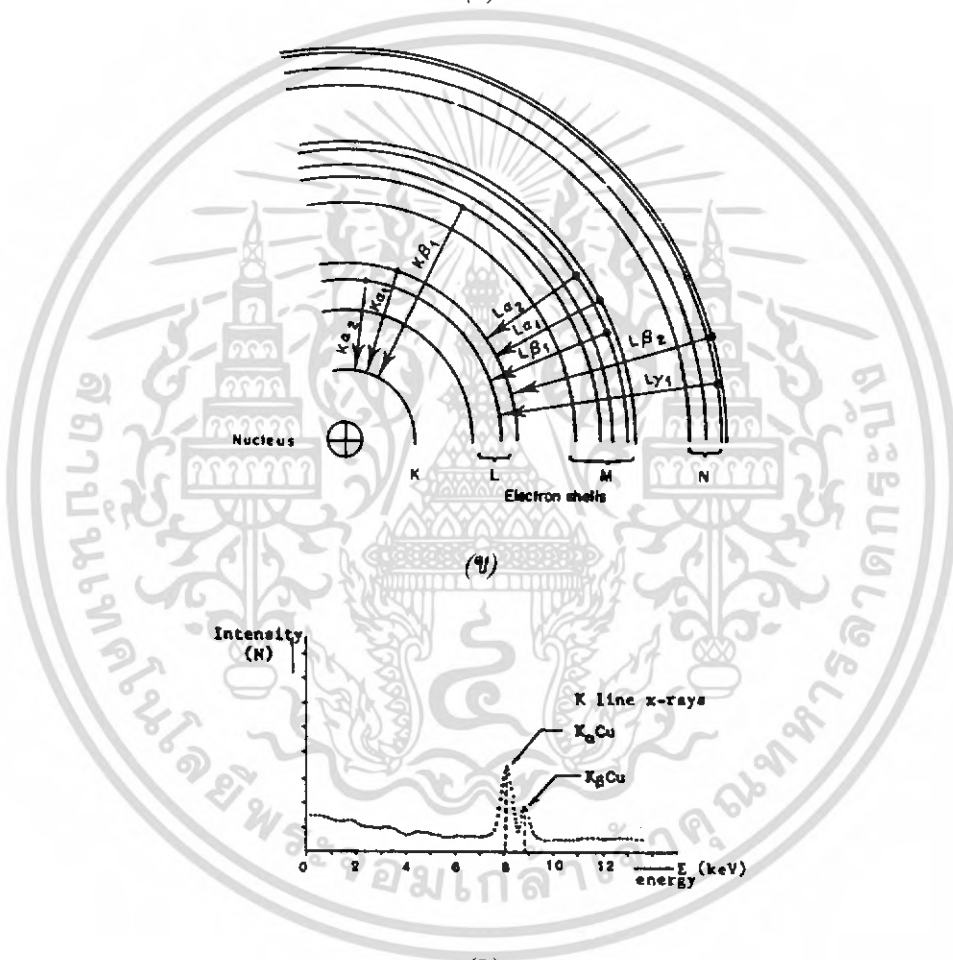
รูปที่ 2.2 Intensity output from a Molybdenum target x-ray at 10, 20 and 30 kV

2.2.1.2 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray)

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวมีลักษณะเป็นรังสีที่มีพลังงานเดียว (monochromatic) เพราะเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอน ซึ่งปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่น ๆ หรือโฟตอนพลังงานสูง (E) เคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K, L, M หรือ N เป็นต้น แล้วเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนในชั้น โคจรเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้น โคจรก็จะหลุดออกจากวงโคจรเกิดเป็นที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้น โคจรนั้น ทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในระยะเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวง โคจรชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ในวง โคจรชั้นที่ว่างและเกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ พลังงานส่วนที่เกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับค่าต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้น โคจรของอิเล็กตรอนและชนิดของธาตุนั้น ๆ และจะมีพลังงานเฉพาะค่า ดังนั้นรังสีเอกซ์ชนิดนี้จึงเรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” (Characteristic X-ray)



(ก)



(ค)

รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

(ก) อันตรกิริยาของอะตอม

(ข) การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้น โคจร
ต่างๆ

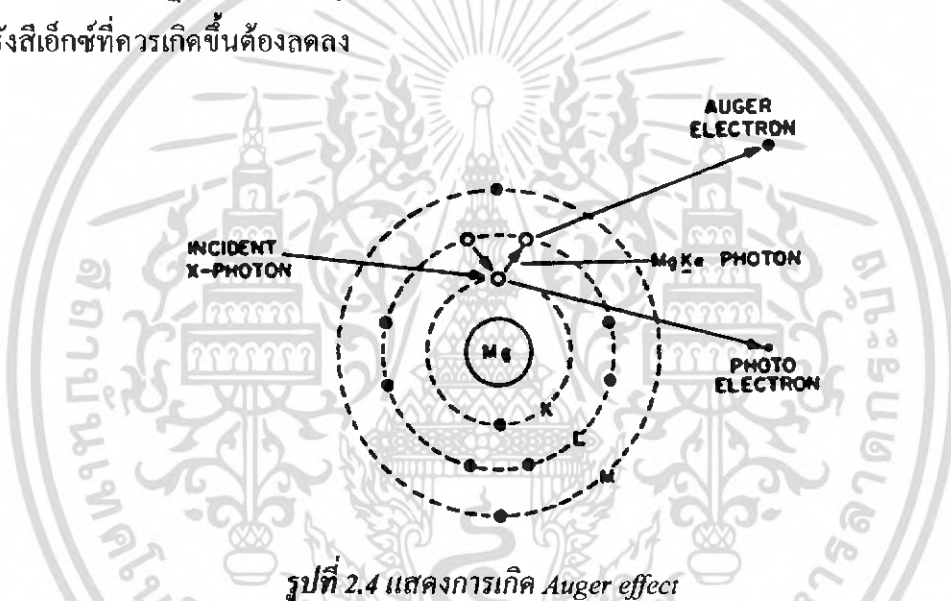
(ค) สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect)

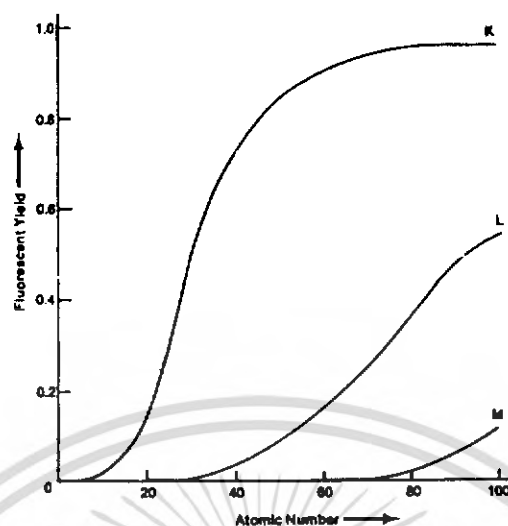
อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรจะมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)” และอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคือ “ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect)” อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากวงโคจร K-shell จะเกิดที่ว่างขึ้นทำให้อิเล็กตรอนในชั้น L-shell เข้ามาแทนที่ เกิดเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เรียกว่า “K x-ray” ซึ่งรังสีเอ็กซ์นี้แทนที่จะหลุดออกไปเฉย ๆ กลับไปเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้น L-shell อีก ทำให้เกิดเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เรียกว่า “L x-ray” ขึ้นตามมา

คังรูป 2.4 เราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปแล้วไปทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้นโคจรอื่นนี้ว่า “ออเจอิเล็กตรอน (Auger electron)” ปรากฏการณ์นี้จะคล้ายกับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก แต่ต่างกันตรงที่ปรากฏการณ์ออเจ (Auger effect) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในอะตอมและส่งผลทำให้รังสีเอ็กซ์ที่ควรเกิดขึ้นต้องลดลง



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิด Auger effect

การแทนที่ว่างในวงโคจร K และ L จะเกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-9} – 10^{-16} วินาทีเท่านั้น อัตราการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวหรือการเรืองรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence) ต่ออัตราการเกิดที่ว่างจะเรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์ (Fluorescence yield)” ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม โดยปกติแล้วรังสีเอ็กซ์ระดับชั้น K จะมีฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์สูงกว่าชั้น L, M, ... ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และจะเห็นว่าฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์จะสูงขึ้นเมื่อค่า Z (atomic numbers) สูงขึ้นตามลำดับ



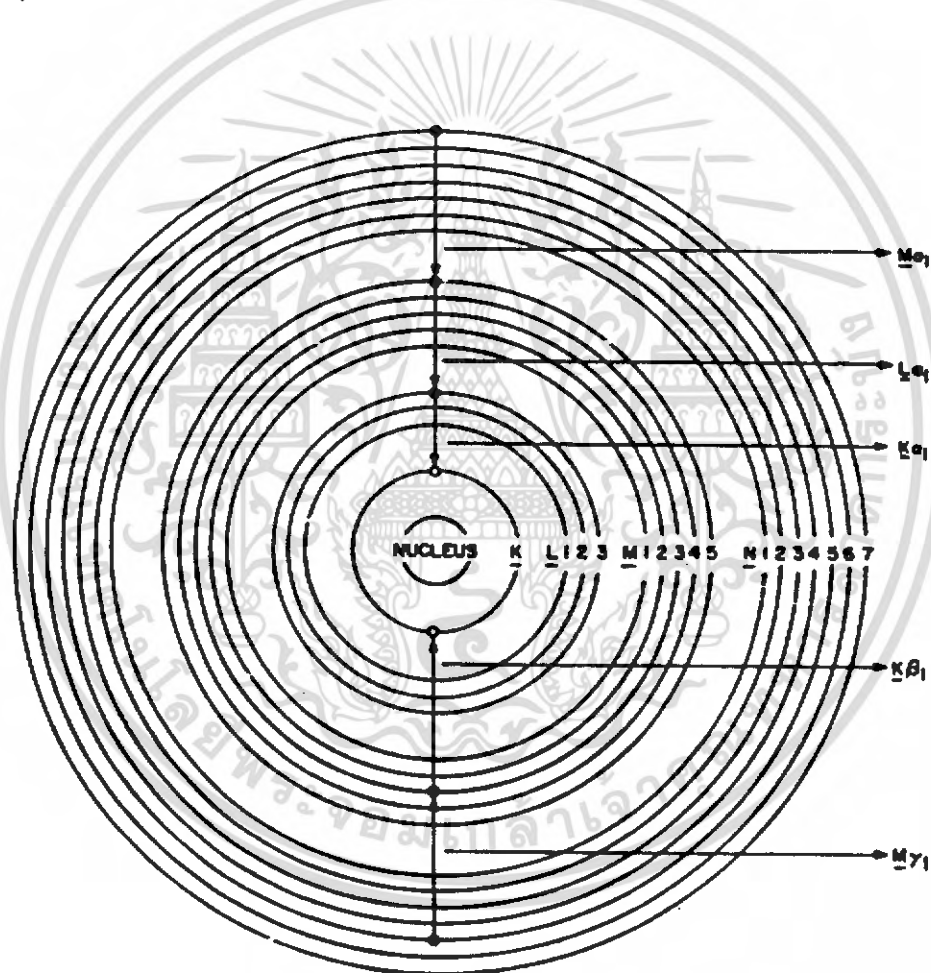
รูปที่ 2.5 Fluorescence yield as a function of atomic number

ตารางที่ 2.1 Electron shell and quantum number designations

X-ray Shell	No. of electrons	Quantum number n	l	j	s-p-d notation
K	2	1	0	1/2	1s 1/2
L I	2	2	0	1/2	2s 1/2
L II	2	2	1	1/2	2p 1/2
L III	4	2	1	3/2	2p 3/2
M I	2	3	0	1/2	3s 1/2
M II	2	3	1	1/2	3p 1/2
M III	4	3	1	3/2	3p 3/2
M IV	4	3	2	3/2	3d 3/2
M V	6	3	2	5/2	3d 5/2
N I	2	4	0	1/2	4s 1/2
N II	2	4	1	1/2	4p 1/2
N III	4	4	1	3/2	4p 3/2
N IV	4	4	2	3/2	4d 3/2
N V	6	4	2	5/2	4d 5/2
N VI	6	4	3	5/2	4f 5/2
N VII	8	4	3	7/2	4f 7/2
etc.					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานหนึ่งไปยังระดับพลังงานหนึ่งนั้นจะสามารถนำทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) มาอธิบาย กล่าวคือการเปลี่ยนสถานะของอะตอมจะมีลักษณะคล้ายกับการสั่นของไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสถานะทั้งสองเป็นไปตามกฎการคัดเลือก (Selection rule) คือ $\Delta l = \pm 1$ และ $m_l = 0, \pm 1$ เท่านั้น และการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับพลังงาน (ดังตารางที่ 2.1 และผังรูปที่ 2.6) ทำให้เกิดอนุกรมของเส้นสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์สำหรับแต่ละธาตุ โดยทั่วไปสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในอนุกรมชั้นเค (K-series), อนุกรมชั้นแอล (L-series) หรืออนุกรมชั้นเอ็ม (M-series) หรืออื่น ๆ จะแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.6 Typical series of electron transition that may follow creation of a K-shell vacancy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงสัญลักษณ์สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์และการเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงาน

การเปลี่ยนสถานะ	สัญลักษณ์
L→K	K_{α}
M→K	K_{β}
N→K	K_{γ}
O→K	K_{δ}
M→L	L_{α}
N→L	L_{β}
O→L	L_{γ}

เส้นสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะ ถ้าหากระดับพลังงานเกิดอยู่ใกล้กันมากทำให้ไม่อาจบอกถึงความแตกต่างได้ แต่ถ้าจะบอกถึงความเข้มของเส้นสเปกตรัมแล้วจะเห็นว่า แอลฟาไลน์ (α -line) จะเข้มกว่าเบต้าไลน์ (β -line) หรือ α_1 จะเข้มกว่า α_2 เป็นต้น โดยที่การบอกความแตกต่างจะดูที่ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น (shell) ซึ่งจะเขียนกำกับด้วยเลขโรมันดังตารางที่ 2.1 ส่วนความถี่ของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่แผ่ออกมานั้นจะสัมพันธ์กับค่าของเลขอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นและจะเป็นไปตามกฎของมอสเลย์ (Moseley's law) คือ

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = k(Z - \sigma)^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นบนค่าความแตกต่างสำหรับ spectral series

σ คือ the shielding constant และมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1

Z คือ เลขอะตอมของธาตุ

และสามารถเขียนสมการที่ (2.4) ใหม่ได้ดังนี้

$$\nu = k(Z - 1)^2 \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (Properties of X-rays)

รังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติคล้ายกับรังสีแกมมา ดังนั้นเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับสสารหรือวัตถุต่าง ๆ จะเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (absorption of x-rays) การสะท้อนหรือการกระเจิง (Scattering) และการเลี้ยวเบน (Diffraction) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

2.3.1 การดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (Absorption of X-ray)

วัตถุจะประกอบไปด้วยอะตอมและภายในอะตอมจะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนล้อมรอบนิวเคลียส จำนวนอิเล็กตรอนก็คือ เลขอะตอมของอะตอมในสภาวะปกติเมื่อแสงโฟตอนรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนวัตถุ โฟตอนจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมดังในรูปที่ 2.7 โดยความเข้มลำแสงโฟตอนที่ตกกระทบ คือ $I_0(\lambda_0)$ ทำมุม ψ_1 ลำแสงจะถูกดูดกลืนตามทางที่ผ่านสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I(\lambda) = I_0 \lambda_0 \exp(\mu \rho x) \quad (2.6)$$

เมื่อ μ คือ mass absorption for the wavelength

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (specimen)

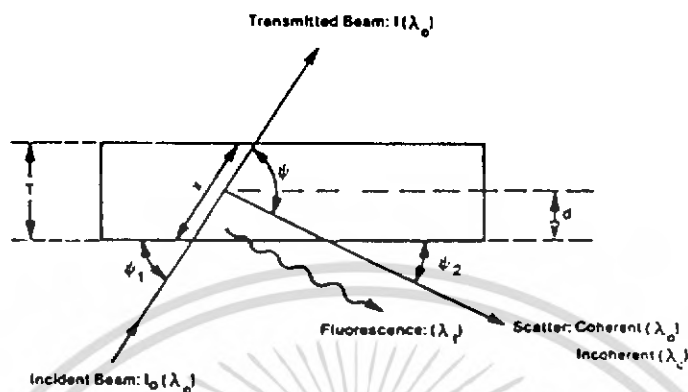
x คือ ระยะทางที่ลำแสงโฟตอนเดินทางไปถึงตัวอย่าง

และค่าไซน์ของมุมที่ตกกระทบ ψ_1 จะขึ้นอยู่กับความหนา (T) ของตัวอย่าง

ความยาวคลื่นปฐมภูมิ (primary wavelength) จะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 3 แบบ คือ

- (1) การส่งผ่านของลำแสงจะมีผลทำให้ความเข้มแสงลดลง
- (2) จะเกิดการสะท้อนเป็นมุม ψ และเกิดการสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นแบบ โคฮีเรนต์ (coherent, λ_0) และอิน โคฮีเรนต์ (incoherent, λ_c)
- (3) การเรืองรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence) จะเกิดขึ้นบนตัวอย่าง

ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความลึก (d) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนและมุม ψ_2 ที่เกิดจากการกระเจิงของตัวอย่าง



- T = Sample Thickness
- x = Path Length
- d = Penetration Depth
- ψ_1 = Incident Angle
- ψ_2 = Take-Off Angle
- ψ = Scattering Angle
- μ = Mass Absorption Coefficient
- ρ = Density
- Transmitted Beam Intensity: $I(\lambda_0) = I_0(\lambda_0) \exp(-\mu \rho x)$
- Incoherent Scatter Wavelength: $\lambda_c - \lambda_0 = 0.0243(1 - \cos \psi)$
- Fluorescence Penetration Depth: $d = x \sin \psi_2$

รูปที่ 2.7 Interaction of the primary x-ray beam with the sample

และถ้าพิจารณาในรูปที่ 2.7 ในการจัดเครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray spectrometer) ความยาวที่ผ่านจะมีความสัมพันธ์กับความลึกของการทะลุผ่าน (depth of penetration, d) เป็นดังนี้

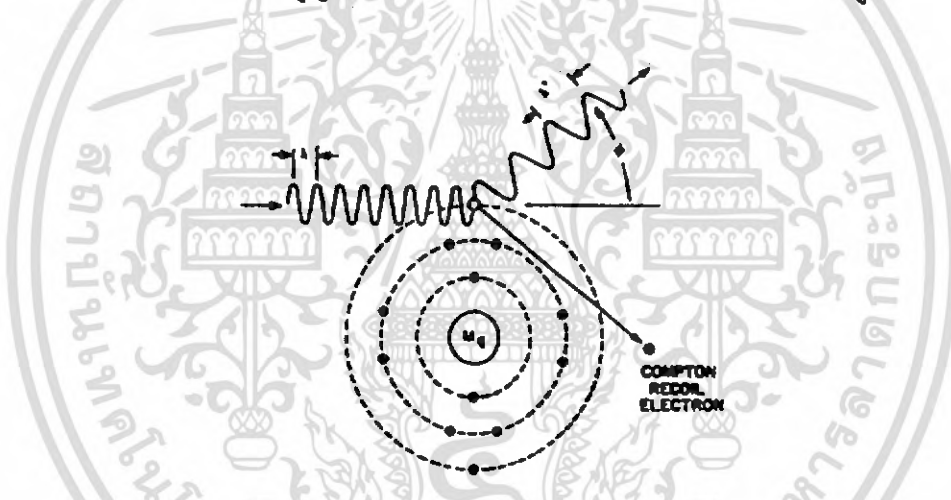
$$d = x \sin \psi_2 \tag{2.7}$$

โดยที่ ψ_2 = the take-off angle of the spectrometer

ถึงแม้ว่าความลึกของการทะลุผ่านค่อนข้างจะมีหลักเกณฑ์การวัดและส่วนมากแล้ว สเปกโตรมิเตอร์จะให้ค่ามุม ψ_2 อยู่ระหว่าง 30° และ 45° ดังนั้นค่า d โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ ครึ่งหนึ่งของความลึกที่ผ่านของระยะ x

2.3.2 การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์และอินโคฮีเรนต์ (Coherent and Incoherent scattering)

การกระเจิงจะเกิดขึ้นเมื่อ โฟตอนรังสีเอ็กซ์เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของธาตุที่เป็นเป้า ถ้าการชนไม่เกิดการสูญเสียพลังงานจะเรียกการชนนั้นว่า “การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision)” จากการชนครั้งนี้จะเป็นการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ (Coherent (Rayleigh) scattering) โดยที่พลังงานทั้งหมดจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเพราะอิเล็กตรอนจะถูกออสซิลเลต (oscillate) ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่เดียวและความเข้มของการกระเจิงจะขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมและพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ นั่นคือการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์จะมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นของลำรังสีที่ตกกระทบนั่นเอง ส่วนปรากฏการณ์ที่มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนหลังจากการชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกจะเรียกว่าการกระเจิงแบบอินโคฮีเรนต์ (Incoherent (Compton) scattering) การชนแบบนี้อิเล็กตรอนจะถูกกระแทกกลับ (recoil) ภายใต้อิทธิพลของรังสีเอ็กซ์ ในส่วนที่อิเล็กตรอนกระแทกกลับเล็กน้อยนั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานหรือทำให้ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Incoherent (Compton) scatter of an x-ray photon

ถ้าให้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่ตกกระทบกับการกระเจิงของคอมพ์ตัน (Compton scattering); $\Delta\lambda$ เป็นดังนี้

$$\Delta\lambda = 0.0243(1 - \cos\phi) \quad (2.8)$$

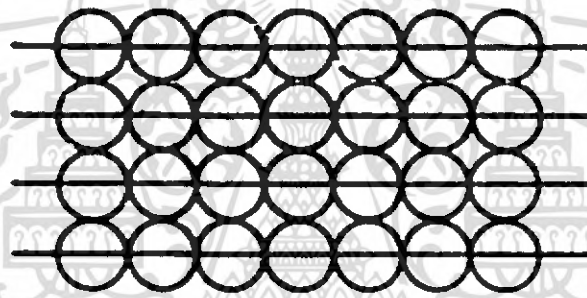
เมื่อ ϕ = the angle (deg) between unscattered and scattered x-ray

ในการจัดทำสเปกโตรมิเตอร์ค่ามุม ϕ จะมีค่าเท่ากับ 90° ซึ่ง cosine 90° จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการหาความแตกต่างความยาวระหว่างอินโคฮีเรนต์และโคฮีเรนต์มีค่า 0.0243 อังสตรอม

2.3.3 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน (Interference and Diffraction)

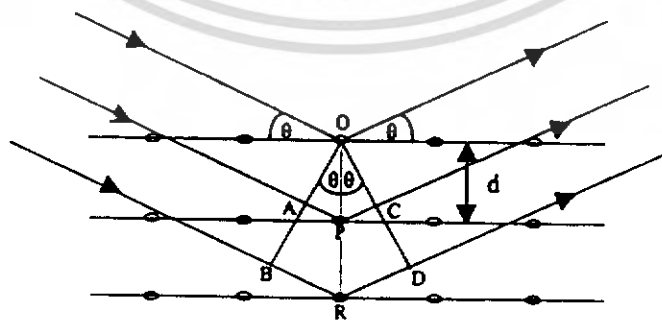
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) เป็นการรวมกันของสองปรากฏการณ์ คือ การเกิดการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์และการแทรกสอด (Coherent scattering and Interference) ซึ่งถ้ามีคลื่นตั้งแต่สองชุดขึ้นไปเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันจะเกิดการแทรกสอดกันกลายเป็นคลื่นรวม โดยที่เงื่อนไขในทางเรขาคณิตจะอธิบายปรากฏการณ์แทรกสอดนี้ว่า “ความยาวคลื่นที่มีเฟสที่แน่นอน” ถึงแม้ว่าจะมีคลื่นส่วนอื่นเพิ่มเข้าไปแต่ก็ยังแสดงให้เห็นถึงเฟสที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งจะทำให้ผลการเลี้ยวเบนเกิดสูงสุด

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นโครงตาข่ายผลึก (crystal lattice) ประกอบไปด้วยการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแถวและในแต่ละชั้นของ โครงสร้างผลึก (crystal structure) จะมีความหนาแน่นอะตอมสูงมาก



รูปที่ 2.9 Planes of high atomic density

เมื่อลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอ็กซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลำรังสีเอ็กซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็จะผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอมดังรูปที่ 2.10

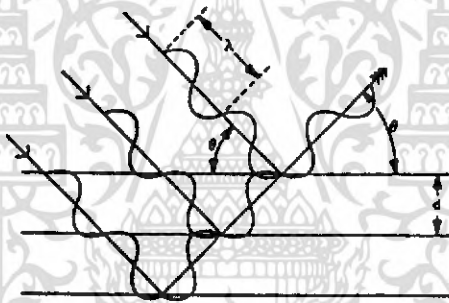


รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่า ๆ กัน ลำรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน การเลี้ยวเบนนี้ก็มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection grating) สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่กับสภาวะ 2 ประการคือ

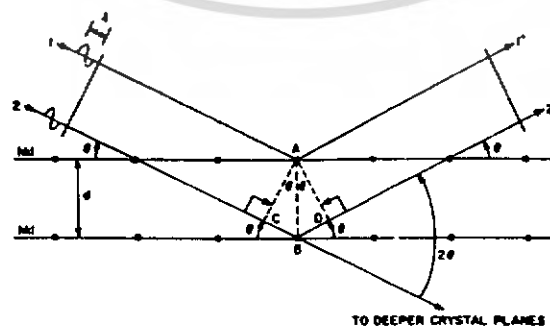
- (1) รังสีที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- (2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของ X-ray

ในปีค.ศ. 1912 แบริก (W.L.Bragg) ได้ทำการยิงลำรังสีเอ็กซ์แคบ ๆ กระทบผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ และได้อธิบายแนวคิดเพิ่มเติมว่า แนวรังสีสะท้อนจะพบได้เมื่อรังสีสะท้อนจากกลุ่มระนาบที่ขนานกันมีการแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) ดังรูปที่ 2.11 และถือว่าการกระเจิงของรังสีสะท้อนจากกลุ่มระนาบเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic) นั่นคือพลังงานของรังสีเอ็กซ์สะท้อนออกมาจะมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ



รูปที่ 2.11 Diffraction by an ordered array of atoms

พิจารณาระนาบของโครงตาข่ายที่ขนานกันและห่างกัน d ดังรูปที่ 2.11 และแนวรังสีตกกระทบอยู่ในระนาบ ผลต่างระยะทางที่รังสีทั้งสองสะท้อนจากระนาบคู่ขนานที่อยู่ติดกันจะเท่ากับ $2d \sin \theta$ เมื่อ θ เป็นมุมตกกระทบของรังสีที่เท่ากับแนวระนาบ



รูปที่ 2.12 Diffraction by crystals-Bragg version

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดแบบเสริมกันของรังสีสะท้อนจากระนาบคู่ขนานจะเกิดขึ้นเมื่อ “ผลต่างของระยะทางมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม n ของความยาวคลื่น” พิจารณาในรูปที่ 2.12 และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$CB + BD = n\lambda$$

เมื่อ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

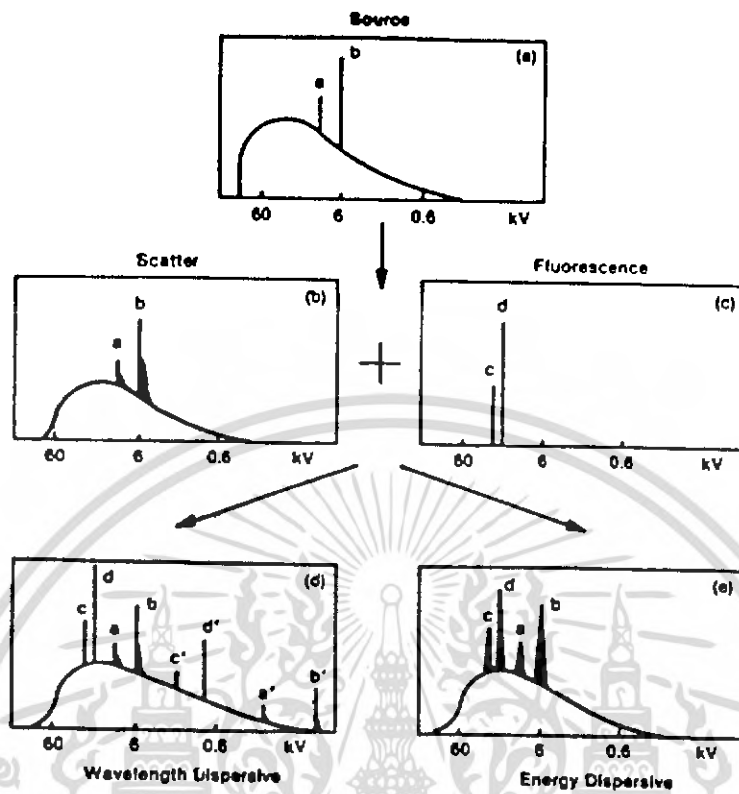
θ = มุมที่ลำรังสีตกกระทบทำกับระนาบแล้ว จะได้ว่า

$$\begin{aligned} CB &= AB\sin\theta \\ BD &= AB\sin\theta \\ n\lambda &= 2AB\sin\theta \\ n\lambda &= 2d\sin\theta \end{aligned} \quad (2.9)$$

สมการนี้คือ “กฎของแบรกก์” (Bragg's law) ซึ่งระยะห่างระหว่างระนาบคู่ขนาน d ขึ้นอยู่กับเลขคี่ของระนาบ hkl และค่าคงที่โครงข่าย a

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + l^2 + k^2}} \quad (2.10)$$

จากรายละเอียดที่กล่าวมาทั้งหมด ถ้าทำการทดลองวัดสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ทั้งฟิสิกและพื้นหลัง (background) จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.13 ทั้งในระบบการแยกวัดความยาวคลื่น (Wavelength dispersion) และการแยกวัดพลังงาน (Energy dispersion)



รูปที่ 2.13 Original of peaks and background in measured X-ray spectra

2.4 ประวัติการเกิดและการพัฒนาเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer)

โดยทั่ว ๆ ไปผลิตภัณฑ์ของวัสดุต่าง ๆ ในธรรมชาติมีโครงสร้างที่แน่นอน ด้านองลึกเข้าไปถึงระดับอะตอม ผิดก็ประกอบด้วยอะตอมและกลุ่มอะตอมที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอนและซ้ำกันในทุกทิศทาง ในการศึกษาโครงสร้างผลึกจะศึกษา รูปแบบของโครงตาข่ายที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตแน่นอน ซึ่งต้องอาศัยหลักความสมมาตรกัน

จากแนวความคิดดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งลำดับเวลาในการพัฒนาเป็นดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลำดับเวลาในการพัฒนาเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์

ปี ค.ศ.	เหตุการณ์หรือการค้นพบ
1895	W.C. Roentgen พบรังสีเอ็กซ์
1896	J. Perrin วัดความเข้มข้นรังสีเอ็กซ์โคโรไรซ์อุปกรณ์การวัดแบบ air-ionization chamber
1909	C.G. Barkla พบขอบการดูดกลืน (absorption edge)
1911	C.G. Barkla พบอนุภาคของเส้นการปล่อยรังสีซึ่งเขาได้กำหนดเป็น K, L, M, N, ...
1912	M. Von Laue, W. Freidrich และ E.P. Knipping แสดงให้เห็นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยผลึก (หลักฐานที่แสดงสมบัติความเป็นคลื่นของรังสีเอ็กซ์)
1913	H.G.J. Moseley อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอ็กซ์กับเลขอะตอมและความเข้มข้นของรังสีเอ็กซ์กับปริมาณของธาตุ
1913	W.H. Bragg และ W.L. Bragg สร้างสเปกโทรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์
1913	W.D. Coolidge สร้างหลอดกัมมันตรังสีเอ็กซ์ที่ภายในเป็นสูญญากาศและใช้เส้นใยโลหะ
1913	J. Chadwick พบว่าสามารถทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะได้โดยการกระตุ้นด้วยไอออน (ซึ่งเขาใช้อนุภาคแอลฟา) จุดนี้จึงอาจถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดของสเปกโทรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์ที่เหนี่ยวนำโดยไอออน (ion-induced X-ray spectrometry) และเนื่องจากอนุภาคแอลฟานั้นได้มาจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ^{222}Rn ในแง่นี้ก็อาจถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดของการศึกษาสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ที่กระตุ้นด้วยสารกัมมันตรังสี
1913-23	M. Siegbahn ได้ทำการศึกษาและสามารถวัดความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ของธาตุต่าง ๆ
1922	A. Hadding ได้ทดลองบันทึกทิศทางรังสีเอ็กซ์มาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีโดยใช้แร่เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์
1923	D. Coster และ G. Von Hevesy ค้นพบธาตุ Hf ถือได้ว่าเป็นธาตุแรกที่พิสูจน์ยืนยันโดยสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์
1923	G. Von Hevesy เสนอแผนแนะนำการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการกระตุ้นลำดับที่สอง (secondary excitation)
1923	R. Glocker และ W. Frohnmeyer วิจัยการใช้สเปกโทรมิเตอร์ขอบการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption edge spectrometry)
1924	W. Solier สร้างสเปกโทรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์ที่ใช้แผ่นโลหะบางขนานเป็นตัวทำขนาน (parallel-foil collimator)
1925	D. Coster และ Y. Nishida ทดลองใช้วิธีการปล่อยรังสีเอ็กซ์ลำดับที่สอง (ซึ่งก็คือ XRF นั่นเอง และตามแนวทางที่ von Hevesy ได้เสนอแนะไว้ในปี ค.ศ.1923)
1928	R. Glocker และ H. Schreiber เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่ทดลองใช้วิธีการปล่อยรังสีเอ็กซ์ลำดับที่สอง (และ Schreiber เป็นผู้เสนอแนะให้ใช้คำว่า X-ray Fluorescence ในปี ค.ศ.1929)
1928	H. Geiger และ W. Muller พัฒนาทิว์รังสีกัมมันตรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
1938	บริษัท Hülgel and Watts, Ltd. ผลิตสเปกโทรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์ในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกที่ออกแบบโดย T.H. Laby
1948	H. Friedman และ L.S. Birks สร้างเครื่องค้นพบ XRF เพื่อการผลิตในเชิงพาณิชย์เครื่องนี้เป็นแบบที่กระตุ้นด้วยรังสีเอ็กซ์ทั้งหมด
1949	R. Castaing และ A. Guinier สร้างเครื่อง electron probe microanalyzer เป็นเครื่องแรก
1964	A.A. Stark ทดลองใช้วิธีการกระตุ้นสารให้เกิดรังสีเอ็กซ์ด้วยโปรตอนในการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นครั้งแรก
1965	XRF เป็นแพร่หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ความก้าวหน้าทางวิทยาการเกี่ยวกับรังสีเอ็กซ์จะดำเนินไปด้วยดีและค่อนข้างเร็วในช่วง
 คับนี้ แต่กว่าจะได้มีการนำเครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโทรมิเตอร์มาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังในการตรวจ
 วิเคราะห์ก็ต้องรอเวลาผ่านไปอีกเกือบ 25 ปีต่อจากนั้น เนื่องจากมีปัญหาทางด้านเทคนิคหลาย
 ประการ เช่น

- ปัญหาเกี่ยวกับหลอดรังสีเอ็กซ์ กล่าวคือ หลอดรังสีเอ็กซ์ในระยะแรกนั้นใช้งานยุ่งยาก
 มาก ต้องใช้ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ตลอดเวลาเพราะอากาศซึมรั่วเข้าไปได้
 เนื่องจากสมัยนั้นยังไม่มีวงแหวนยาง (O-Ring) ที่ใช้เป็นตัวรองรับรอยต่อเพื่อป้องกันการ
 รั่วซึม
- ปัญหาในการบันทึกสเปกตรัมซึ่งในสมัยนั้นต้องใช้บันทึกลงบนแผ่นฟิล์ม
- ปัญหาจากผลึกที่ใช้กระจายคลื่น ในสมัยนั้นไม่มีทางเลือกอย่างอื่นต้องใช้ผลึกที่เกิดขึ้น
 จากธรรมชาติเท่านั้น
- ปัญหาในการวางสารตัวอย่าง เนื่องจากเครื่องมือยังไม่ได้พัฒนาให้ดีเท่าที่ควร ในระยะ
 นั้นการวางสารตัวอย่างใช้วิธีวางบนส่วนที่เป็นเป้า (target) ในหลอด ดังนั้นสารตัวอย่าง
 จะถูกกระตุ้นโดยลำอิเล็กตรอนโดยตรง และเนื่องจากบริเวณนี้จะเกิดความร้อนสูง ซึ่ง
 สารตัวอย่างอาจจะเสียหายโดยการสลายตัวจากความร้อนนี้
- การศึกษาด้วยรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (คลื่นยาว) จะทำได้ยากเนื่องจากยังไม่มีพลาสติกทำ
 เป็นแผ่นบางสำหรับปิดที่ช่องหน้าต่างที่เป็นทางผ่านของรังสีเอ็กซ์ (บางคนแก้ปัญหานี้
 โดยการใช้ปกผีเสื้อแทน)

แม้ปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไข เครื่องมือก็ยังยุ่งยาก ใช้งานลำบาก ผู้ที่จะใช้งานได้ก็อยู่ใน
 แวดวงของนักฟิสิกส์เท่านั้นที่คุ้นเคยกับอุปกรณ์เหล่านี้อยู่แล้วเป็นอย่างดี และกว่าที่เครื่องเอ็กซ์เรย์ส
 เปกโทรมิเตอร์จะได้รับการปรับปรุงอีกช่วงหนึ่งให้ใช้งานได้ง่ายขึ้นก็ต้องอาศัยความเจริญก้าวหน้า
 ทางด้านเทคโนโลยีใหม่ ๆ ภายหลังจากสงครามโลกครั้งที่สอง การเปลี่ยนแปลงครั้งนี้จึงทำให้เครื่องมือ
 แพร่หลายไปสู่สาขาอื่นด้วย เช่น เคมี การเปลี่ยนแปลงใหม่ที่เกิดขึ้นนี้ คือ

- ระบบสุญญากาศในหลอดรังสีเอ็กซ์เป็นสุญญากาศถาวร ไม่ต้องใช้วิธีปั๊มสุญญากาศ
 ตลอดเวลา ประสิทธิภาพในการทำงานของหลอดไว้วางใจได้
- มีหัววัดเป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์
- ผลึกที่ใช้กระจายคลื่น สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้และได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ
 สูง เช่น ให้ความเข้มสูงตลอดย่านความยาวคลื่นที่ศึกษา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อนำชิ้นส่วนต่าง ๆ เหล่านั้นมาประกอบกันเป็นเครื่องมือก็ทำให้ได้เครื่องมือที่ทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพสูง อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ ฉนวนและพลาสติกบางที่ใช้ปิดช่องหน้าต่าง เป็นต้น

ในยุคปัจจุบันได้มีการพัฒนาหัววัดแบบต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น ได้แก่ หัววัดที่ทำจากผลึกสารกึ่งตัวนำ เช่น เจอร์เมเนียม (Ge) หรือซิลิคอนที่เจือด้วยลิเทียม (Si(Li)) ทำให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ประเภทโทรมิเตอร์ขึ้นไปได้อีก นอกจากนี้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ประเภทโทรมิเตอร์ก็เป็นหนึ่งในจำนวนเครื่องมือน้อยชนิดที่สามารถใช้งานกับสารตัวอย่างในสถานะของแข็งที่เป็นรูปร่างใด ๆ ก็ได้

เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์มีข้อได้เปรียบในการใช้งานเมื่อเทียบกับเครื่องมืออื่นอยู่หลายประการ เช่น ตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็ว ตรวจได้คราวละหลายธาตุพร้อมกัน (multi-element capability) ไม่ทำลายสารตัวอย่างหรือทำให้สารตัวอย่างสูญเสียสภาพเดิม (non-destructive method) ใช้สารตัวอย่างในสภาพที่เป็นของแข็งได้ ข้อเสียเปรียบที่จะมีที่เด่นชัดก็คือ สภาพไว (sensitivity) ในการตรวจวัด กล่าวคือ ถ้าต้องการตรวจวัดสารที่มีปริมาณน้อยมาก (trace) อาจจะตรวจวิเคราะห์ได้ไม่ต่ำมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องมืออื่น ในตาราง 2.4 แสดงข้อมูลปริมาณต่ำสุดที่เครื่องมือหรือวิธีแต่ละชนิดจะตรวจวัดได้ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของเครื่องมือหรือวิธีการนั้น ๆ เท่าที่จะได้

ตารางที่ 2.4 สภาพไวที่สุดในการวิเคราะห์ระดับจุลภาคโดยเครื่องมือหรือวิธีการต่าง ๆ ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุด

เครื่องมือหรือวิธีการ	ปริมาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (กรัม)
Microchemistry	10^{-9}
Polarography (voltammetry)	10^{-9}
X-ray fluorescence spectrometer (XRFS)	10^{-9}
Optical absorption spectrometry	10^{-10}
Optical emission spectrography	10^{-10}
Atomic absorption spectrometry (AAS)	10^{-11}
Flame emission spectrometry	10^{-12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ion-induced x-ray spectrometry	10^{-12}
Ion-scattering spectrometry (ISS)	10^{-13}
Mass spectrometry (MS)	10^{-13}
Neutron activation analysis (NAA)	10^{-13}
Optical fluorescence microscopy	10^{-14}
X-ray-induced photoelectron spectrometry (XPES)	10^{-14}
Auger-electron spectrometry (AES)	10^{-15}
Electron-probe microanalysis (EPMA)	10^{-15}
Radioactive tracer analysis	10^{-18}
Secondary-ion mass spectrometry (SIMS)	10^{-18}

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิเคราะห์เครื่องแรก ๆ ที่ใช้ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์อย่างเต็มที่ก็คือ เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์นี้เอง โดยเครื่องแรกที่มีความคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เกิดขึ้นในปี ค.ศ.1964 แต่ในปัจจุบันเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์แทบทั้งหมดใช้ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ทั้งสิ้น (ในสมัยแรกอาจเป็นมินิคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันเครื่อง ไมโครคอมพิวเตอร์ (PC) มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมา เครื่องที่ใช้งานกับ PC จึงได้รับความนิยมมาก ส่วนเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถพกพาออกงานภาคสนาม ได้ นั้น อย่างน้อยก็จะต้องมี microprocessor เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องอยู่ภายใน) โดยในระบบงาน วิเคราะห์นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ

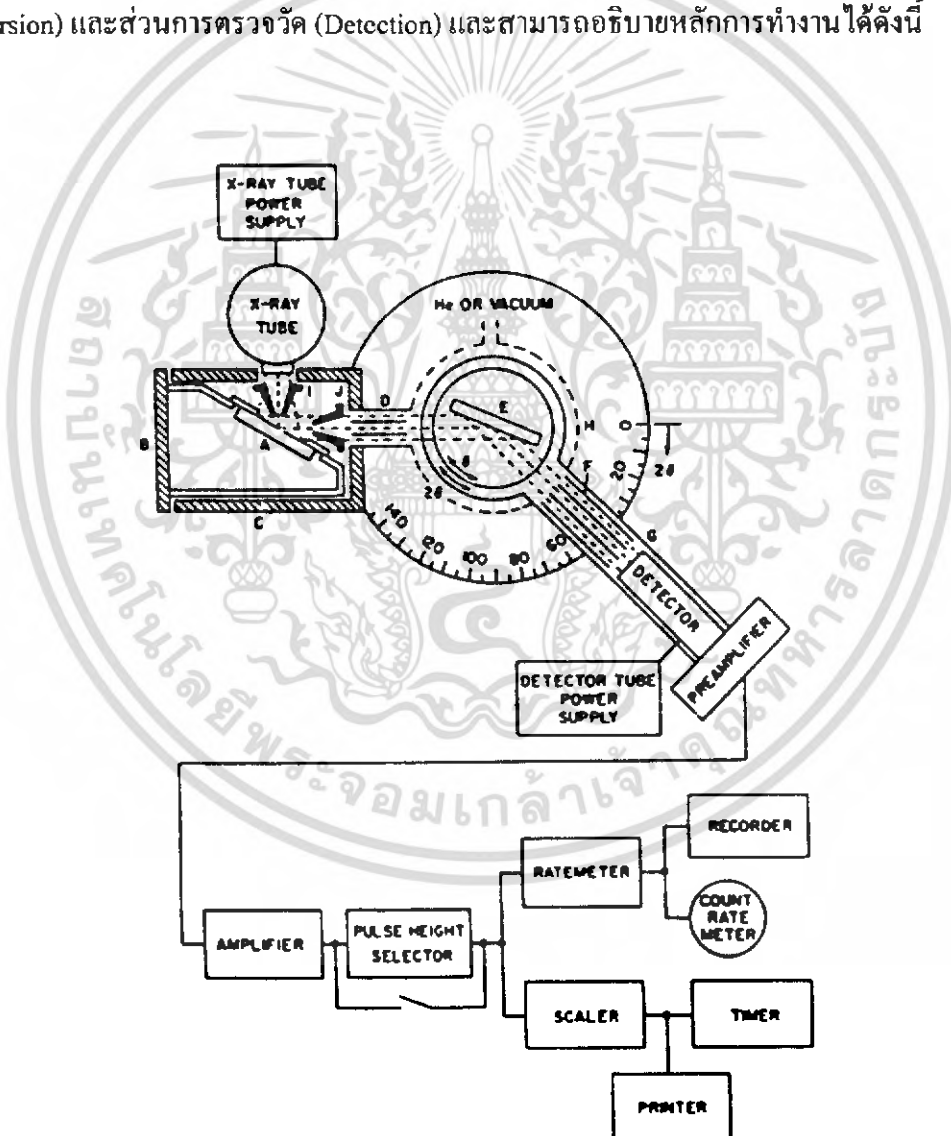
1. ระบบวิเคราะห์การเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงพลังงาน (Energy Dispersive X-Rays Fluorescence Spectrometer; EDXRFS)
2. ระบบวิเคราะห์การเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Rays Fluorescence Spectrometer; WDXRFS)

แม้ว่าการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์นี้ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้งานในห้องปฏิบัติการทางวิชาการ แต่ก็มีแนวโน้มจะได้รับความนิยมนำมาใช้ในงานประจำ (routine) เช่น ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ในโรงงาน เป็นต้น ความเจริญก้าวหน้าทางด้าน ไมโครคอมพิวเตอร์ก็จะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยเสริมศักยภาพของเทคนิคนี้ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระบบเครื่องมือวัดของสเปกโตรมิเตอร์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบແจกແจก ความยาวคลื่น (Instrumentation of Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; WDXRFS)

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบการແจกແจกความยาวคลื่น จะแสดงส่วนประกอบของระบบในรูปที่ 2.14 ระบบเครื่องมือการวัดด้วยวิธีการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบແจกແจกความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; WDXRFS) นี้ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนการกระตุ้น (Excitation) ส่วนการແจกແจก (Dispersion) และส่วนการตรวจวัด (Detection) และสามารถอธิบายหลักการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของระบบ WDXRFS

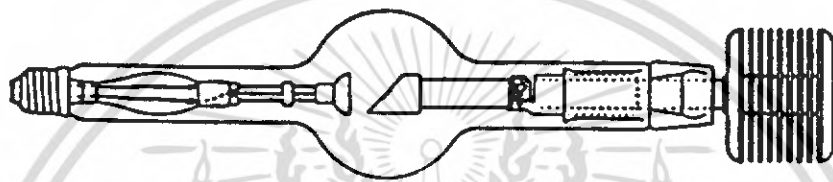
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ส่วนการกระตุ้น (Excitation)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของรังสีเอ็กซ์จะเป็นแถบสเปกตรัม (line spectrum) ซึ่งเป็นผลของการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอน โฟตอน หรือ ไอออน ต้นกำเนิดของแถบสเปกตรัมหรือสเปกตรัมต่อเนื่องจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) ต้นกำเนิดรังสีประเภทอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics radiation source)

(1.1) เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray generator) ผลิตรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานปานกลางขนาด 10 ถึง 400 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV)

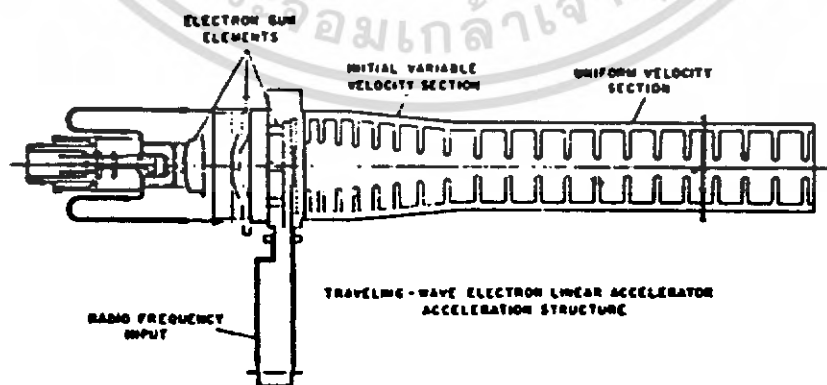


รูปที่ 2.15 Single section hot-cathode, high vacuum, copper-backed, self-rectifying, x-ray tube (radiator type)

(1.2) เครื่องเร่งอนุภาค (partical accelerators) แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- Linear accelerator
- Circular accelerator

เครื่องเร่งอนุภาคสามารถผลิตรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงมากขนาด 1 ถึง 10 เมกะอิเล็กตรอน โวลต์ (MeV) หรือมากกว่า 10 เมกะอิเล็กตรอน โวลต์ (MeV)



รูปที่ 2.16 Wave guide structure for a linear accelerator x-ray tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ต้นกำเนิดรังสีประเภทไอโซโทปกัมมันตรังสี (Isotope radiation sources)

ไอโซโทปกัมมันตรังสีเป็นต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ผลิตรังสีเอ็กซ์ และโดยทั่วไปที่นิยมใช้เป็นรังสีเอ็กซ์เรืองแสงให้เห็นดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 Physical properties of radioisotopes used in non-dispersive x-ray fluorescence analysis

Radioisotope	Half-life (years)	Photon Emission		Elements Excited	
		keV	%	K x-rays	L x-rays
⁵⁵ Fe	2.7	5.9-6.5 (Mn K x-rays)	28.5	Al-V	—
²³⁸ Pu	86	13.6-20 (U L x-rays)	13	Ti-As	Nd-Bi
²⁴⁴ Cm	17.6	14-21 (Pu L x-rays)	10	Ti-As	Nd-Bi
¹⁰⁹ Cd	1.3	22-23 (Ag K x-rays)	107	Ti-Mo	Nd-Bi
		88	4		
¹²⁵ I	0.16	27-31.7 (Te K x-rays)	138	Fe-Ag	Nd-U
¹⁵³ Gd	0.65	41-47 (Eu K x-rays)	90	Pr-Bi	As-Ce
		97	30		
		103	20		
²⁴¹ Am	458	59.5	37	As-Tm	—
		13.7-20.8 (Np L x-rays)	37		
⁵⁷ Co	0.74	122	89	Nd-U	—
		136	8.8		

หมายเหตุ การเลือก radioisotope เป็นต้นกำเนิดรังสีให้คำนึงถึงค่าขอบการดูดกลืนจะแสดงไว้ในภาคผนวก

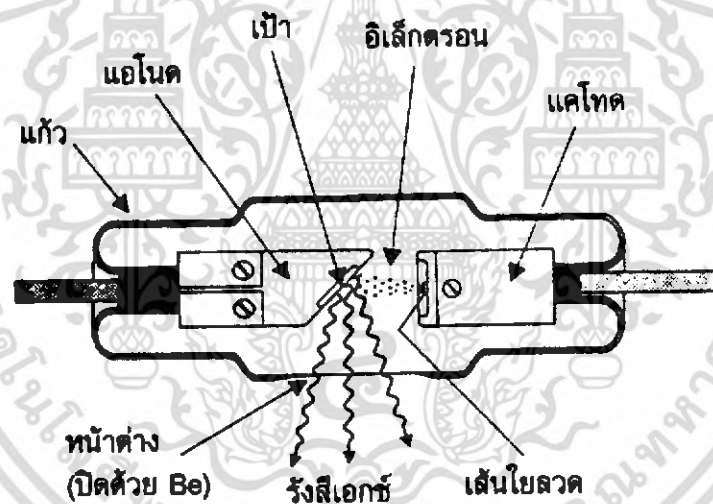
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าการเลือกต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์กระตุ่นหรือรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิสำหรับระบบการวิเคราะห์แบบ WDXRF นั้นจะเป็นแบบเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray generator) ในที่นี้จะแบ่งระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้

2.5.1.1. X-ray tube

โครงสร้างของหลอดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) จะลักษณะดังรูป 2.17 เนื่องจากหลักการผลิตรังสีเอ็กซ์นี้จะต้องอาศัยกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประเภท คือ

- (1) ต้นกำเนิดอิเล็กตรอนอิสระ
- (2) การเร่งศักดาไฟฟ้า (accelerating voltage) สำหรับเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ
- (3) เป้า (target) ซึ่งทำด้วยโลหะเพื่อให้อิเล็กตรอนพลังงานจลน์สูงวิ่งชนเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบของหลอดรังสีเอ็กซ์

จากหลักการผลิตรังสีเอ็กซ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น โครงสร้างของหลอดรังสีเอ็กซ์จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ

2.5.1.1(a) ภาชนะสุญญากาศแบบปิด (Sealed vacuum chamber)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดชิ้นส่วนของไส้หลอด (filament) และเป้า (target) ให้อยู่ในตำแหน่งทำงานที่เหมาะสม ภาชนะสุญญากาศทำด้วยแก้วชนิดไพเร็กซ์ (pyrex) หรือเซรามิก (ceramic) ซึ่งทนต่อความร้อนและสภาวะสุญญากาศประมาณ 10^{-6} - 10^{-7} torr ได้ ภายในหลอดรังสีเอ็กซ์ต้องจัดให้เป็นสุญญากาศด้วยเหตุผล 3 ประการ

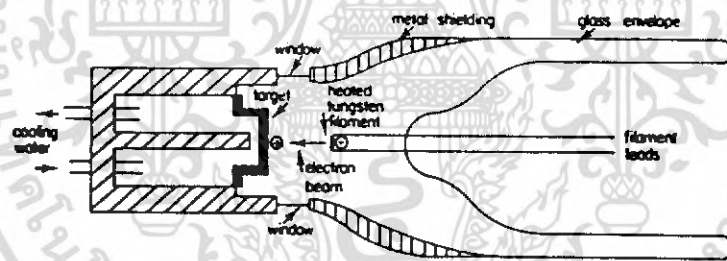
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) เพื่อป้องกันไม่ให้ขั้วไฟฟ้าเกิดออกไซด์
- (2) เพื่อทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วไฟฟ้าลบสามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าได้โดยไม่มี การสูญเสียพลังงาน
- (3) เพื่อให้เกิดความเป็นฉนวนระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ

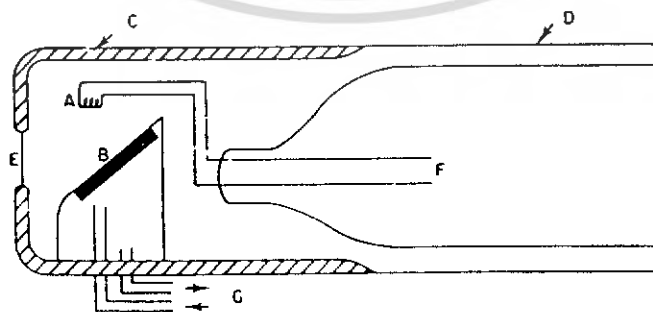
2.5.1.1(b) หน้าต่าง (Window)

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งซึ่งอยู่บนภาชนะสุญญากาศจะเป็นช่องทางออกของรังสีที่ผลิตได้เรียกช่องทางออกนี้ว่า “หน้าต่าง” โดยหน้าต่างจะต้องทำให้บางมากและมีคุณสมบัติสามารถทนต่อความดันสุญญากาศเพื่อจะลดปริมาณการสูญเสียรังสีเอ็กซ์ และสามารถให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์ทะลุผ่านหน้าต่างออกไปได้ ปกติสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์นี้จะมีการผลิตรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ หน้าต่างนี้ทำด้วยเบริลเลียม (Beryllium) ซึ่งมีเลขอะตอมต่ำ

หน้าต่างของหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้กับงานวิเคราะห์จะแบ่งตามลักษณะตามรูปแบบโครงสร้างของหลอดรังสีเอ็กซ์ ได้ 2 แบบ คือ แบบ Side window tube และแบบ End window tube ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ



รูปที่ 2.18 Schematic diagram of a side window x-ray tube



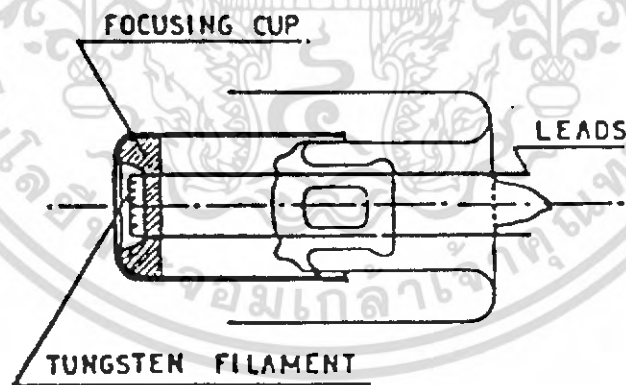
รูปที่ 2.20 Schematic diagram of an end window x-ray tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปหน้าต่างแบบ side window tube และแบบ end window tube จะมีลักษณะการจัด geometry ที่ต่างกัน ความแตกต่างนี้จะมีผลต่อการนำหลอดรังสีเอกซ์ทั้งสองชนิดนี้ไปในงาน โดยปกติ side window tube จะใช้ศักดาไฟฟ้าสูงประมาณ 60 keV ระหว่างไส้หลอดกับเป้าโลหะ และจะต้องอยู่ในสุญญากาศที่สูงมาก ส่วน end window tube จะใช้ศักดาไฟฟ้าประมาณ 100 keV และกระแส 80 mA เนื่องจากศักดาไฟฟ้าสูงและกระแสที่ใช้กับหลอดรังสีเอกซ์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน ผลที่เกิดขึ้นก็คือการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ที่หลอดซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอม ดังนั้น End window tube จึงมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ที่สูงกว่า side window tube และระบบการระบายความร้อน โดยใช้น้ำในการทำให้อุ่น (cooling water) จะพบว่า end window tube จะมีการระบายความร้อนได้ดีกว่า side window tube

2.5.1.1(c) ไส้หลอด (Filament)

เป็นส่วนที่ขี้ดติดกับแก้วทำหน้าที่เป็นฉนวนศักดาไฟฟ้าสูง โดยผลิตอิเล็คตรอนอิสระด้วยการปลดปล่อยอิเล็คตรอนจากเส้นลวดทั้งสแตนที่ถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า เมื่ออยู่ในสภาวะผลิตรังสีเอกซ์ไส้หลอดนี้จะเป็นขั้วลบ (cathode) ของหลอดรังสีเอกซ์ ตำแหน่งของไส้หลอดจะวางอยู่ในโพกัสซิงคัพ (focusing cup) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ต่อศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



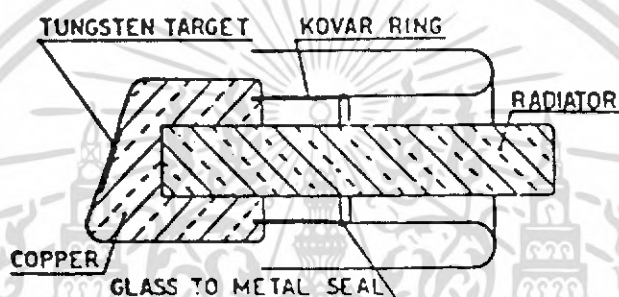
รูปที่ 2.20 Diagram of cathode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.1(d) เป้าโลหะ (Target)

เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอ็กซ์โดยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวก (anode) ของหลอดรังสีเอ็กซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งคุณสมบัติที่ใช้ทำเป้าโลหะมีดังนี้

- (1) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง (High atomic number) เช่น Mo, W, Cr, Cu, Ag, Rh, Ti, Pt, Au และ Sc
- (2) มีจุดหลอมเหลวสูง (High melting point)
- (3) มีการนำความร้อนได้ดี (High thermal conductivity)
- (4) ไม่กลายเป็นอย่างง่าย ความดันต่ำ (Low vapor pressure)



รูปที่ 2.21 Diagram of anode

จากคุณสมบัติของธาตุที่ใช้ทำเป้าโลหะแต่ละชนิด การเลือกใช้งานจะขึ้นอยู่กับงานวิเคราะห์ จากที่ผ่านมากการเลือกเป้าโลหะสำหรับใช้งานจะเป็นไปตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงการเลือกเป้าโลหะที่เหมาะสมกับงานวิเคราะห์

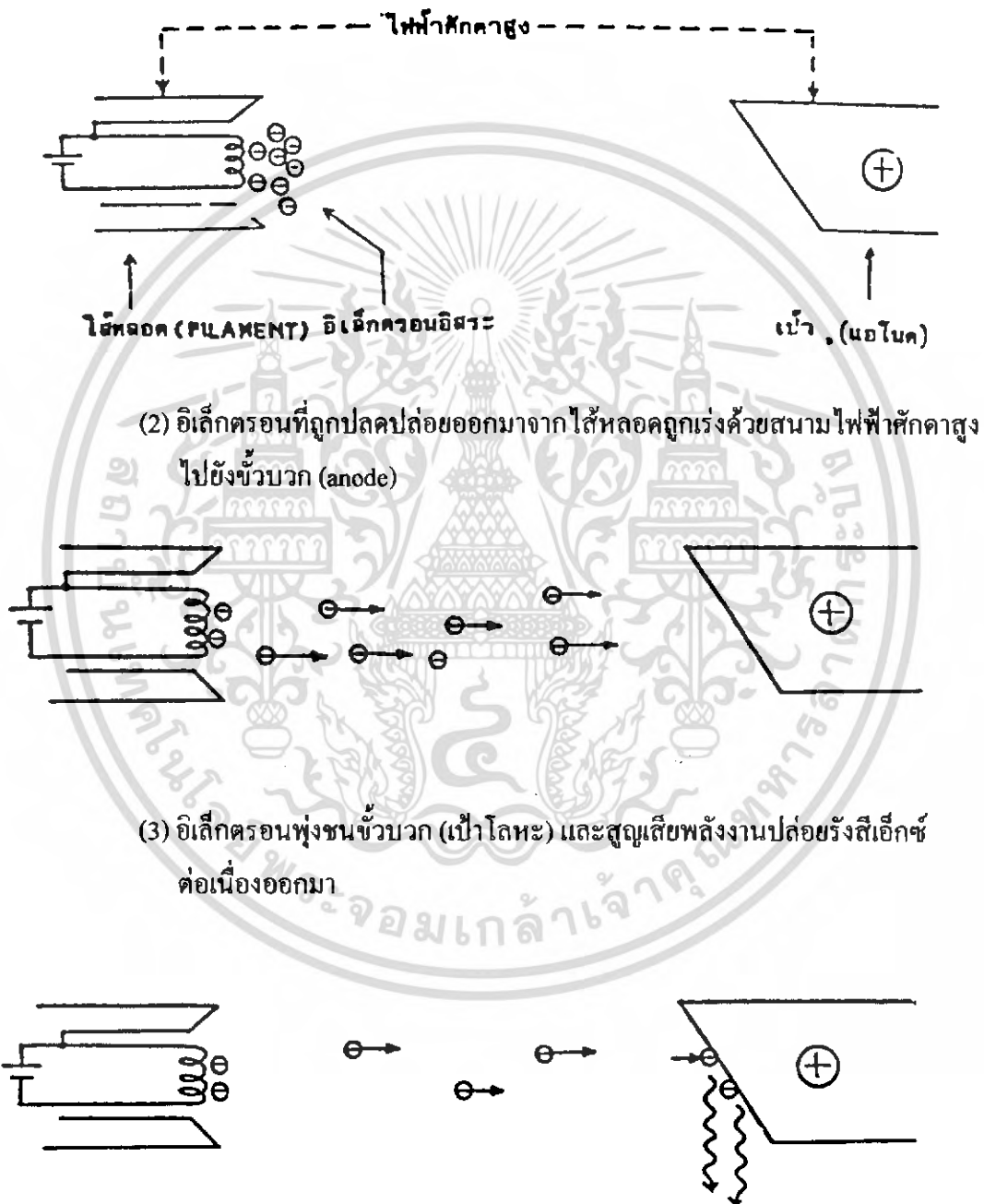
Target	Determination
Cr tube	Lighter element
Mo tube	Medium/Heavy element
W tube	Heavy element
Cu tube	Low level of iron
	(very efficient at exciting particular elements)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 X-Ray power supply

หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์ของหลอดรังสีเอ็กซ์มีขั้นตอนดังนี้

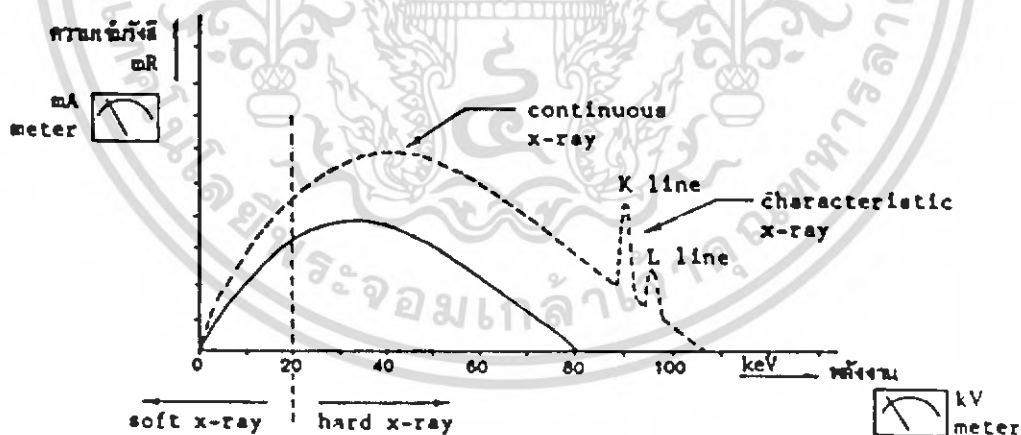
- (1) ใ้ทั้งสแตนท์ร้อนจากการจุกกระแสให้กับไส้หลอด ทำให้เกิดการปลดปล่อย อิเล็กตรอนจากผิวไส้หลอด (cathode)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

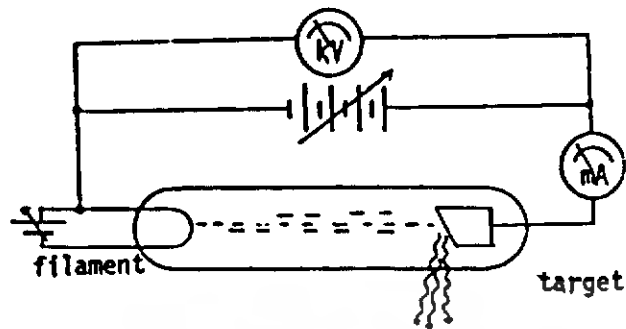
จากแผนภาพเป็นแผนภาพวงจรในการผลิตรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสองชุด ชุดแรกเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักยาค่ำสำหรับจุดไส้หลอด การเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายชุดนี้จะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมปริมาณการผลิตรังสีเอ็กซ์หรือความเข้มรังสีเอ็กซ์ ชุดที่สองเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักยาค่ำสูงสำหรับจ่ายศักยาค่ำไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนจากไส้หลอดไปยังเป้าโลหะ (หรือจากแคโทดไปยังแอโนด) การเปลี่ยนค่าศักยาค่ำไฟฟ้าของแหล่งจ่ายชุดนี้จะมีผลต่อการควบคุมพลังงานของอิเล็กตรอนหรือพลังงานของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องที่ผลิตขึ้น และยังมีผลต่อกระแสของวงจรแอโนดหรือปริมาณความเข้มรังสีเอ็กซ์ด้วย

การทำงานจะเริ่มจากอิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาจากผิวไส้หลอด เมื่อไส้หลอดร้อนจะได้รับไฟฟ้าศักยาค่ำสูงที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าของหลอดรังสีเอ็กซ์ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาได้รับการเร่งให้พลังงานสูงเท่ากับไฟฟ้าศักยาค่ำสูงที่จ่ายให้ เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงนี้ชนเป้าโลหะหรือเสมือนหนึ่งว่าอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสของอะตอม เนื่องจากนิวเคลียสมีประจุบวกจึงทำให้เกิดแรงดึงดูดอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เข้าใกล้ ผลก็คืออิเล็กตรอนเกิดเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และลดความเร็วลงอย่างรวดเร็ว (เกิดการกระเจิง) แล้วปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาเรียกว่า “Continuous X-ray” หรือ “Bremesstrahlung” หรือ “Breking radiation” แต่ถ้าเพิ่มศักยาค่ำไฟฟ้าเร่งให้สูงขึ้นเกินค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น ก็จะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวป้อนออกมาดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 วงจรเบื้องต้นของหลอดรังสีเอ็กซ์

ดังนั้นเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์จึงต้องมีส่วนควบคุมกระแส (mA) และศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ดังรูปที่ 2.23 สำหรับปรับค่าพลังงานและความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื้อที่ที่เหมาะสม โดยการปรับของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูงจะมีผลดังนี้

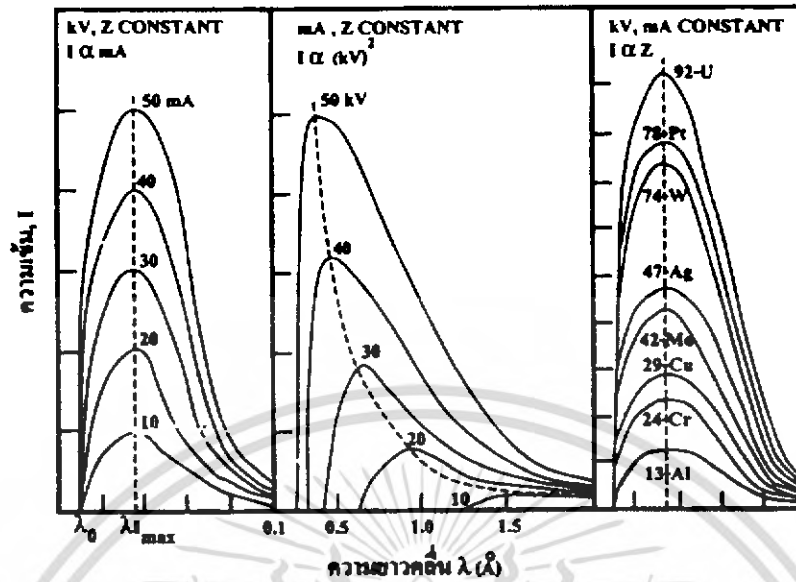
- (1) เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าสูง มีผลทำให้พลังงานและความเข้มรังสีเอ็กซ์ต่อเนื้อที่เพิ่มมากขึ้น
- (2) เมื่อเพิ่มกระแส (เพิ่มกระแสจนได้หลอด) มีผลทำให้เพิ่มเฉพาะความเข้มรังสีเท่านั้น

ถ้าให้ I_{com} = เป็นความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื้อที่
 i = กระแสไฟฟ้า (mA) ที่ใช้กับหลอดรังสีเอ็กซ์
 V = ศักย์ไฟฟ้า (kV)
 Z = เลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้า

จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการความเข้มรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้

$$I = kiZV^2 \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.11) จะเห็นว่าถ้าแอโนดหรือเป้าโลหะทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูง จะทำให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงผลของกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และเลขอะตอม ของธาตุที่เป็นขั้วบวกต่อสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.30

- เมื่อ Z และ V คงที่ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องจะแปรตามกระแสจุดได้หลอด
- เมื่อ i และ V คงที่ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องจะแปรตามอะตอมของธาตุที่ทำเป็นเป้า
- เมื่อ i และ Z คงที่ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องจะแปรตามความต่างศักย์ไฟฟ้าของหลอดรังสีเอ็กซ์

Duame และ Hunt ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ซึ่งแปรผกผันกับ λ_0 ดังนี้

$$eV = \frac{hc}{\lambda_0} = E \quad (2.12)$$

เมื่อ	E	=	พลังงานของอิเล็กตรอน (eV)
	V	=	ศักย์ไฟฟ้า (V)
	e	=	ประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)
	h	=	Plank's constant (6.626×10^{-34} J·s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของความต่างศักย์ (kV) และกระแส (mA) ต่อการผลิตรังสีเอ็กซ์จะสามารถสรุปผลได้เป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 2.7 แสดงผลของความต่างศักย์ (kV) และกระแส (mA) ต่อการผลิตรังสีเอ็กซ์

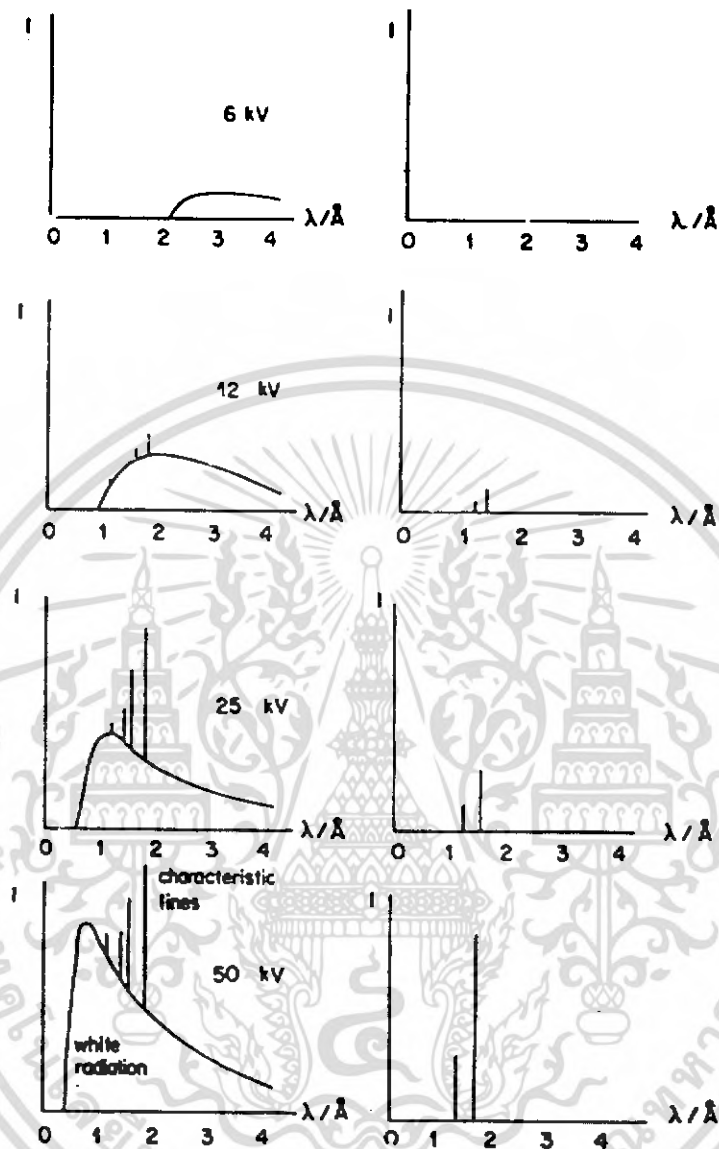
High Voltage (kV)	Current (mA)	
	Low current	High current
Low kV	Low intensity Soft x-ray	High intensity Soft x-ray
High kV	Low intensity Hard x-ray	High intensity Hard x-ray

soft x-rays หมายถึง รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ

hard x-rays หมายถึง รังสีเอ็กซ์พลังงานสูง

ปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นจากผลของอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกจากไส้หลอดชนเป้าโลหะนั้น ปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจะมีปริมาณ 1% เท่านั้น ซึ่งอีก 99% จะสูญเสียออกมาในรูปความร้อนที่จะถูกดูดกลืนอยู่ที่ผิวของเป้าโลหะ ดังนั้นในขณะที่ใช้งานจึงต้องมีการระบายความร้อนออกจากเป้าโลหะ เพื่อป้องกันการหลอมละลายเป็นไอภายในหลอดรังสีเอ็กซ์ การระบายความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีเอ็กซ์ ถ้าขนาดกำลังไฟฟ้าต่ำจะใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ แต่ถ้าขนาดกำลังไฟฟ้าสูงการระบายความร้อนจะใช้น้ำหรือน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 The output of a tungsten tube at various operating voltage (left hand diagram) and the corresponding fluorescence intensity produced from a copper specimen (right hand diagram)

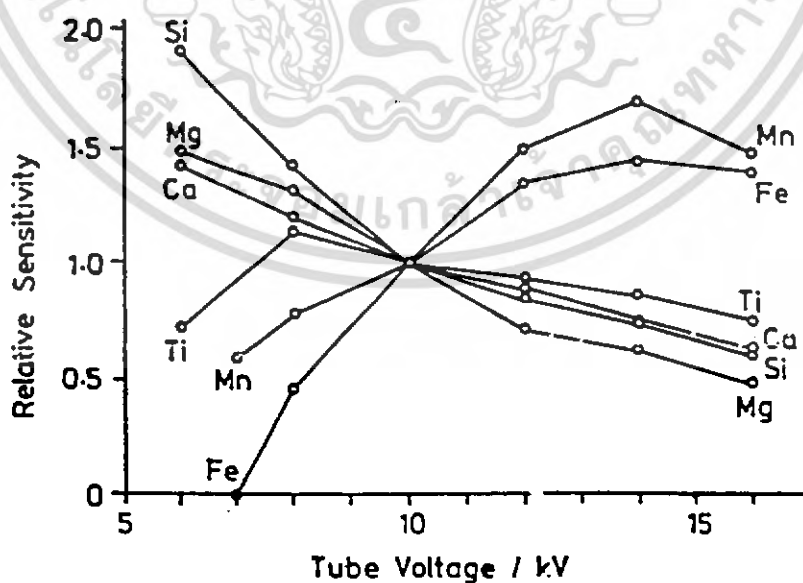
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอดรังสีเอกซ์และความสัมพันธ์ของการกระตุ้นจะแสดงให้เห็นในรูปของขนาดกำลังไฟฟ้าและเป้าโลหะ การเปลี่ยนความไวของหลอดรังสีเอกซ์ (เปลี่ยนกระแสและศักดาไฟฟ้าสูง) จะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีเอกซ์ที่ทนได้ ซึ่งในส่วนนี้จะมีผลต่ออายุการใช้งานของหลอดรังสีด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ศักดาไฟฟ้าสูง (kV) สำหรับงานวิเคราะห์จะมีหลักการเลือกใช้โดยเฉพาะดังนี้

(1) การเลือก kV ให้เหมาะสมสำหรับงานวิเคราะห์ของตัวอย่างที่สนใจก็คือการหาค่าอัตราส่วนของพีคต่อแบ็กกราวด์ (peak per background) สูงสุดสำหรับธาตุต่าง ๆ ในตัวอย่าง และการเลือก kV อย่างน้อยที่สุดควรพิจารณาให้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับธาตุตัวอย่าง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ (factor) อื่น ๆ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแต่ละธาตุตัวอย่าง

(2) การเลือก kV ที่ใช้จะต้องมีค่าค่อนข้างสูงกว่าแถบพลังงานการดูดกลืนหรือขอบการดูดกลืนของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ แต่ถ้าการวิเคราะห์มากกว่าหนึ่งธาตุขึ้นไป kV ควรเลือกให้อยู่ในช่วงที่ดีที่สุดคือเลือกอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของธาตุตัวอย่าง ซึ่งจะให้การวิเคราะห์ของแต่ละธาตุได้ดี โดยทั่วไปการวัดตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับค่า kV ให้ตรงกับพลังงานของธาตุและการปรับค่ากระแสในการวัดให้มีค่า dead time เดียวกันด้วย

(3) การเลือก kV จะต้องให้ความไวเหมาะสมกับธาตุและแถบพลังงานการดูดกลืน เพราะเนื่องจากถ้าให้พลังงานสูงกว่าค่าแถบพลังงานการดูดกลืนจะสามารถฟันแบ็กกราวด์ที่ไม่ต้องการให้เกิดจำนวนมากได้ ดังนั้นผลการนับที่เกิดขึ้นจะเหมาะสมกับช่วงของธาตุที่สนใจ

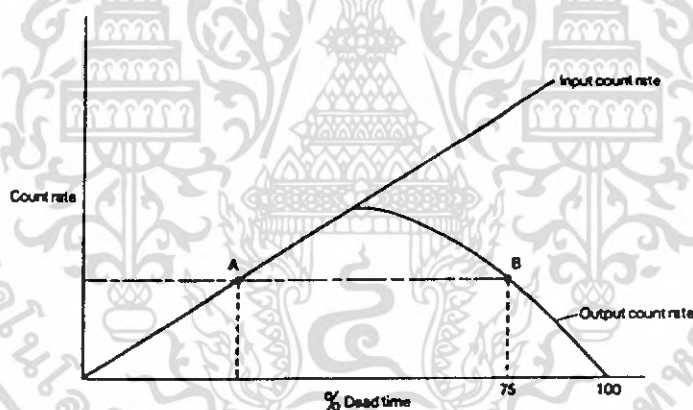


รูปที่ 2.26 The effect of kV on sensitivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการปรับค่ากระแสสำหรับจุดใส่หลอดรังสีเอกซ์ (mA) จะมีหลักการปรับให้เหมาะสม เพราะเนื่องจากกระแสที่ปรับให้กับหลอดรังสีเอกซ์ก็คือการควบคุมฟลักซ์อิเล็กตรอนภายในหลอดรังสีเอกซ์ ฟลักซ์นี้จะเกิดจากการเพิ่มจำนวนโฟตอนต่อเวลาปลดปล่อยออกมาจากเป้าโลหะ และการเพิ่มขึ้นนี้จะเป็นผลทำให้อัตราการนับจากตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยปกติการปรับกระแสจะให้ค่า dead time ไม่เกิน 50%

การวิเคราะห์ทั่วไปถ้าค่า dead time สูงกว่า 50% ผลการวิเคราะห์จะมีค่าความผิดพลาดสูง ดังรูปที่ 2.27 ถ้าเลือก kV ให้กับหลอดรังสีเอกซ์สำหรับการกระตุ้นสูงผลของกระแสที่ได้ก็จะต่ำไปด้วย (ซึ่งผลที่ได้นี้บางทีอาจจะให้ค่า dead time สูงเกินไปด้วย) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากใส่หลอดจากการใช้ศักดาไฟฟ้าสูงแรง จะมีผลต่อการเกิด leakage current ของหลอดรังสีเอกซ์ที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อหลอดรังสีเอกซ์อย่างถาวร ดังนั้นการปรับค่ากระแสสำหรับหลอดรังสีเอกซ์จึงมีความสำคัญมาก โดยค่าที่ปรับไว้ต้องสูงกว่าค่า leakage current และระดับของ leakage current ที่แน่นอนที่สุดจะต้องขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหลอดรังสีเอกซ์แต่ละชนิด



รูปที่ 2.27 Variation of output count rate with dead time

2.5.1.3 Primary beam filters

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิครังสีเอกซ์นี้การแยกวัดพลังงานหรือการแยกวัดความยาวคลื่นจากการปลดปล่อยสเปกตรัมรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ผลการวิเคราะห์ที่มีความเที่ยงตรงนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับการควบคุม 2 ส่วนคือ

- (1) ความไว (sensitivity)
- (2) แแบ็กกราวด์ (background)

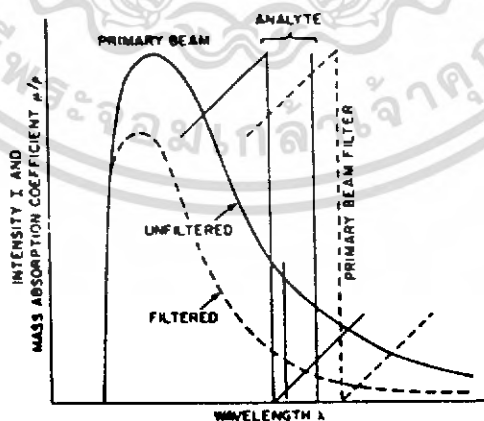
ในระบบนี้ข้อจำกัดความสามารถของการนับสูงสุดถูกจำกัดด้วยความไวในการวัด ชาติเป็นค่า count/second (cps) โดยจะขึ้นอยู่กับ kV กับกระแสของหลอดรังสีเอ็กซ์ที่เลือก อย่างไรก็ตาม การเกิดเบรคสตราลก็จะเป็นการนับรวมเข้ากับสเปกตรัมของชาติที่กำลังสนใจวิเคราะห์ การปลดปล่อยของเบรมสตราล (Bremsstrahlung) จากหลอดรังสีเอ็กซ์จะมีส่วนทำให้เกิดการกระเจิง ซึ่งเป็นผลของการเกิดเบรคสตราลที่ออกมาพร้อมกับชาติที่สนใจ ดังนั้นจะสามารถลดการเกิดเบรคสตราลและส่วนของฟิตที่ไม่ต้องการได้โดยการใช้ฟิลเตอร์ (filter) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “คุณสมบัติการดูดกลืน (absorption characteristics)” ในที่นี้จะแบ่งฟิลเตอร์ออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

2.5.1.3(a) Attenuation filters

Attenuation filters คือฟอยล์ (foil) บาง ๆ หรือแผ่นโลหะที่ติดตั้งบางแล้วมีผลต่อการดูดกลืนหรือแถบความยาวคลื่นจากการกระเจิง การดูดกลืนความยาวคลื่นที่สั้นมากหรือมีค่าแถบพลังงานการดูดกลืนที่สูงมากนี้ จะเป็นผลทำให้สามารถเห็นความยาวคลื่นที่ยาวได้ชัดเจนมาก การใช้ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะใช้ระหว่างเป้าโลหะและเส้นลำแสงปฐมภูมิ (primary-beam lines) ซึ่งจะ เป็นผลเฉพาะตำแหน่งที่ลำรังสีเอ็กซ์ (X-ray beam) เท่านั้น

2.5.1.3(b) Enhancement filters

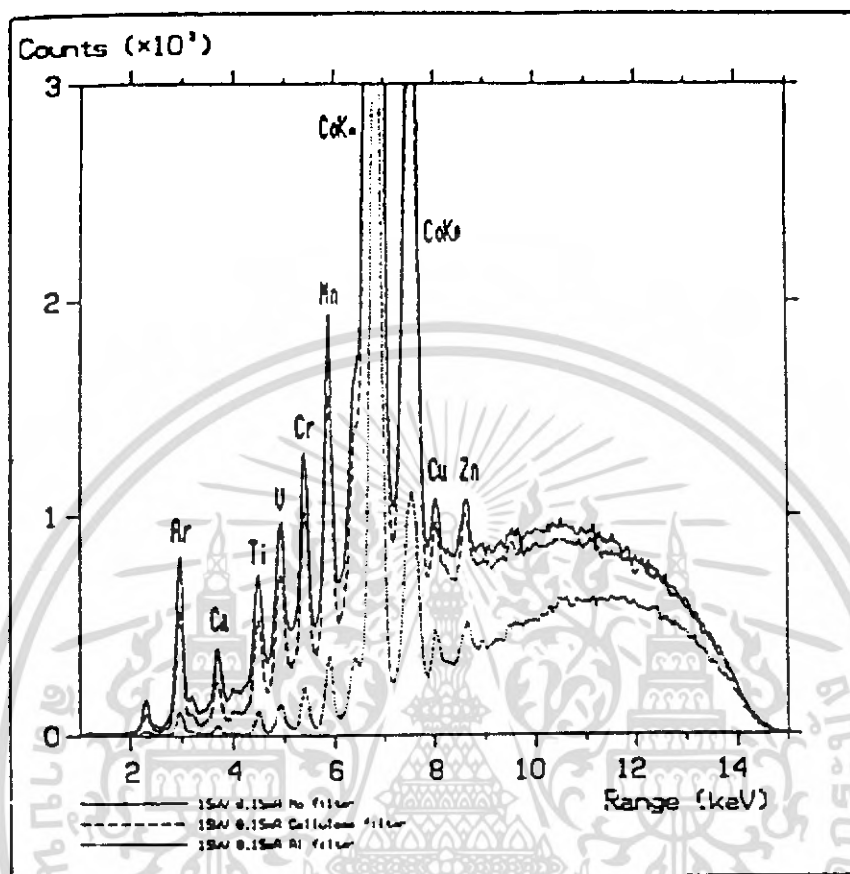
Enhancement filters คือฟอยล์บาง ๆ หรือแผ่นโลหะที่ติดตั้งบางอยู่ตรงตำแหน่งใน ลำรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (primary x-ray beam) ซึ่งจะมีผลให้อัตราส่วนการแยกของแนวสเปกตรัมจาก เบรคสตราล (analyte-line-to-background) ดีขึ้นและอาจทำให้ความเข้มของแนวสเปกตรัมลดลง ดัง รูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 Function of primary-beam enhancement filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการเลือกใช้ฟิลเตอร์ลำแสงปฐมภูมิ (primary-beam filters) ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 The use of primary-beam filters

จากรูปที่ 2.29 ถ้าเลือกแผ่น โลหะคูปเป็นฟิลเตอร์ในลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิผลของการฟิลเตอร์ที่ลำแสงปฐมภูมิจะอยู่ใน 2 ส่วนคือ scattered background และอัตราส่วน peak per background หลอดรังสีเอกซ์จะถูกตั้งค่าไว้ที่ 15 kV แต่กระแสจะปรับให้ตรงกับค่าคงที่ของ dead time ที่ 50% จะเห็นว่าในรูปที่ 2.29 ผลของการใช้โลหะคูปเป็นฟิลเตอร์พบว่า จะไม่มีผลต่อธาตุตั้งแต่ Na ถึง S เพราะเนื่องจากว่าหลอดรังสีเอกซ์ที่ไปกระตุ้นจะเกิดธาตุจำนวนมาก โดยที่ฟิลเตอร์ที่ใช้จะมีผลตั้งแต่พลังงานที่สูงกว่า 5 keV ขึ้นไป ดังนั้นจำนวนของฟิลเตอร์ก็ไม่ได้มีผลต่อการวิเคราะห์ละเอียดจำนวนมากนัก เพียงแต่จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับธาตุที่วิเคราะห์ ในการเลือกใช้ฟิลเตอร์ให้เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.8 ดังนี้

ตารางที่ 2.8 แสดงการเลือกใช้ฟิลเตอร์ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์

Material	Typical Thickness (micron)	Optimum element range
Cellulose		2.4-4.0 keV
Aluminium	50-500	3.0-8.0 keV
Titanium	12.5	5.0-10 keV
Iron	12.5	6.5-12 keV
Cobalt	12.5	7.0-12 keV
Copper	100-250	10-50 keV
Molybdenum	50-125	7-20 keV*
Rhodium	50-125	7-20 keV*
Silver	50-125	7-20 keV*

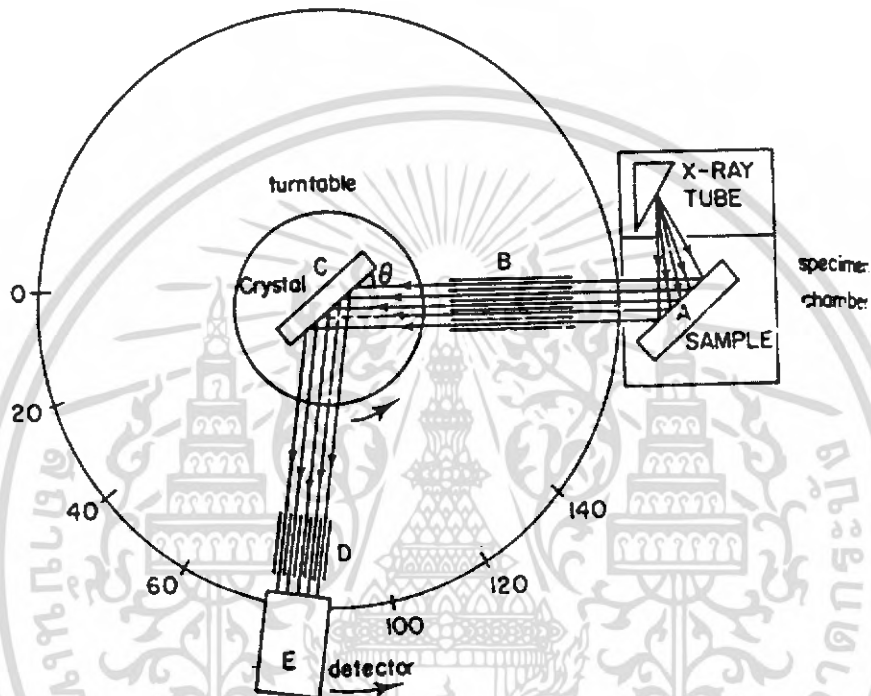
หมายเหตุ *เนื้อวัตถุ (Material) ชนิดนี้โดยทั่วไปจะเลือกให้ขึ้นกับเป้าโลหะของเครื่อง XRFs

2.5.1.4 Specimen Presentation

ระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบการแจกแจงความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.20 การวางตำแหน่งของตัวอย่างจะถูกกำหนดไว้เป็นตำแหน่งที่แน่นอน โดยที่ระนาบของตัวอย่างจะอยู่เหนือหน้าต่างของหลอดรังสีเอ็กซ์เอียงทำมุม ϕ ซึ่งโดยทั่วไปไปแนวทางเดินของลำแสงระหว่างรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิกับรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิหรือรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวจะอยู่ตรงกลางพื้นที่ของตัวอย่างเสมอ และมุมที่เกิดขึ้น (take off angle) จะเป็นมุม ψ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างลำแสงทั้งสอง (ψ) ปกติมีมุม $30^\circ - 45^\circ$ และมุมของลำรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากจุดศูนย์กลางของลำรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิเป็นมุม 90° เสมอ

2.5.2 ส่วนการแยกแยะ (Dispersion)

ส่วนการแยกแยะเป็นส่วนที่สองของระบบ WDXRFS ดังรูปที่ 2.30 จะแสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ทั้งหมดของส่วนที่สอง ซึ่งมีหน้าที่ในการแยกแยะความยาวคลื่นของลำแสงที่ออกมาจากตัวอย่าง (secondary X-ray) จะประกอบไปด้วยคอลลิเมเตอร์ (collimators) ชุดทางเดินของแสง (radiation path) และผลึก (crystals)



รูปที่ 2.30 Layout of a typical wavelength dispersive spectrometer

2.5.2.1 คอลลิเมเตอร์ (Collimators)

คอลลิเมเตอร์ของระบบนี้จะประกอบไปด้วยชุดสลิต (slit) ที่ขนานกัน ซึ่งสลิตแต่ละอันจะทำด้วยโลหะบาง หน้าที่ของคอลลิเมเตอร์คือจำกัดทางเดินของลำรังสีเอกซ์ทุติยภูมิระหว่างตัวอย่างกับผลึกที่จะจำกัดทิศทางโดยตรงและยังทำหน้าที่ในการลดเบี่ยงเบนการวัดและลดความเข้มของลำแสงลง หรือกล่าวได้ว่าคอลลิเมเตอร์มีจำนวนมากขึ้นทำให้ความละเอียด (resolution) ดีแต่ทำให้ผลการแผ่ความเข้มรังสีเอกซ์ทุติยภูมิลดลงเรียกคอลลิเมเตอร์ชุดนี้ว่า “คอลลิเมเตอร์ปฐมภูมิ (primary collimators)” สลิตที่นำมาประกอบเป็นชุดคอลลิเมเตอร์นี้ ถ้าการจัดระยะระหว่างสลิต 0.15 mm จะเหมาะสมสำหรับความยาวคลื่นสั้น (เลขอะตอมสูง) ส่วนระยะห่างของสลิต 0.55mm จะเหมาะสมสำหรับความยาวคลื่นยาว (เลขอะตอมต่ำ) และยังมีคอลลิเมเตอร์อีกชุดหนึ่งจะเรียกว่า “คอลลิเมเตอร์ทุติยภูมิ (secondary collimators)” ซึ่งอยู่ระหว่างผลึกกับหัววัดรังสี (detector) คอลลิ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมเตอร์ทุติยภูมิชุดนี้ จะเลือกใช้หรือไม่ใช้ขึ้นอยู่กับระบบงานวิเคราะห์ เพราะเนื่องจากปกติแล้วเครื่อง WDXRFs ทั่วไปจะมีแค่เพียงคอลลิเมเตอร์ปฐมภูมิเท่านั้น แต่ถ้าจะต้องการใช้คอลลิเมเตอร์ทุติยภูมิ ชุดนี้ก็จะขึ้นกับระยะห่างของสลิตเช่นกัน โดยที่ระยะห่างสลิต 0.45 mm จะมีส่วนช่วยไม่ให้เกิดการทับซ้อนของการเรืองรังสีเอ็กซ์ของตัวเอง ในทำนองเดียวกันถ้าระยะห่างสลิต 0.28 mm จะมีส่วนช่วยไม่ให้เกิดการซ้อนกันของพีค (line overlap) และยังมีส่วนช่วยลดแบ็กกราวด์อีกด้วย

2.5.2.2 ชุดทางเดินของแสง (Radiation path)

รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างอาจจะถูกดูดกลืนไปหมดหรือความเข้มลดลงไปได้ ทั้งนี้ก็เนื่องจากบรรยากาศที่ถูกบรรจุไว้ในเครื่องสเปกโทรมิเตอร์จะมีผลต่อการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวจากตัวอย่างไปยังหัววัดรังสีอย่างมาก โดยปกติแล้วการจัดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์นี้อาจจะอยู่ในสถานะของอากาศทั่วไป (air) หรืออยู่ในสถานะบรรยากาศของฮีเลียม (He) หรืออยู่ในสถานะสุญญากาศ (vacuum) ประมาณ 0.5 torr ถ้าบรรยากาศภายในอยู่ในสถานะอากาศทั่วไปจะเหมาะกับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นไม่เกิน 2.5 \AA แต่ถ้าอยู่ในระบบสุญญากาศเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 \AA และถ้าอยู่ในสถานะบรรยากาศของฮีเลียมเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 \AA หรือ 4 \AA ขึ้นไป สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทของเหลวถ้าทำอยู่ในสถานะสุญญากาศจะเกิดความเสียหายกับระบบควรจะวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทของเหลวในสถานะบรรยากาศของฮีเลียมดีกว่า และจะต้องใช้ภาชนะลักษณะพิเศษสำหรับตัวอย่างของเหลวอีกด้วย

2.5.2.3 ผลึก (Crystal)

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุแบบแจกแจงความยาวคลื่นด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ ส่วนที่ทำหน้าที่สำคัญในการแยกความยาวคลื่นก็คือผลึก (crystal) ผลึกที่ใช้แยกนี้ก็จะขึ้นอยู่กับว่าต้องการจะวิเคราะห์ช่วงความยาวคลื่นใด การแยกความยาวคลื่นของผลึกแต่ละชนิดนั้นจะอาศัยการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบนผิวหน้าของผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg's law นั่นคือ $2d \sin \theta = n\lambda$ ค่าของระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกเท่ากับ $2d$ นั้นจะมีผลทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของความยาวคลื่นได้มากที่สุดแต่ถ้าระยะห่างระหว่างผลึกน้อยกว่า $2d$ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของความยาวคลื่นสั้น และถ้าระยะระนาบผลึกมากกว่า $2d$ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาว ซึ่งสามารถพิจารณาการเลือกใช้ผลึกได้จากตารางที่ 2.9 ดังนี้

ตารางที่ 2.9 แสดงการเลือกใช้ผลึกทั่ว ๆ ไปกับช่วงความยาวคลื่นของธาตุ

Crystals	2d (Å)	Useful element range
Topaz	2.712	Cr-U
LiF420	1.890	Ni-U
LiF220	2.850	V-U
LiF200	4.020	K-U
GE111	6.530	P-Cl
Graphite002	6.710	P-Cl
Insb11	7.480	Si
PE002	8.740	Al-Cl
EDDT020	8.800	Al-Cl
ADP101	10.640	Mg
TIAP100	25.750	O-Mg

การแยกความยาวคลื่นของผลึก (analysing crystals) จะขึ้นอยู่กับผลึกที่ใช้ซึ่งการกระจายของรังสีจะขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d) และจากสมการของ Bragg's law คือ

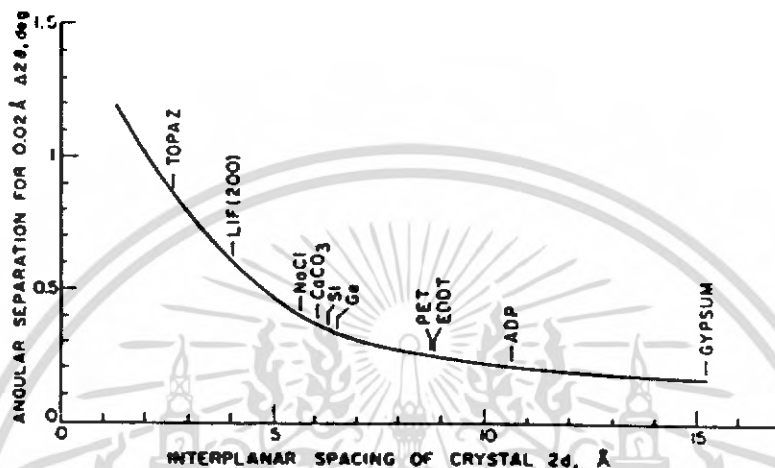
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

ถ้าดิฟเฟอเรนเชียลเขียนสมการของ Bragg's law จะได้ค่าความละเอียดของผลึกดังนี้

$$\begin{aligned} d(2d \sin \theta) &= d(n\lambda) \\ 2d \cos \theta d\theta &= nd\lambda \\ \frac{d\theta}{d\lambda} &= \left(\frac{n}{2d \cos \theta} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.13) นี้จะเป็นค่ากำลังการกระจายรังสีและจะเพิ่มขึ้น $\left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)$ เมื่อค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึกลดลง ดังแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในรูปกราฟที่ 2.31



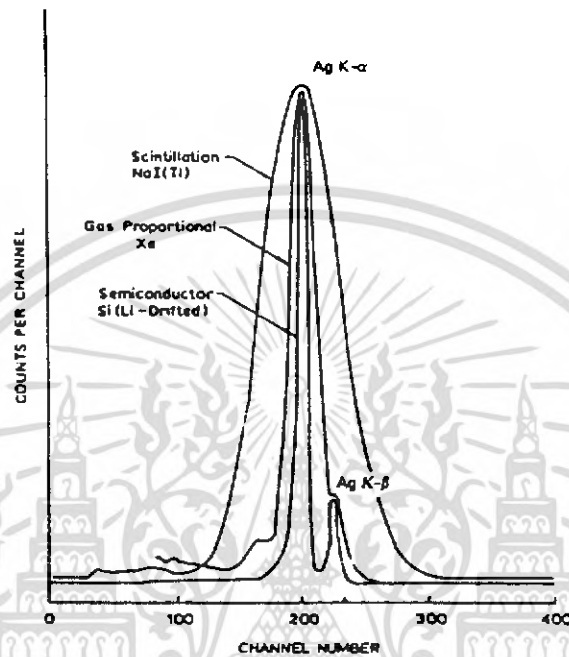
รูปที่ 2.31 Dispersion of common analyzer crystals as a function of interplanar spacing (2d)

2.5.3 ส่วนการตรวจวัด (Detection)

ในส่วนที่สามของเครื่อง WDXRF นี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนตรวจจับ (detection) และส่วนของการวัด (measurement) แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงแค่ส่วนของการตรวจจับจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดรังสี

หัววัดรังสีโดยทั่ว ๆ ไปจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แก๊สฟิลลิตีเทคเตอร์ (Gas filled detector), ซินทิลเลชันเคาน์เตอร์ (Scintillation counter) และ โซลิดสเตทเซมิคอนดักเตอร์ดีเทคเตอร์ (Solid state semiconductor detector) ซึ่งหัววัดรังสีทั้งสามประเภทนี้จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในที่นี้หัววัดรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่เลือกสำหรับระบบ WDXRF จะเป็นแบบแก๊สฟิลลิตีเทคเตอร์ ชนิดพร็อพอชันนอลเคาน์เตอร์ (proportional counter) และแบบซินทิลเลชันเคาน์เตอร์ ส่วนหัววัดรังสีแบบ โซลิดสเตทเซมิคอนดักเตอร์ดีเทคเตอร์จะเหมาะสมสำหรับระบบ EDXRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer) ความแตกต่างของการแจกแจงของหัววัดรังสีทั้งสามชนิดจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.32 ในการวัดของทั้งสองระบบการแจกแจง (Resolution) ของระบบจะแตกต่างกัน นั่นคือถ้าในระบบ EDXRF การแจกแจงของระบบจะขึ้นอยู่กับหัววัดรังสี

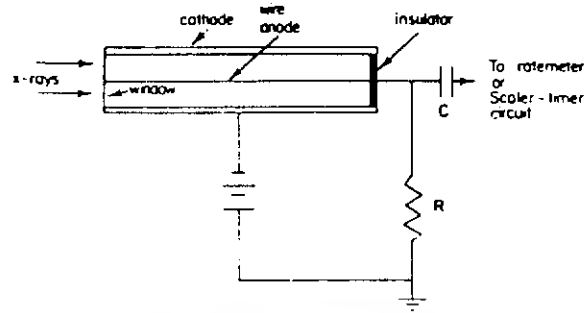
ซึ่งเลือกใช้หัววัดรังสีแบบ โซลิดสเตทเซมิคอนดักเตอร์ดีเทกเตอร์เพราะสามารถแยกพีคได้ชัดเจนกว่าหัววัดชนิดอื่น ส่วนระบบ WDXRF นั้นการแจกแจงของระบบจะขึ้นอยู่กับผลึก ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงหัววัดรังสีที่ใช้กับระบบ WDXRF



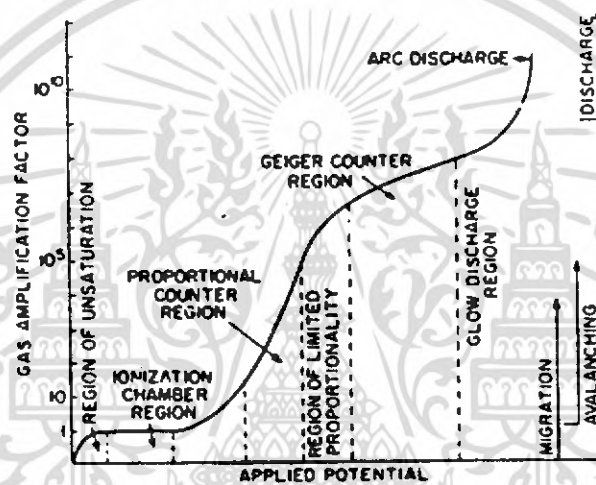
รูปที่ 2.32 A comparison of the pulse height spectra from incident silver K-series x-rays as recorded by three different detectors with varying energy resolution

2.5.3.1 หัววัดรังสีชนิดหรือพอซันนอลเคาน์เตอร์ (Proportional counter)

โครงสร้างภายในพื้นฐานของหัววัดรังสีจะเป็นดังรูปที่ 2.33 หลักการทำงานก็คือ เมื่อมีพลังงานของโฟตอนรังสีเอ็กซ์ตกกระทบหัววัดรังสีจะทำให้เกิดไอออนไนเซชัน (ionization) ระหว่างโฟตอนรังสีเอ็กซ์ กับแก๊สที่บรรจุอยู่ในหัววัด ผลที่ได้ก็คือจะเกิด ไอออนคู่ (ion-pairs) ขึ้น จำนวน ไอออนคู่ที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานโฟตอน ในทำนองเดียวกันพลังงานของโฟตอนรังสีเอ็กซ์จะเกิด ไอออนไนเซชันก็ต่อเมื่อมีศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่ง ไอออนบวกและอิเล็กตรอนวิ่งไปยังอิเล็กโทโรดอยู่ในช่วงของเขตหัววัดรังสีหรือพอซันนอลเคาน์เตอร์ดังกราฟที่ 2.34



รูปที่ 2.33 Schematic diagram of a proportional counter



รูปที่ 2.34 Gas-amplification factor as a function of applied potential for the gas-filled x-ray detector

2.5.3.2 หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชันคาน์เตอร์ (Scintillation counter)

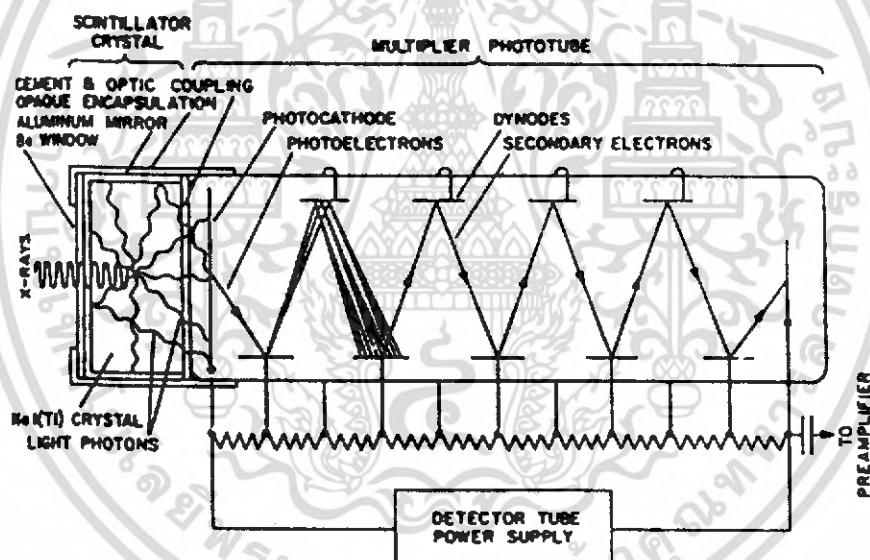
ส่วนใหญ่แล้วจะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ผลึกซินทิลเลชัน (scintillation crystals) และหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) จะกล่าวถึงรายละเอียดได้ดังนี้

2.5.3.2(a) ซิลทิลเลเตอร์ (Scintillator)

ผลึกซินทิลเลชันหรือซิลทิลเลเตอร์ (scintillator) หรือฟอสฟอรัส (phosphor) หมายถึง ผลึกที่เกิดการเรืองแสง (visible-light photon) เมื่อได้รับ โฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบสารที่ใช้ทำเป็นซิลทิลเลเตอร์นั้นอาจจะเป็นทั้งสารอนินทรีย์ (inorganic) และสารอินทรีย์ (organic) และควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) ต้องมีสัมประสิทธิ์การคูณสูงเพียงพอและความหนาที่เหมาะสมกับการตกกระทบของรังสีพลังงานสูง
- (2) อัตราส่วนพลังงานของแสงโฟตอนช่วงที่ตามองเห็นกับโฟตอนรังสีเอ็กซ์มีค่าค่อนข้างสูง
- (3) การเรืองแสงที่เกิดขึ้นจะต้องพอดีกับความไวของโฟโตคาโทด (photocathode) ในส่วนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์
- (4) ผลึกนั้นควรจะสามารถส่งต่อการเรืองแสงของตัวเองได้
- (5) การสะท้อนของผลึกต้องมีสัมประสิทธิ์ที่แน่นอนจนกว่าจะมีการเรืองแสงส่งไปยังโฟโตคาโทด
- (6) ให้ค่าไรส์ไทม์ (rise time) และดีเลย์ไทม์ (delay time) ค่อนข้างสั้นมากเพราะจะต้องให้อัตราการนับสูง



รูปที่ 2.35 Schematic diagram of a scintillation counter

(NaI) (single crystal) ที่มีสีขาว แต่ถ้าหากเกิดการดูดความชื้นจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองทำให้หมดสภาพเป็นสารเรืองแสง ส่วนทาลเลียม (Tl) ที่เติมเข้าไปในผลึกเดี่ยวจะมีหน้าที่ในการจับอิเล็กตรอน (trap electron)

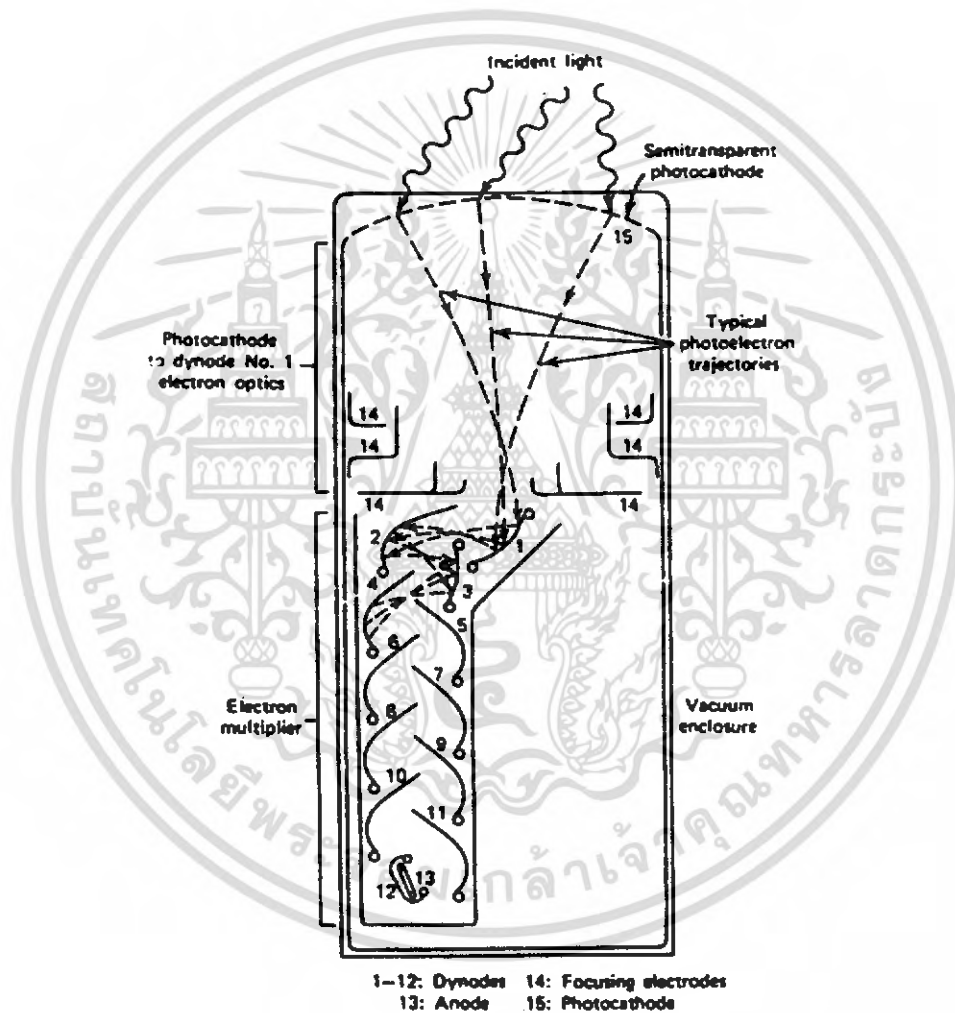
(NaI(Tl))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายเทพลังงานที่สูงเกินพอไปยังอะตอมของทาลเลียม ซึ่งผลการเปลี่ยนสถานะนี้จะทำให้อะตอมของทาลเลียมเกิดการเรืองแสง (โฟตอน) และจะไปตกกระทบลงบนโฟโตคาโทดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

2.5.3.2(b) หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube)

หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube; PM. tube) จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนโฟตอนไปเป็นอิเล็กตรอน (Photocathode) จะมีการขยายอิเล็กตรอนจำนวนมากขึ้น (dynode) เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์สูงพอที่จะนำไปขยายต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 Basic element of a PM. tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปโครงสร้างพื้นฐานของหลอดไฟโคมัลติฟลายเออร์จะประกอบไปด้วย โฟโตคาโทด, โฟกัลซึ่งอิเล็กโทด, ไคนอด และแอโนด การทำงานของหลอดไฟโคมัลติฟลายเออร์ นี้ คือ โฟตอนที่เกิดจากการเรืองแสงของผลึกจะสะท้อนไปตกกระทบที่โฟโตคาโทดซึ่งทำด้วยโลหะผสมแล้วทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกบังคับให้วิ่งไปชนไคนอดแรกทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของไคนอดแรกจำนวนมาก เนื่องจากระหว่างไคนอดและแอโนดจะมีความต่างศักย์ต่อคร่อมไว้เพื่อเร่งอิเล็กตรอนจากไคนอดแรกไปยังไคนอดถัดไปและจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าหากทำการเร่งอิเล็กตรอนระหว่างไคนอดประมาณ 12 ครั้ง (ดังรูป 2.36) จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนมีจำนวนมากพอ (ประมาณ $10^7 - 10^{10}$ อิเล็กตรอน) ที่จะทำให้เกิดพัลส์สูงพอที่จะนำไปขยายวงจรถัดไป เพื่อจะนำไปนับและวิเคราะห์ในส่วนของการวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

(Methodology)

ระบบการวิเคราะห์ธาตุแบบແຈກແຈງความยาวคลื่น (WDXRF) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่
 ได้รับจากเงินทุนของทางศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 พบว่าเครื่องมือชนิดนี้มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ทั้งในด้านการศึกษาค้นคว้า วิจัยของนักศึกษา
 รวมทั้งงานทางด้านอุตสาหกรรมของทั้งภาครัฐและเอกชน อย่างไรก็ตามงานวิเคราะห์ของ
 เครื่องมือนี้จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลว ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว
 สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่โซเดียมถึงยูเรเนียม (Na-U) ตามตารางธาตุ (ตารางที่ 3.1) แต่ธาตุที่มี
 เลขอะตอมต่ำ ๆ อย่างเช่น โบรอน (B), คาร์บอน (C), ไนโตรเจน (N), ฟลูออรีน (F) ก็สามารถที่จะ
 วิเคราะห์ได้แต่จะต้องใช้หลักเฉพาะ

ตารางที่ 3.1 ตารางธาตุ

The periodic table of the elements

H																	He
L	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	A															
		L	Lu	Co	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	

PHILIPS

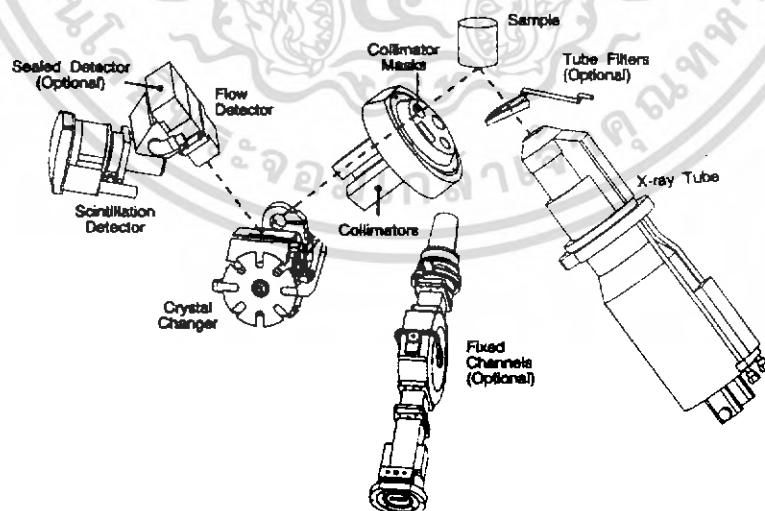
ในการทำงานของระบบ WDXRF Model PW2400 นี้จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงาน
 ของระบบรวมทั้งการวัดและการวิเคราะห์ ซึ่งโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Quantitative Analysis) จะพบว่ามีโปรแกรมเซมิควอนติเททีฟ (Semi-Quantitative) มาช่วยในการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณให้มีความสะดวกต่อการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณได้เร็วยิ่งขึ้นแต่ในความเป็นจริงของการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณจากตัวอย่าง ถ้าต้องการความถูกต้องสูง (Accuracy) จะพบว่าผลกระทบขององค์ประกอบ (Matrix effect) ในตัวอย่างแต่ละประเภทไม่เหมือนกัน (รวมถึงผลการเตรียมตัวอย่าง) ทำให้โปรแกรมเซมิควอนติเททีฟ (Semi-Quantitative) สามารถให้ข้อมูลเชิงปริมาณได้อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการผลวิเคราะห์เชิงปริมาณที่มีความถูกต้องสูง จึงจำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจองค์ประกอบของระบบการวัดและการวิเคราะห์ ซึ่งในการศึกษาโครงการนี้จะศึกษาในส่วนของหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) และการปรับศักดาไฟฟ้าสูงของหลอดรังสีเอกซ์ของระบบ WDXRFS Model PW2400 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของระบบ WDXRFS Model PW2400
2. ศึกษาโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)
3. การเตรียมตัวอย่าง
4. ศึกษาผลของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงที่มีต่อการวิเคราะห์
5. เปรียบเทียบความแตกต่างในการปรับศักดาไฟฟ้าสูงด้วยระบบอัตโนมัติและการปรับศักดาไฟฟ้าสูงด้วยมือต่อการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)

3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทำงานของระบบ WDXRFS Model PW 2400



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของ WDXRFS Model PW 2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 X-ray tube

หลอดรังสีเอ็กซ์ของระบบ WDXRF Model PW2400 เป็นชนิด End window และทำมาจากเซรามิก หลอดรังสีเอ็กซ์นี้ถูกออกแบบมาให้มีปลายของหลอดมีรูปร่างที่เรียวเพื่อที่จะให้ระยะทางระหว่างแอโนด (Anode) และผิวหน้าของตัวอย่างมีระยะทางน้อยที่สุด ในหลอดรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้มีความต่างศักย์ที่ขั้วแอโนดสูงสุดเท่ากับ 60 kV และจะต้องมีการระบายความร้อนด้วยน้ำดี-ไอออไนซ์ (De-ionized water) และใส่หลอดก็ต้องระบายความร้อนด้วยน้ำเช่นกัน

หลอดรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ได้ใช้โรเดียม (Rhodium; Rh) ทำเป่าโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) แต่เป่าโลหะชนิดอื่น ๆ ก็อาจจะถูกใช้สำหรับงานอื่นๆ ที่มีลักษณะเฉพาะที่ต่างออกไป

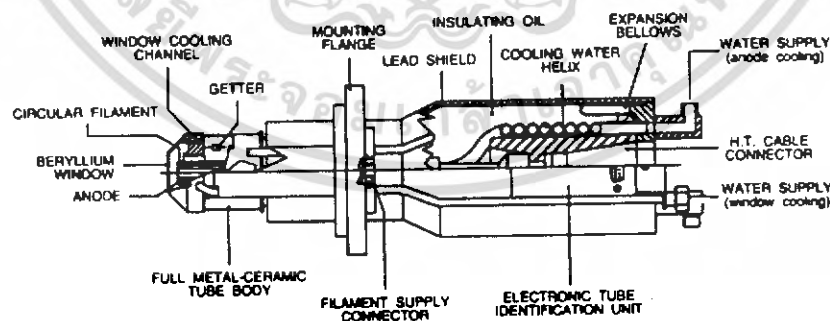
หลอดโรเดียม (Rh tube) สามารถให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้เท่ากับ 60kV และกระแสสูงสุด 125 mA และมีกำลังของหลอดสูงสุดเท่ากับ 3 kW และหน้าต่างของหลอดทำมาจากเบริลเลียม (Beryllium; Be) เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านสเปกตรัมเส้นในชั้นแอล (L line) ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการกระตุ้นสเปกตรัมเส้นของธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ (Low atomic number)

ข้อมูลเฉพาะของหลอดรังสีเอ็กซ์ (Specifications)

โครงสร้าง:

(Construction)

ตัวหลอดรังสีเอ็กซ์จะประกอบไปด้วยโลหะ/เซรามิก ด้านข้างมีการฉลิด (Shield) ด้วยตะกั่ว ใส่หลอดถูกต่อด้วยความต่างศักย์ที่เป็นกราวด์ (Ground potential) และขั้วแอโนดจะถูกต่อด้วยความต่างศักย์สูง (High potential)



รูปที่ 3.2 Super sharp x-ray tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก:

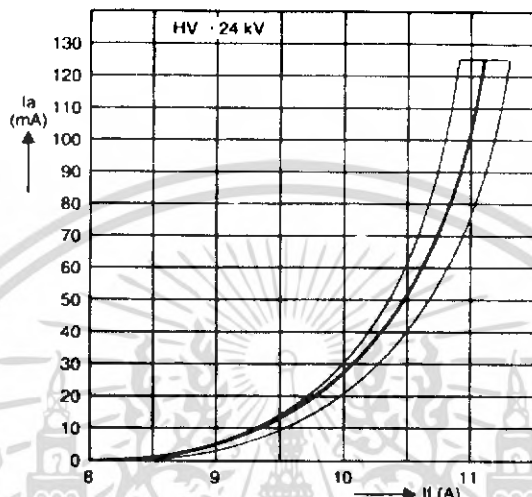
(Weight)

ประมาณ 9 กิโลกรัม

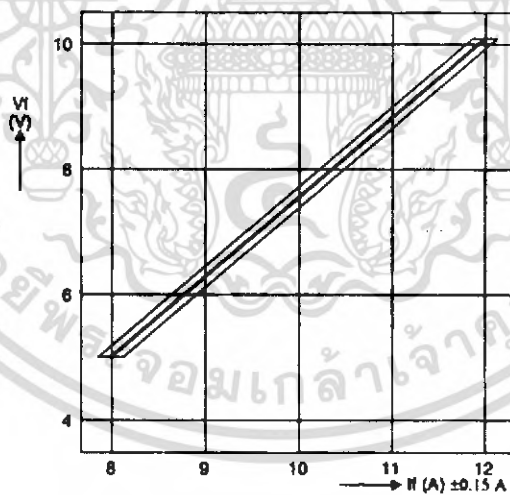
ไส้หลอด:

(Filament)

แสดงดังกราฟ 3.3 และ 3.4 ซึ่งเบี่ยงเบนได้ 5%



รูปที่ 3.3 Emission characteristic



รูปที่ 3.4 Filament characteristic

คุณสมบัติ:

(Characteristic)

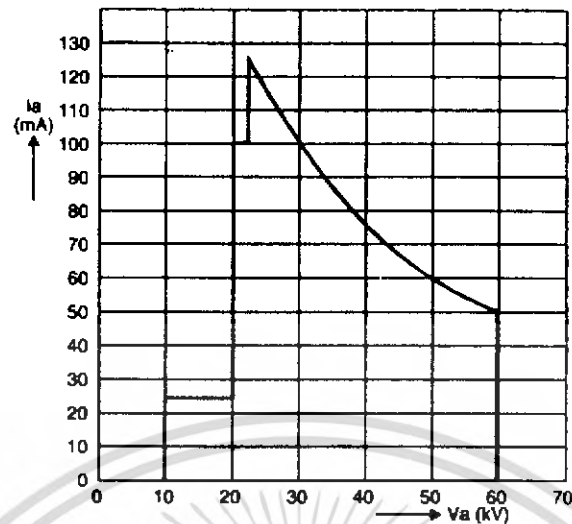
กระแสสูงสุดของไส้หลอดเท่ากับ 12 A

โหลดสูงสุด:

(Max. load)

แสดงดังกราฟ 3.5 ซึ่งโหลดสูงสุดเท่ากับ 3000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 Maximum power characteristic

ข้อแนะนำ: การที่จะให้หลอดมีอายุการใช้งานที่นาน การเปลี่ยนกำลังของหลอดรังสีอิเล็กทริกจะน้อยกว่า 1000 W

อัตราการป้อนกระแสและแรงดัน (Ratings)

กระแสไฟฟ้าสูงสุด:

(Max. anode current)

125 mA

แรงดันไฟฟ้าสูงสุด:

(Max. voltage)

+60 kV

กำลังสูงสุดของหลอด:

(Max. power)

3000 W

ความต้านทานต่ำสุดของ Ht transformer:

(Min. total series resistance

of the HtT transformer)

4k ohms (with a max. 2 nF generator capacitance)

หมายเหตุ: ความต้านทานต้องต่ออยู่ระหว่างตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันไฟฟ้าสูงและตัวหลอด

อัตราการปรับกระแสและแรงดันในโหมด

พร้อมปฏิบัติงานช่วงระยะเวลาสั้น ๆ:

(Short term standby ratings)

50kV/40mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการปรับกระแสและแรงดันในโหมด

พร้อมปฏิบัติงานช่วงระยะเวลาที่นาน:

(Long term standby ratings) 30kV/10mA

คำเตือน: อย่าให้หลอดรังสีเอกซ์มีกระแสไฟฟ้าสูงเมื่อหลอดรังสีเอกซ์อยู่ในโหมดที่พร้อมปฏิบัติงาน เช่น 125 mA เนื่องจากจะจะเป็นการลดอายุของไส้หลอดโดยไม่จำเป็น

วัสดุทำขั้วแอโนด:

(Anode material)

โรเดียม (Rh) - มาตรฐาน

โครเมียม (Cr), โมลิบดีนัม (Mo), สแกนเดียม (Sc) –
ขึ้นอยู่กับชิ้นงาน

สิ่งที่ปนอยู่ในสเปกตรัม:

(Spectral purity)

การวัด โดยที่ไม่มีตัวอย่างด้วยเครื่อง PW2400 ที่
ศักดาไฟฟ้าสูง 60 kV, ผลึก LiF 200 l และ P10 flow
detector จะสามารถวัดสเปกตรัมได้ในระดับต่ำเพียงแค่
20% แต่ในระดับที่สูงไม่สามารถวัดได้ และจะวัด
สเปกตรัมของโรเดียมชั้นเคแอลฟา (Rh K_{α}) ที่เป็น
2nd order ได้น้อยกว่า 100%

การระบายความร้อนทางด้านแอโนด (Anode cooling)

น้ำที่ไม่มีประจุ:

(De-ionized water)

มากกว่า 3 ลิตรต่อนาทีและน้อยกว่า 4.5 ลิตรต่อนาที

สภาพนำไฟฟ้า:

(Conductivity)

น้อยกว่า 3 $\mu S / cm$

อุณหภูมิที่เข้ามาได้สูงสุด:

(Max. inlet temperature)

35°C / 95°F

ความดันตกคร่อม:

(Pressure drop)

ประมาณ 0.15 MPa

ความดันของน้ำสูงสุด:

(Max. water pressure)

0.5 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันของน้ำสูงสุดที่เข้ามาได้:

(Max. water inlet pressure) 0.25Mpa

การระบายความร้อนทางด้านแคโทด (Cathode cooling)

คุณภาพของน้ำ:

(Water quality) น้ำกลั่น

การไหลของน้ำ:

(Flow) 1-2 l/min

ความดันสูงสุด:

(Max. pressure) 0.25 MPa

ความดันตกคร่อมที่ 2 ลิตรต่อนาที:

(Pressure drop at 2 l/min) 0.1 MPa

อุณหภูมิ:

(Temperature) สูงสุดที่ $30^{\circ}\text{C}/86^{\circ}\text{F}$ ส่วนต่ำสุดขึ้นอยู่กับจุดที่มีการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ (dew point)

ความอิ่มตัว:

(Saturation index) -0.5 ถึง +0.5

ดัชนีไรซเนอร์:

(Ryznar index) 5.5 ถึง 7.5

สารทำละลาย:

(Dissolved material) น้อยกว่า 500 mg/litre

สารทำละลายแบบออร์แกนิก:

(Dissolved organic material) ใช้ไปแทสซีมเมงกานีสออกไซด์น้อยกว่า 20 mg/litre

การเติมคลอรีน:

(Chlorine content) น้อยกว่า 250 mg/litre

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 Tube filter

ในระบบ WDXRF model PW2400 จะมีฟิลเตอร์ที่เหมาะสมอยู่ 5 แบบ โดยมีฟิลเตอร์ที่ใช้ได้แก่

- การใช้ทองเหลืองเป็นฟิลเตอร์ขนาด $100\ \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับการปรับปรุง background และขีดจำกัดในการตรวจวัดอยู่ในช่วง 20-30 keV
- การใช้เบอร์ลิเนียมเป็นฟิลเตอร์ขนาด $150\ \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับการป้องกันหลอดและของเหลว
- การใช้อะลูมิเนียมเป็นฟิลเตอร์ขนาด $200\ \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับการปรับปรุง background และขีดจำกัดในการตรวจวัดอยู่ในช่วง 6-10 keV
- การใช้ทองเหลืองเป็นฟิลเตอร์ขนาด $300\ \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับการลดสเปกตรัมเส้นของโรเดียมชั้นเค (K line)
- การใช้อะลูมิเนียมเป็นฟิลเตอร์ขนาด $750\ \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับการปรับปรุง background และขีดจำกัดในการตรวจวัดอยู่ในช่วง 13-17 keV
- การใช้ตะกั่วเป็นฟิลเตอร์ขนาด 1 mm จะทำให้ลำแสงไม่สามารถผ่านมาได้ทั้งนี้ก็จะป้องกันหลอดจากฝุ่นละอองและป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวตรวจวัด (Detector) เมื่ออยู่ในโหมดที่พร้อมจะใช้งาน (Standby mode)

3.1.3 Sample position

ตัวอย่างจะลอยอยู่เหนือหลอดซึ่งจะอยู่ในที่ใส่ตัวอย่าง ซึ่งในแท่นใส่ตัวอย่างนี้มีด้วยกัน 2 ตำแหน่ง และที่ใส่ตัวอย่างในการวิเคราะห์มีมากมายหลายขนาดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของตัวอย่าง สารตัวอย่างจะถูกนำเข้ามาในแท่นใส่ตัวอย่างโดยผ่านระบบแอร์ล็อก (air lock system) และถูกนำมาอยู่ในตำแหน่งที่อยู่เหนือหลอด โดยแท่นใส่ตัวอย่างจะมีการหมุนไป 180°

3.1.4 Collimator mask

คอลลิเมเตอร์มาสก์จะติดตั้งอยู่ระหว่างตัวอย่างและคอลลิเมเตอร์ตัวแรก ซึ่งจุดประสงค์ก็เพื่อให้แน่ใจว่ามีการแผ่ออกมาของฟลูออเรสเซนซ์จากตัวอย่างเท่านั้นที่มาผ่านคอลลิเมเตอร์และเราจะไม่พบการแผ่รังสีที่มาจากที่ใส่สารตัวอย่างจะไม่ถูกพบ ช่องรับแสงที่เหมาะสมกับถ้วยของตัวอย่างที่มีขนาด 37 mm, 30 mm, 27 mm และ 6mm แต่ในความเป็นจริงนั้นบริเวณนั้นจะเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างน้อยกว่า 2 mm ซึ่งน้อยกว่าขนาดของช่องรับแสงของถ้วยใส่ตัวอย่างที่เลือก ซึ่งในกรณีนี้จะต้องมีการเลือกขนาดให้เหมาะสม

3.1.5 Primary collimator

ในระบบ WDXRFS Model PW2400 จะมีคอลลิเมเตอร์อยู่ 3 ที่เหมาะสม ซึ่งคอลลิเมเตอร์นั้นประกอบด้วยแผ่นที่มีลักษณะคล้ายใบมีดบาง ๆ จำนวนมากมายและจะมีระยะห่างระหว่างใบมีดนั้นเท่ากัน ซึ่งมีจุดประสงค์ก็เพื่อให้รังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ออกมาจากตัวอย่างแล้วไปที่ผลึกนั้นเป็นลำแสงขนาน ระยะห่างของใบมีดของคอลลิเมเตอร์ที่อยู่ใกล้กันมาก ๆ จะทำให้เส้นขอบของสเปกตรัม (line profile) คมและชัดขึ้นและสามารถแยกสเปกตรัมได้ชัดขึ้น ระยะห่างของใบมีดยิ่งอยู่ใกล้กันมากจะทำให้การผ่านออกมาของฟลูออเรสเซนซ์ลดลง ดังนั้น จึงทำให้ความไวในการวัดลดลงแต่ความละเอียดจะเพิ่มขึ้น

คอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสมที่ถูกเลือกมาใช้งานมีทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งแต่ละตัวก็จะมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานของสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีดังนี้

- คอลลิเมเตอร์ที่มีช่องว่างขนาด $100 \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูงมาก
- คอลลิเมเตอร์ที่มีช่องว่างขนาด $150 \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง
- คอลลิเมเตอร์ที่มีช่องว่างขนาด $300 \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดในระดับกลาง ๆ
- คอลลิเมเตอร์ที่มีช่องว่างขนาด $550 \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดในระดับกลาง ๆ ไปถึงระดับหยาบ
- คอลลิเมเตอร์ที่มีช่องว่างขนาด $700 \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดที่ไม่มากนัก
- คอลลิเมเตอร์ที่มีช่องว่างขนาด $400 \mu\text{m}$ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดที่หยาบเป็นพิเศษ (โดยทั่วไปจะใช้กับธาตุ Be, B, C, N, O)

3.1.6 Analysis crystal

ในระบบ WDXRFS Model PW2400 จะมีผลึกอยู่ 8 แห่งที่เหมาะสมให้เลือก ทั้งนี้เพื่อให้ครอบคลุมความยาวคลื่นทั้งหมดที่จะเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้งาน ผลึกทั้ง 8 จะถูกติดอยู่กับถังกลมที่ต่ออยู่กับเครื่องหมุนผลึกซึ่งจะหมุนไปตำแหน่งที่ผลึกถูกเลือกในทางเดินของระบบแสงของสเปกโตรมิเตอร์

จุดประสงค์ของผลึกก็คือใช้แยกความยาวคลื่นของฟลูออเรสเซนซ์จากตัวอย่างและการส่งผ่านลำแสงโดยคอลลิเมเตอร์ โดยมีการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ของเบรกก์

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบนและเป็นจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่น

d คือ ระยะห่างของระนาบโครงผลึก

θ คือ มุมที่ลำรังสีตกกระทบทำกับระนาบและมุมที่เกิดเลี้ยวเบน (เกิดระหว่างคอลลิเมเตอร์และผิวหน้าผลึก)

ผลึกที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถเลือกได้ดังนี้

- ผลึก LiF 420, $2d = 0.1801 \text{ nm}$ ผลึกนี้จะใช้เมื่อต้องการความละเอียดมาก ความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromator) นี้จะใช้สำหรับธาตุที่อยู่ในช่วงของ Ni-U

- ผลึก LiF 220, $2d = 0.2848 \text{ nm}$ ถูกใช้ในการปฏิบัติงานที่เป็นงานประจำที่ต้องการความละเอียดสูง ความยาวคลื่นเดี่ยวนี้จะใช้สำหรับธาตุที่อยู่ในช่วง V-U

- ผลึก LiF 200, $2d = 0.4027 \text{ nm}$ เป็นตัวเลือกที่แนะนำให้เลือกใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่ทำเป็นประจำ ความยาวคลื่นเดี่ยวนี้จะใช้สำหรับธาตุที่อยู่ในช่วง K-U

- ผลึก InSb (111), $2d = 0.7477 \text{ nm}$ โดยปกติแล้วผลึกนี้จะใช้สำหรับธาตุซิลิคอนเท่านั้นให้ความไวที่สูงกว่าการใช้ผลึก PE และใช้ปรับปรุงความละเอียด

- ผลึก PE (002), $2d = 0.8742 \text{ nm}$ ความยาวคลื่นเดี่ยวนี้จะถูกใช้สำหรับธาตุที่อยู่ในช่วง Al-Cl ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ที่ทำเป็นประจำ

- ผลึก PX1 เป็นผลึกที่สังเคราะห์ขึ้นแบบมัลติเลเยอร์ (synthetic multilayer), $2d \approx 5 \text{ nm}$ จะถูกใช้สำหรับธาตุที่อยู่ในช่วง O-Mg

- ผลึก PX3 เป็นผลึกที่สังเคราะห์ขึ้นแบบมัลติเลเยอร์, $2d \approx 20 \text{ nm}$ จะถูกใช้สำหรับธาตุโบรอน

- ผลึก PX4 เป็นผลึกที่สังเคราะห์ขึ้นแบบมัลติเลเยอร์, $2d \approx 12 \text{ nm}$ จะถูกใช้สำหรับธาตุคาร์บอน

- ผลึก PX5 เป็นผลึกที่สังเคราะห์ขึ้นแบบมัลติเลเยอร์, $2d \approx 11 \text{ nm}$ จะถูกใช้สำหรับธาตุไนโตรเจน

- ผลึก PX6 เป็นผลึกที่สังเคราะห์ขึ้นแบบมัลติเลเยอร์, $2d \approx 30 \text{ nm}$ จะถูกใช้สำหรับธาตุเบอร์ริลเลียม

ผลึก Ge, PE, และ InSb อาจจะทำให้เส้นเคฟวซึ่งให้ความไวที่สูงกว่าและปรับปรุงเส้นขอบของสเปกตรัมสำหรับธาตุที่ถูกวัดที่มุมที่สูงขึ้นของโกนิโอมิเตอร์ (goniometer)

3.1.7 Detectors

ในระบบ WDXRFS Model PW2400 มีดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้ด้วยกัน 3 แบบ ซึ่งจะถูกติดตั้งเอาไว้ในโกนิโอมิเตอร์ (goniometer)

โฟลว์ดีเทคเตอร์ (flow detector) เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้หลักการทำให้เกิดไอออไนเซชัน (ionization) กับแก๊สอาร์กอน (Argon gas) ในสนามไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการเร่งไปทางขั้วแอโนดและเกิดการคิซาร์จซึ่งเป็นการทำให้เกิดพัลส์ทางไฟฟ้า (electrical pulse) ขึ้นมา ดีเทคเตอร์แบบนี้จะติดตั้งด้วยแผ่นบางตรงทางเข้าของหน้าต่าง โดยทั่วไปนิยมใช้เป็น aluminized polypropylene

ซึ่งสามารถเลือกใช้งานดังนี้ (ตามความหนาของแผ่น)

- $6\mu\text{m}$ สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 13 ลงมา (Al)
- $2\mu\text{m}$ สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 11 ลงมา (Na)
- $1\mu\text{m}$ สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 4 ลงมา (Be)

โดยปกติแล้วโฟลว์ดีเทคเตอร์จะใช้วัดความยาวคลื่นที่ยาว โดยทั่วไปเป็นสเปกตรัมชั้น K ของ Be ถึง Ni และสเปกตรัมชั้น L ของ Hf ถึง Ba

ซินทิลเลชันดีเทคเตอร์ (scintillation detector) เป็นดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้วัดรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากธาตุหนัก โดยการเปลี่ยนแปลงของรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามาโดยใช้โฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier) เป็นตัววัด ซึ่งนิยมใช้วัดความยาวคลื่นสั้น อย่างเช่นสเปกตรัมชั้น K ของ Ni ถึง Ba และสเปกตรัมชั้น L ของ Hf ถึง U

ดีเทคเตอร์ชนิดนี้วิธีการใช้เหมือนกับโฟลว์ดีเทคเตอร์ โดยจะถูกติดตั้งข้างหลังอาร์กอน โฟลว์ดีเทคเตอร์ การแผ่รังสีที่ไม่ถูกดูดกลืนและทำการวัดโดยโฟลว์ดีเทคเตอร์จะผ่านออกทางหน้าต่างและถูกวัดด้วยคูเพลกซ์ซีนอนดีเทคเตอร์ (duplex Xe detector)

ดีเทคเตอร์ 2 ชนิดนี้จะนิยมใช้งานร่วมกันและมีความไวสูงจึงเหมาะที่จะใช้วัดรังสีเอ็กซ์ของสเปกตรัมชั้น K ของ V ถึง Zn และสเปกตรัมชั้น L ของ Ce ถึง Ta

ดีเทคเตอร์ในระบบ WDXRFS Model PW2400 จะมีคุณสมบัติในการวัดพลังงานที่มีขอบเขตจำกัดในสัดส่วนที่เหมาะสมกับจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นในขนาดของพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีและในทางกลับกันกับปริมาณความยาวคลื่น

ดีเทคเตอร์จะถูกติดตั้งไว้ด้านหลังของคอลลิเมเตอร์ (collimator)

3.1.8 Goniometer

จากสมการของแบรกก์จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของผลึกที่จะทำมุม θ กับลำรังสีเอ็กซ์จากสารตัวอย่างและดีเทคเตอร์ โดยตำแหน่งที่ทำการวางดีเทคเตอร์นั้นจะอยู่ที่มุม 2θ กับลำรังสีเอ็กซ์จากสารตัวอย่าง ซึ่ง โคนิโอมิเตอร์จะทำการหมุนผลึกไปที่ครึ่งหนึ่งของการควบคุมการปรับเปลี่ยนมุมระหว่างแกนกลางแรกไปแกนที่สองซึ่งเป็นดีเทคเตอร์ ตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะเที่ยงตรงอันเนื่องมาจาก Direct Optical Positioning System (DOPS) ซึ่งใช้เป็นจานแสง (optical disc) กับตัวอย่างแบบ ไดโอดอะเรย์ (Diode array reader) ที่ไปยังสารตัวอย่างที่ความถี่สูง

ทั้งสองแกนจะทำการขับเคลื่อนและทำการวัดอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นไม่หวั่วัดแบบซินทิลเลชัน (scintillation detector) ก็หวั่วัดแบบแก๊สโฟลว์ (gas flow detector) (กับ duplex Xe detector) ที่จะเป็นตำแหน่งที่ถูกต้องจากมุมของแบรกก์สำหรับความยาวคลื่นที่ทำการวัดได้

3.1.9 Fixed channels

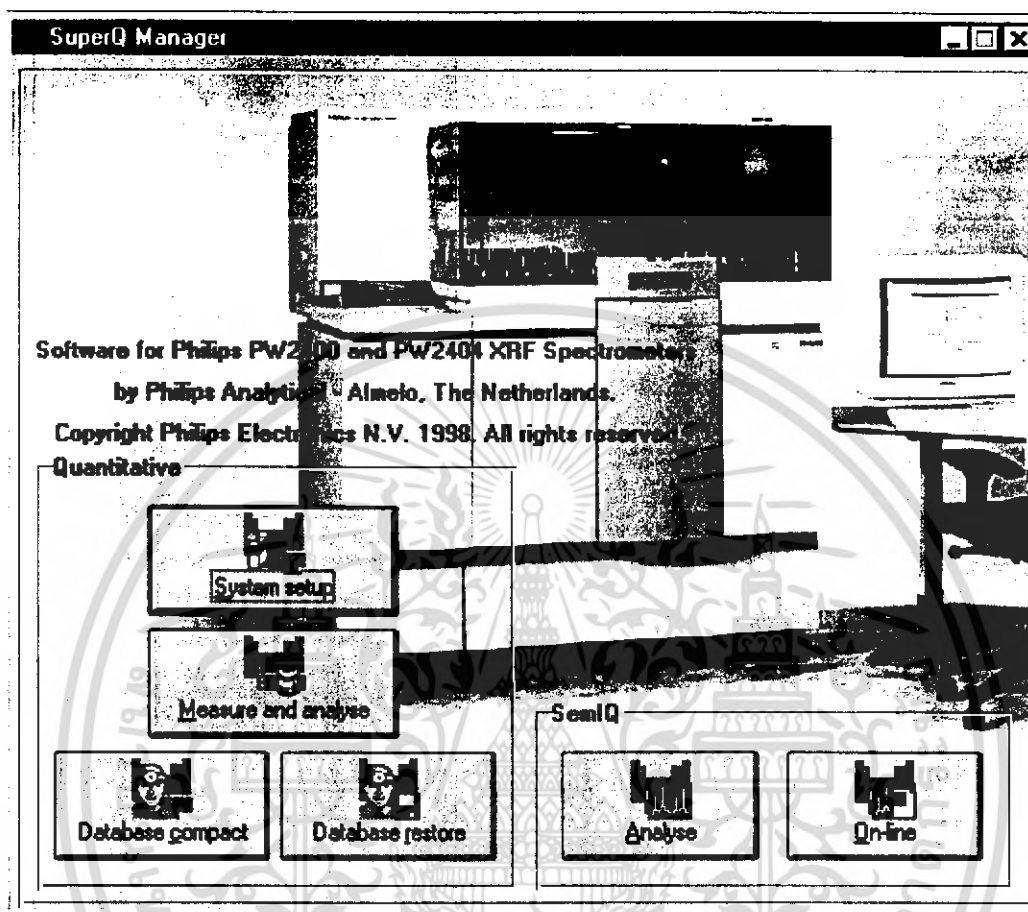
ในระบบ WDXRF Model PW2400 จะมีการติดตั้งฟิสิกซ์แชนเนล (fixed channel) 2 แบบ ซึ่งแต่ละส่วนก็จะประกอบด้วยระบบ pre-aligned fixed optical ทั้งหมดสำหรับระบบการวัดของลักษณะเฉพาะตัวการแผ่รังสีของธาตุ ๆ หนึ่ง ในระยะวิกฤตของธาตุอาจจะทำการวัดในช่วงระยะเวลาในขณะที่ยังสามารถทำการวัดได้ที่ระบบของ โคนิโอมิเตอร์เลย

ฟิสิกซ์แชนเนล (fixed channel) ใช้ระบบการโฟกัสทางแสง (focusing optical system) ในส่วนโค้งตามยาวผลึก (longitudinally curved crystal) ที่ใช้เป็นจุดเชื่อมต่อกับทางเข้าและทางออกสลิต ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณจะถูกติดตั้งเอาไว้กับดีเทคเตอร์ที่เหมาะสม

ตำแหน่งการติดตั้งทั้งสองนี้จะมีค่าแตกต่างกันที่มุมเริ่มต้น (take off angle) เกี่ยวกับผิวหน้าของสารตัวอย่าง กล่าวคือที่มุม 29° และ 44° มุม 44° จะมีสภาวะไวสูงกว่ามุม 29°

ฟิสิกซ์แชนเนล (fixed channel) สำหรับธาตุ B ถึง Mg จะออกแบบให้มีลักษณะเป็นพิเศษเรียกว่า ไฮ-เปอร์ แชนเนล (Hi-Per channels) โดยช่องสัญญาณนี้สลิตและผลึกจะถูกติดตั้งในส่วนที่เล็กที่สุดของความยาวของทางเดินแสง (optical path length) และเพิ่มความไวในการวัด

3.2 ศึกษาโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ



รูปที่ 3.6 แสดงโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

จากรูปที่ 3.6 ไอคอนต่าง ๆ ที่อยู่บนหน้าต่างซูเปอร์คิวแมนเนเจอร์ (SuperQ Manager) เป็นคำสั่งในการทำงานของโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งการทำงานแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อธิบายการทำงานของไอคอนต่าง ๆ

ไอคอน	คำอธิบาย
	ไอคอนนี้ใช้สำหรับเริ่มการทำงานของ โปรแกรม ใช้สำหรับตั้งค่าต่าง ๆ ภายในระบบและใช้ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ
	ไอคอนนี้ใช้ในการทำวิเคราะห์ตัวอย่างที่ต้องการ โดยจะแสดงผลการวิเคราะห์ออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ของระบบที่ติดตั้งเอาไว้
	ไอคอนนี้ใช้ในการรักษาฐานข้อมูลของโปรแกรมซูเปอร์คิว(SuperQ) ที่บันทึกอยู่ในเครื่อง
	ไอคอนนี้ใช้สำหรับการกู้คืนข้อมูลที่สำรองไว้ก่อนหน้านี้ของฐานข้อมูล
	ไอคอนนี้ใช้สำหรับทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ โปรแกรมซูเปอร์คิว (SuperQ) หรือเลือกใช้งาน โปรแกรมเซมิคิว (SemiQ) ในการวิเคราะห์ข้อมูลทีมาจาก โปรแกรมซูเปอร์คิว (SuperQ)
	ไอคอนนี้ใช้สำหรับทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารตัวอย่างขณะทำการเชื่อมต่อเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (แต่ต้องมีการติดตั้งโปรแกรมเซมิคิว (SemiQ) ก่อน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

การเลือกศักดาไฟฟ้าสูงให้เหมาะสมกับงานวิเคราะห์สารตัวอย่างที่สนใจนั้น ในการเตรียมสารตัวอย่างจะเลือกสารที่เป็นมาตรฐาน (standard sample) โดยจะพิจารณาสารมาตรฐานที่มีผลกระทบองค์ประกอบ (matrix effect) ของการวัดประเภทผง (powder) การเตรียมสารตัวอย่างมีขั้นตอนดังนี้

ธาตุที่จะนำมาวิเคราะห์ คือ Ca, Si, Fe, Mg, Mn และ V โดยที่ธาตุทั้งหมดจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ Ca(OH)_2 , SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , MnO_2 และ V_2O_5 ตามลำดับ เพื่อเป็นการง่ายต่อการปรับศักดาไฟฟ้าสูงและไม่ให้ธาตุแต่ละตัวมีผลกระทบต่อ เราจึงทำการเตรียมสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบเคียว ๆ และแต่ละธาตุที่เตรียมก็มีปริมาณเท่ากัน คือ ธาตุละ 2 กรัม แต่สารตัวอย่างอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ดังนั้นจะมีการคำนวณหาปริมาณธาตุที่เตรียมเป็นตัวอย่างมาตรฐานได้ดังนี้

1. ธาตุแคลเซียม (Ca) จากสารประกอบออกไซด์ Ca(OH)_2

$$\frac{\text{molecularmassCa(OH)}_2}{\text{molecularmassCa}} = \frac{\text{weight(g)Ca(OH)}_2}{\text{weight(g)Ca}}$$

$$\frac{40.08 + 2(15.9994 + 1.00797)}{40.08} = \frac{2.0000\text{g}}{\text{weight(g)Ca}}$$

$$\frac{74.0947}{40.08} = \frac{2.0000\text{g}}{\text{weight(g)Ca}}$$

$$\text{น้ำหนัก Ca} = 1.0819 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้ Ca เท่ากับ 1.0819 กรัม จึงจะมี Ca(OH)_2 อยู่ 2.0000 กรัม

2. ธาตุซิลิคอน (Si) จากสารประกอบออกไซด์ SiO_2

$$\frac{\text{molecularmassSiO}_2}{\text{molecularmassSi}} = \frac{\text{weight(g)SiO}_2}{\text{weight(g)Si}}$$

$$\frac{28.086 + 2(15.9994)}{28.086} = \frac{2.0000\text{g}}{\text{weight(g)Si}}$$

$$\frac{60.0848}{28.086} = \frac{2.0000\text{g}}{\text{weight(g)Si}}$$

$$\text{น้ำหนัก Si} = 0.9349 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้ Si เท่ากับ 0.9349 กรัม จึงจะมี SiO_2 อยู่ 2.0000 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ธาตุเหล็ก (Fe) จากสารประกอบออกไซด์ Fe_2O_3

$$\frac{\text{molecularmass}Fe_2O_3}{\text{molecularmass}Fe} = \frac{\text{weight}(g)Fe_2O_3}{\text{weight}(g)Fe}$$

$$\frac{2(55.847) + 3(15.9994)}{55.847} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)Fe}$$

$$\frac{159.6922}{55.847} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)Fe}$$

น้ำหนัก Fe = 0.6994 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ Fe เท่ากับ 0.6994 กรัม จึงจะมี Fe_2O_3 อยู่ 2.0000 กรัม

4. ธาตุแมกนีเซียม (Mg) จากสารประกอบออกไซด์ MgO

$$\frac{\text{molecularmass}MgO}{\text{molecularmass}Mg} = \frac{\text{weight}(g)MgO}{\text{weight}(g)Mg}$$

$$\frac{24.312 + 15.9994}{24.312} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)Mg}$$

$$\frac{40.3114}{24.312} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)Mg}$$

น้ำหนัก Mg = 1.2062 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ Mg 1.2062 กรัม จึงจะมี MgO อยู่ 2.0000 กรัม

5. ธาตุแมงกานีส (Mn) จากสารประกอบออกไซด์ MnO_2

$$\frac{\text{molecularmass}MnO_2}{\text{molecularmass}Mn} = \frac{\text{weight}(g)MnO_2}{\text{weight}(g)Mn}$$

$$\frac{54.9380 + 2(15.9994)}{54.9380} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)Mn}$$

$$\frac{86.9368}{54.9380} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)Mn}$$

น้ำหนัก Mn = 1.2639 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ Mn เท่ากับ 1.2639 กรัม จึงจะมี MnO_2 อยู่ 2.0000 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ธาตุวานาเดียม (V) จากสารประกอบออกไซด์ V_2O_5

$$\frac{\text{molecularmass}V_2O_5}{\text{molecularmass}V} = \frac{\text{weight}(g)V_2O_5}{\text{weight}(g)V}$$

$$\frac{2(50.942)+5(15.9994)}{50.942} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)V}$$

$$\frac{181.8810}{50.942} = \frac{2.0000g}{\text{weight}(g)V}$$

น้ำหนัก V = 0.5602 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ V เท่ากับ 0.5602 กรัม จึงจะมี V_2O_5 อยู่ 2.0000 กรัม

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ในระบบ WDXRF นั้นเราจำเป็นต้องใส่กรดบอริกเพื่อเป็นตัวช่วยในการยึดเหนี่ยวสารทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยที่สารตัวอย่างแต่ละตัวต้องมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 4.0000 กรัม เพื่อใส่ด้วยอะลูมิเนียม (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 mm) ดังนั้นจึงใส่กรดบอริก 2.0000 กรัม จึงจะได้ว่าโคลูท (dilute) กรดบอริก (H_2BO_3) เป็น 2 เท่า โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Dilute}H_2BO_3 = \frac{\text{totalweight}}{\text{weight}(g)H_2BO_3} = \frac{4.0000g}{2.0000g}$$

$$= 2 \text{ เท่า}$$

เมื่อนำสารประกอบออกไซด์ทั้ง 6 ชนิด ไปชั่งตามที่คำนวณข้างต้นแล้ว ต่อจากนั้นจะนำไปบดเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน การบดสารตัวอย่างก็เพื่อลดขนาดของอนุภาคและลดการกระจายของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ซ้าย – เป็นตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน

ขวา – เป็นตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อบดสารตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันแล้วต้องทำการอัดตัวอย่าง ประโยชน์ของการอัดแน่นก็เพื่อให้ตัวอย่างสามารถคงตัวอย่างได้โดยไม่ต้องอาศัยฟิล์มรอง อีกประการหนึ่งก็คือรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่พลังงานต่ำจะไม่ถูกดูดกลืนจากตัวอย่างและไม่มีฟลักที่กีดกันนอกเหนือไปจากตัวอย่างปรากฏในสเปกตรัม นอกจากนี้การอัดแน่นจะมีผลทำให้ความไวเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาแน่น ดังนั้นวิธีเตรียมตัวอย่างแบบการอัดแน่นนี้จึงมีความเหมาะสมและสะดวกต่อการเตรียมตัวอย่างซึ่งจะเกิดช่องว่างน้อยสุด

โดยทั่วไปในการอัดแผ่นตัวอย่างจะนิยมใช้วงอะลูมิเนียมหรือถ้วยอะลูมิเนียม เนื่องจากง่ายต่อการวัดและยังป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนในระหว่างการอัดด้วย



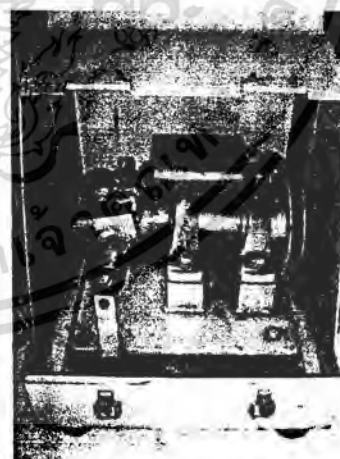
(ก) ถ้วยบดสารตัวอย่าง



(ข) วงอะลูมิเนียม



(ค) เครื่องขังสาร



(ง) เครื่องบดสาร Ball Mill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) เครื่องอัดสารตัวอย่าง

รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษาการปรับศักดาไฟฟ้าสูงสำหรับการวัดและการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณนั้น เราจะทำการปรับศักดาไฟฟ้าสูงในช่วงที่ต่ำกว่า absorption edge เล็กน้อย, ช่วงของ absorption edge และช่วงที่สูงกว่า absorption edge โดยให้ค่าของมุมที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ ซึ่งจะแสดงวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์จากการเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐาน ซึ่งวิธีการนี้จะแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์

ตอนที่	ศักดาไฟฟ้าสูง	มุม	ผลึก	ชนิดของหัววัด
1	variable	fixed	LiF220	Gas Flow Counter
2	variable	fixed	LiF200	Scintillation Counter
3	variable	fixed	LiF220	Gas Flow Counter
4	variable	fixed	LiF200	Scintillation Counter

หมายเหตุ ผลึกที่เลือกใช้เป็นผลึกที่มีการใช้งานอยู่เป็นประจำในเครื่อง WDXRFS Model PW2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

(Result and discussion)

การศึกษาผลกระทบจากการปรับศักดาไฟฟ้าสูงต่อการวิเคราะห์ธาตุของระบบ WDXRFS Model PW2400 ได้ทำการเตรียมตัวอย่างสารมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

4.1 การทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวิเคราะห์ของระบบ

การทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ โดยใช้สารมาตรฐานที่เท่ากับระบบ WDXRFS Model PW2400 สารมาตรฐานนี้ เรียกว่า SemiQA – SemiQL โดยมีการปรับเทียบมาตรฐานการวัดวิเคราะห์ของระบบ เมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2547 และในที่นี้จะขอยกตัวอย่างผลของการปรับเทียบมาตรฐานโดยใช้สารมาตรฐานที่เป็น SemiQF

ตารางที่ 4.1 แสดงการปรับเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ WDXRFS Model PW2400 โดยใช้สารตัวอย่างมาตรฐานที่เป็น SemiQF ซึ่งทำการทดสอบเมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2547

Line	X-tal	Collimator	Detector	kV	mA	Filter	Measured (kcps)	Significance
O Ka	PX1	550	Flow	24	100	<None>	4.820	478
Si Ka	PE	550	Flow	24	100	<None>	18.991	1215
Si Kb	PE	550	Flow	24	100	<None>	0.480	29
P Ka	Ge	550	Flow	24	100	<None>	74.656	1993
P Kb	Ge	550	Flow	24	100	<None>	1.977	65
Ca Ka	LiF200	150	Flow	30	80	<None>	38.871	1544
Ca Kb	LiF200	150	Flow	30	80	<None>	5.354	217
Fe Ka	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	47.883	1043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line	X-tal	Collimator	Detector	kV	mA	Filter	Measured (kcps)	Significance
Fe Kb	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	8.214	179
Zn La	PXI	550	Flow	24	100	<None>	0.602	27
Zn Ka	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	54.802	1035
Sm Lb2	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	3.242	66
Sm Lb1	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	9.600	218
Sm La	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	13.510	365
Sm La2	LiF220	150	Duplex	55	45	<None>	3.296	89

4.2 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพของสารมาตรฐานตัวอย่าง

4.2.1 วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ที่ความดัน 450 kg/cm² เวลาที่ใช้บด 20 นาที และธาตุที่ใช้ก็คือ Mg, Si, Ca, V, Mn และ Fe เตรียมปริมาณธาตุละ 2.0000 กรัม
- 2) คำนวณตำแหน่งของมุมพีคของแต่ละธาตุที่เกิดขึ้นจากสมการของแบรกก์
- 3) วางสารตัวอย่างมาตรฐานเพื่อกำหนดตำแหน่งของมุมพีคที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม SuperQ/quantitative (system set-up)-[check angle for channel ?] และทำการวัด โดยการปรับเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าสูงโดยใช้โปรแกรม SuperQ/quantitative (measure and analyse) (ตาม condition ที่กำหนดขึ้นเอง) โดยที่กระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 45, 50 และ 60 mA ตามลำดับ
- 4) ทำการวัดแบบอัตโนมัติ (ตามปกติของการใช้งานของศูนย์เครื่องมือฯ) ด้วยโปรแกรม SuperQ/quantitative (measure and analyse) (ตาม condition ที่ศูนย์เครื่องมือฯ กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้งานแบบเป็น routine) เพื่อตรวจสอบว่าสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมา มีค่าเท่ากับที่กำหนดไว้หรือไม่

4.2.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

- 1) การคำนวณหาตำแหน่งของมุมพีค (peak) ของแต่ละธาตุในเชิงคุณภาพ จากสมการของแบรกก์

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ธาตุของโครงการพิเศษนี้ธาตุแต่ละตัวจะใช้ผลึกแตกต่างกันออกไปในการแจกแจงความยาวคลื่น นอกจากนี้ระบบเป็นแบบเฟิร์สทอว์เคอร์รีเฟลคชัน (first order reflection) คือ $n = 1$ และเราสามารถหาค่าความยาวคลื่น (λ) ได้จากสมการ

$$E(\text{keV}) = \frac{12.4}{\lambda(\text{Å})}$$

ซึ่ง $E(\text{keV})$ คือ ค่าพลังงานของธาตุแต่ละชนิด โดยมีค่าแต่ละระดับชั้นพลังงานดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 2 (appendix 2)

1.1) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) จะใช้ผลึก PX1 ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 5 \text{ nm}$ และระดับพลังงานชั้น $K_{\alpha 1}$ เท่ากับ 1.25 keV และระดับพลังงานชั้น $K_{\beta 1}$ เท่ากับ 1.30 keV

หาค่าความยาวคลื่นจาก

$$\lambda(\text{Å}) = \frac{12.4}{E(\text{keV})}$$

จะได้

$$\lambda_{K_{\alpha 1}} = 9.920 \text{ Å}$$

$$\lambda_{K_{\beta 1}} = 9.538 \text{ Å}$$

จากสมการของแบรกก์

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

จะได้

$$\theta_{K_{\alpha 1}} = 11.443^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha 1}} = 22.886^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta 1}} = 10.997^\circ$$

$$2\theta_{K_{\beta 1}} = 21.994^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2) ซาตุซิลิคอน (Si) จะใช้ผลึก PE 002 ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 0.8742 \text{ nm}$ และระดับพลังงานชั้น $K_{\alpha 1}$ เท่ากับ 1.74 keV และระดับพลังงานชั้น $K_{\beta 1}$ เท่ากับ 1.83 keV

หาค่าความยาวคลื่นจาก
$$\lambda (A^\circ) = \frac{12.4}{E (keV)}$$

จะได้
$$\lambda_{K_{\alpha 1}} = 7.126 A^\circ$$

$$\lambda_{K_{\beta 1}} = 6.776 A^\circ$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

จากสมการของแบรกก์

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

จะได้

$$\theta_{K_{\alpha 1}} = 54.602^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha 1}} = 109.204^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta 1}} = 50.791^\circ$$

$$2\theta_{K_{\beta 1}} = 101.582^\circ$$

1.3) ซาตุแคลเซียม (Ca) จะใช้ผลึก LiF 200 ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 0.4027 \text{ nm}$ และระดับพลังงานชั้น $K_{\alpha 1}$ เท่ากับ 3.69 keV และระดับพลังงานชั้น $K_{\beta 1}$ เท่ากับ 4.01 keV

หาค่าความยาวคลื่นจาก
$$\lambda (A^\circ) = \frac{12.4}{E (keV)}$$

จะได้
$$\lambda_{K_{\alpha 1}} = 3.360 A^\circ$$

$$\lambda_{K_{\beta 1}} = 3.092 A^\circ$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

จากสมการของแบรกก์

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

จะได้

$$\theta_{K_{\alpha 1}} = 56.550^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha 1}} = 113.100^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta 1}} = 50.158^\circ$$

$$2\theta_{K_{\beta 1}} = 100.316^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4) ธาตุวานาเดียม (V) จะใช้ผลึก LiF 220 ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 0.2848 \text{ nm}$ และระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 4.95 keV และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 5.43 keV

หาค่าความยาวคลื่นจาก
$$\lambda (A^\circ) = \frac{12.4}{E (keV)}$$

จะได้
$$\lambda_{K_{\alpha_1}} = 2.505 A^\circ$$

$$\lambda_{K_{\beta_1}} = 2.284 A^\circ$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

จากสมการของแบรกก์

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

จะได้

$$\theta_{K_{\alpha_1}} = 61.590^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha_1}} = 123.180^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta_1}} = 53.318^\circ$$

$$2\theta_{K_{\beta_1}} = 106.636^\circ$$

1.5) ธาตุแมงกานีส (Mn) จะใช้ผลึก LiF 220 ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 0.2848 \text{ nm}$ และระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 5.90 keV และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 6.49 keV

หาค่าความยาวคลื่นจาก
$$\lambda (A^\circ) = \frac{12.4}{E (keV)}$$

จะได้
$$\lambda_{K_{\alpha_1}} = 2.102 A^\circ$$

$$\lambda_{K_{\beta_1}} = 1.911 A^\circ$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

จากสมการของแบรกก์

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

จะได้

$$\theta_{K_{\alpha_1}} = 47.567^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha_1}} = 95.134^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta_1}} = 42.144^\circ$$

$$2\theta_{K_{\beta_1}} = 84.288^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6) ธาตุเหล็ก (Fe) จะใช้ผลึก LiF 220 ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 0.2848 \text{ nm}$ และระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 6.40 keV และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 7.06 keV

หาค่าความยาวคลื่นจาก
$$\lambda (A^\circ) = \frac{12.4}{E (keV)}$$

จะได้
$$\lambda_{K_{\alpha_1}} = 1.936 A^\circ$$

$$\lambda_{K_{\beta_1}} = 1.756 A^\circ$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

จากสมการของแบรกก์

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

จะได้

$$\theta_{K_{\alpha_1}} = 42.826^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha_1}} = 85.652^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta_1}} = 38.066^\circ$$

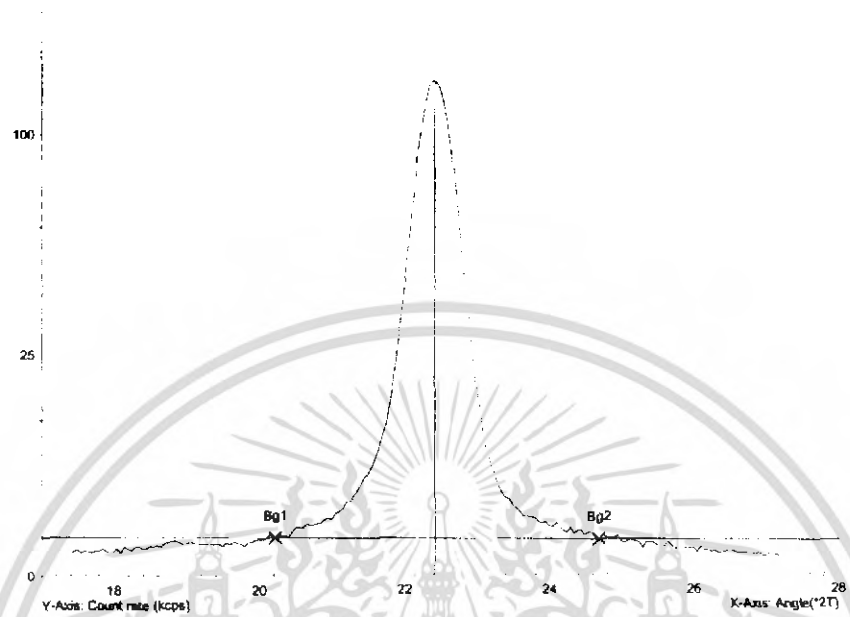
$$2\theta_{K_{\beta_1}} = 76.132^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

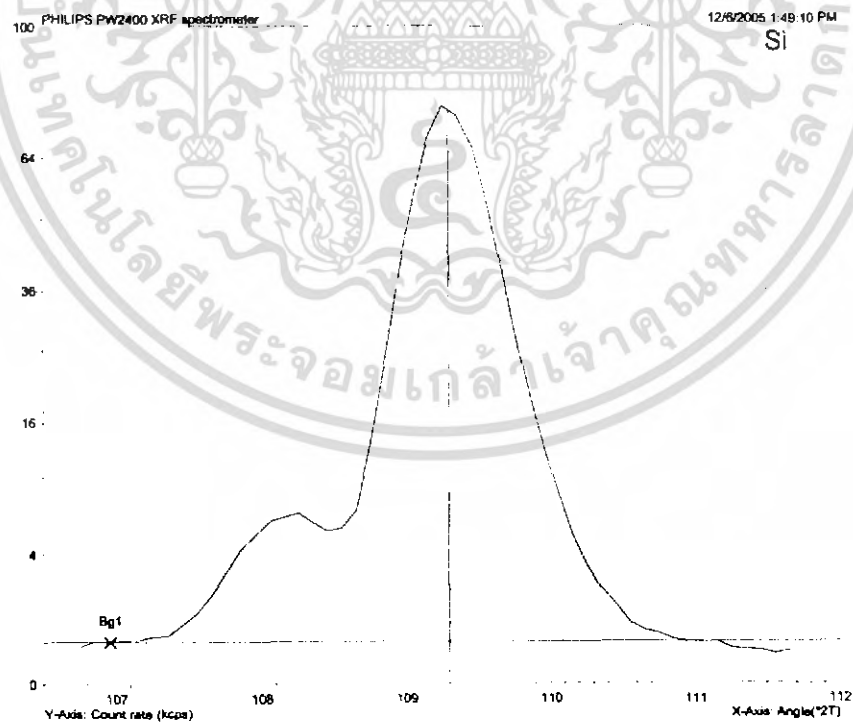
225 PHILIPS PW2400 XRF spectrometer

11/29/2005 3:15:41 PM

Mg

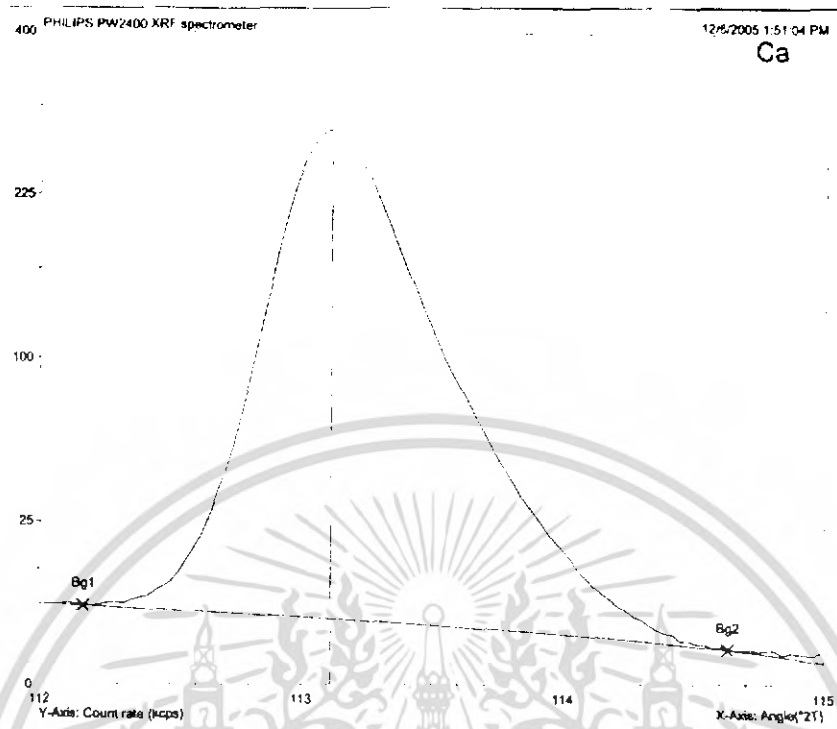


รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุแมกนีเซียม (Mg)

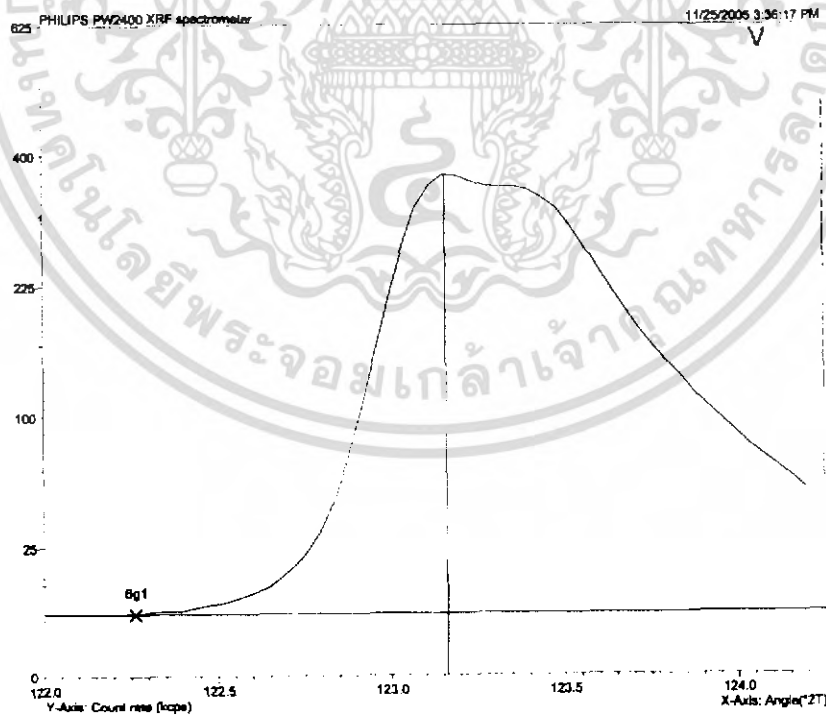


รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุซิลิคอน (Si)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

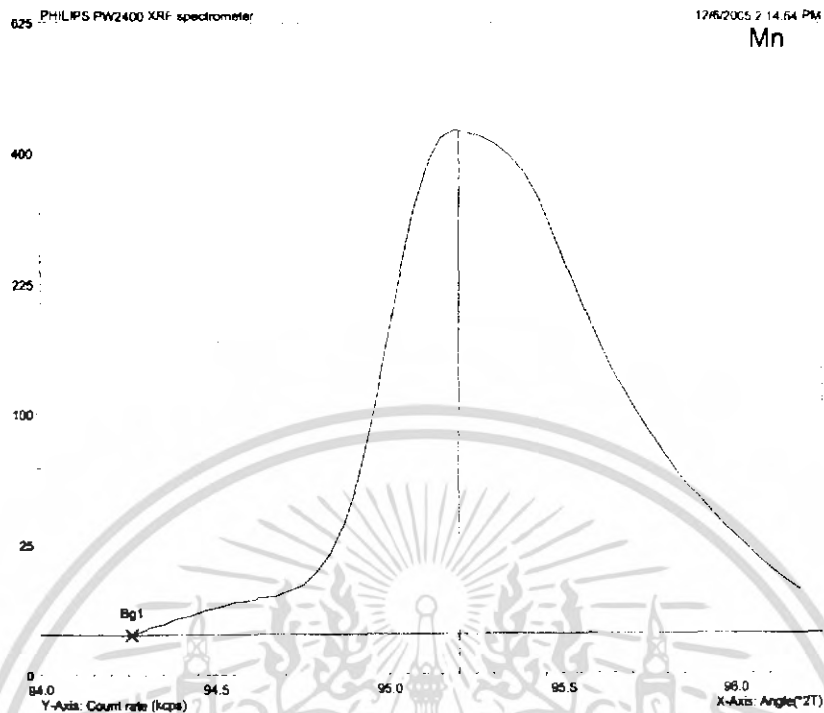


รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุแคลเซียม (Ca)

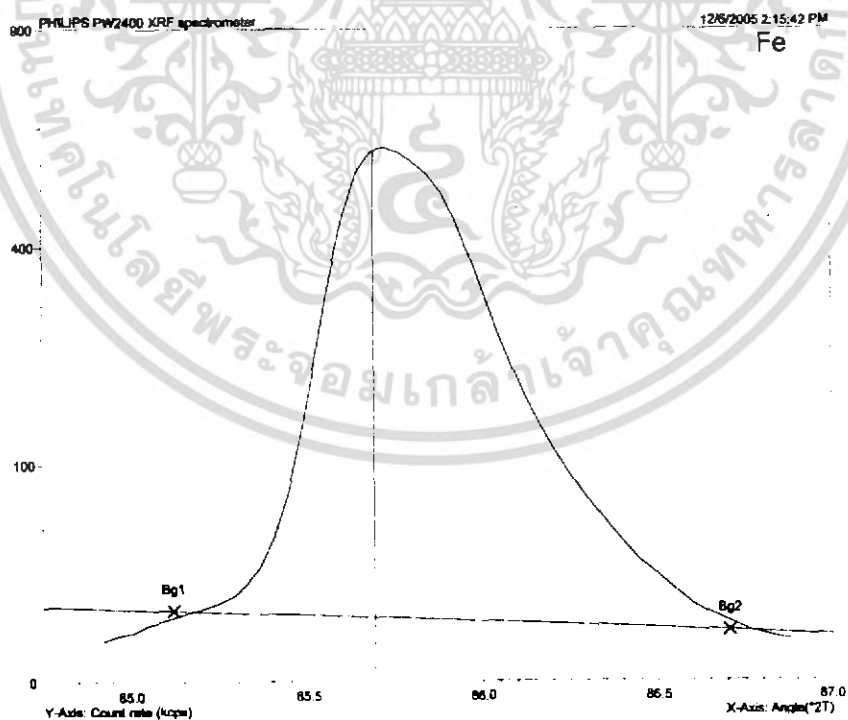


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุวานาเดียม (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุแมงกานีส (Mn)



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมในการปรับมุมของธาตุเหล็ก (Fe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลการทดสอบของแต่ละธาตุในเชิงปริมาณด้วยวิธีการปกติ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบของแต่ละธาตุในเชิงปริมาณด้วยวิธีการปกติ

Sample	Intensity (kps)	Concentration (%)
Mg 50%	211.313	48.326
Si 50%	141.646	47.673
Ca 50%	388.080	49.698
V 50%	638.987	49.624
Mn 50%	420.629	50.000
Fe 50%	568.594	50.000

หมายเหตุ: วิธีปกติเป็นวิธีการวัดด้วยโปรแกรมอัตโนมัติของระบบ ซึ่งจะเป็นวิธีที่ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์ฯ ใช้ปฏิบัติงานตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การปรับศักดาไฟฟ้าสูงสำหรับการวัดและวิเคราะห์

4.3.1) วิธีการทดสอบ

การศึกษาผลกระทบของการปรับศักดาไฟฟ้าสูงต่อผลการวิเคราะห์ธาตุ มีขั้นตอนในการทดสอบ ดังนี้

1) นำสารตัวอย่างมาตรฐานที่เตรียมขึ้นมาที่เป็นธาตุ Mg เข้าเครื่อง WDXRFS เพื่อทำการทดสอบ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์ โดยเริ่มต้นที่ 25 kV กระแสไฟฟ้า 45 mA ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง บันทึกผลและหาค่าเฉลี่ย

2) ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 1 โดยเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์เป็น 30 kV, 35kV, 40 kV, 45 kV และ 50 kV ตามลำดับ โดยให้กระแสไฟฟ้าของหลอดรังสีเอ็กซ์คงที่เท่ากับ 45 mA บันทึกผลการทดลองและหาค่าเฉลี่ย และเขียนกราฟระหว่างค่าศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์กับความเข้มแสงของรังสีเอ็กซ์

3) ทำการคำนวณหาค่า Sensitivity และ Relative sensitivity ที่ศักดาไฟฟ้าสูงแต่ละค่า (คู่มือคำนวณ ได้ในหัวข้อ 4.3.3) และเขียนกราฟระหว่างค่าศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์กับ Sensitivity และกราฟระหว่างค่าศักดาไฟฟ้าสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์กับ Relative sensitivity

4) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1, 2 และ 3 แต่เปลี่ยนสารตัวอย่างมาตรฐานที่เป็นธาตุ Si, Ca, V, Mn และ Fe ตามลำดับ

5) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1, 2, 3 และ 4 แต่เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าจากหลอดรังสีเอ็กซ์เป็น 50 mA และ 60 mA ตามลำดับ

4.3.2) ผลการวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุในเชิงคุณภาพ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) แสดงดังตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 45 mA

ธาตุ \ kV	ครั้งที่	Intensity (keps)					
		25	30	35	40	45	50
Mg 50%	1	102.671	122.624	139.468	153.826	165.606	172.895
	2	102.313	123.652	140.054	154.342	166.414	173.890
	3	102.208	122.834	139.124	154.882	166.823	174.318
	เฉลี่ย	102.397	123.037	139.549	154.350	166.281	173.701
Si 50%	1	65.941	78.538	89.199	98.033	105.710	111.532
	2	65.964	78.891	88.957	98.209	105.708	111.927
	3	65.899	78.745	89.230	98.455	105.409	112.362
	เฉลี่ย	65.935	78.725	89.129	98.232	105.609	111.940
Ca 50%	1	175.694	217.863	254.802	287.632	318.284	344.302
	2	175.582	215.713	255.174	287.532	319.332	346.095
	3	176.588	218.050	255.729	286.488	318.787	345.335
	เฉลี่ย	175.955	217.209	255.235	287.217	318.801	345.244
V 50%	1	140.219	181.112	221.090	260.509	298.229	334.862
	2	139.854	180.995	221.446	260.760	298.197	334.014
	3	140.063	181.055	221.204	260.613	298.586	334.919
	เฉลี่ย	140.045	181.054	221.247	260.627	298.337	334.598
Mn 50%	1	136.305	183.831	233.338	283.114	333.637	383.128
	2	136.093	183.615	233.322	282.975	333.514	383.660
	3	136.102	183.720	233.391	283.105	333.934	383.875
	เฉลี่ย	136.167	183.722	233.350	283.065	333.695	383.554
Fe 50%	1	172.507	237.975	305.898	377.125	448.104	520.401
	2	172.618	237.655	306.037	376.757	448.171	519.662
	3	172.838	238.035	305.895	376.839	448.799	520.453
	เฉลี่ย	172.654	237.888	305.943	376.907	448.358	520.172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 50 mA

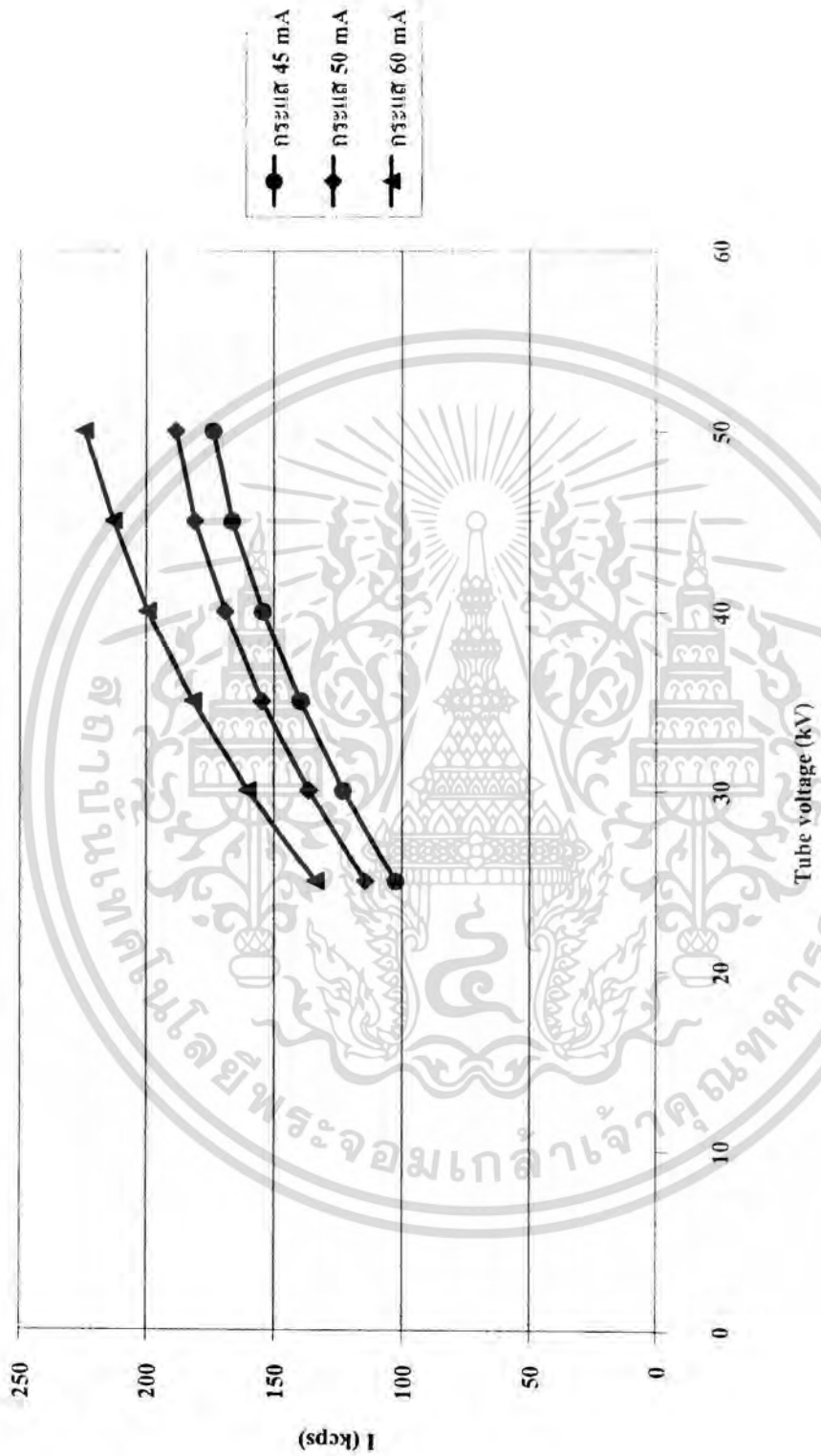
ธาตุ \ kV	ครั้งที่	Intensity (kcps)					
		25	30	35	40	45	50
Mg 50%	1	114.073	135.659	154.268	168.044	179.483	187.342
	2	114.646	136.420	154.492	169.842	180.793	187.785
	3	114.277	136.943	155.277	169.261	182.529	189.539
	เฉลี่ย	114.332	136.341	154.679	169.049	180.935	188.222
Si 50%	1	74.124	88.170	99.980	110.833	118.617	124.248
	2	73.760	88.248	99.969	110.263	118.358	124.817
	3	74.193	88.123	100.181	110.388	118.907	124.927
	เฉลี่ย	74.026	88.180	100.043	110.495	118.627	124.664
Ca 50%	1	196.380	240.689	281.178	318.401	351.246	381.246
	2	197.052	241.174	281.710	319.068	351.614	382.508
	3	196.976	241.144	281.852	319.244	352.732	382.509
	เฉลี่ย	196.803	241.002	281.580	318.904	351.864	382.088
V 50%	1	155.120	200.260	245.153	288.555	330.633	370.467
	2	154.901	200.783	245.231	287.844	330.790	370.815
	3	155.245	200.483	245.066	288.559	330.829	371.257
	เฉลี่ย	155.089	200.509	245.150	288.319	330.751	370.846
Mn 50%	1	152.381	205.896	260.709	316.850	372.317	428.927
	2	152.273	205.426	260.664	316.756	372.808	429.278
	3	152.432	205.921	260.641	316.979	373.026	429.212
	เฉลี่ย	152.362	205.748	260.671	316.862	372.717	429.139
Fe 50%	1	194.516	268.240	345.455	424.685	505.584	587.489
	2	194.880	268.274	345.615	425.311	506.265	586.733
	3	194.504	268.344	345.750	424.558	505.541	587.111
	เฉลี่ย	194.633	268.286	345.607	424.851	505.797	587.111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 60 mA

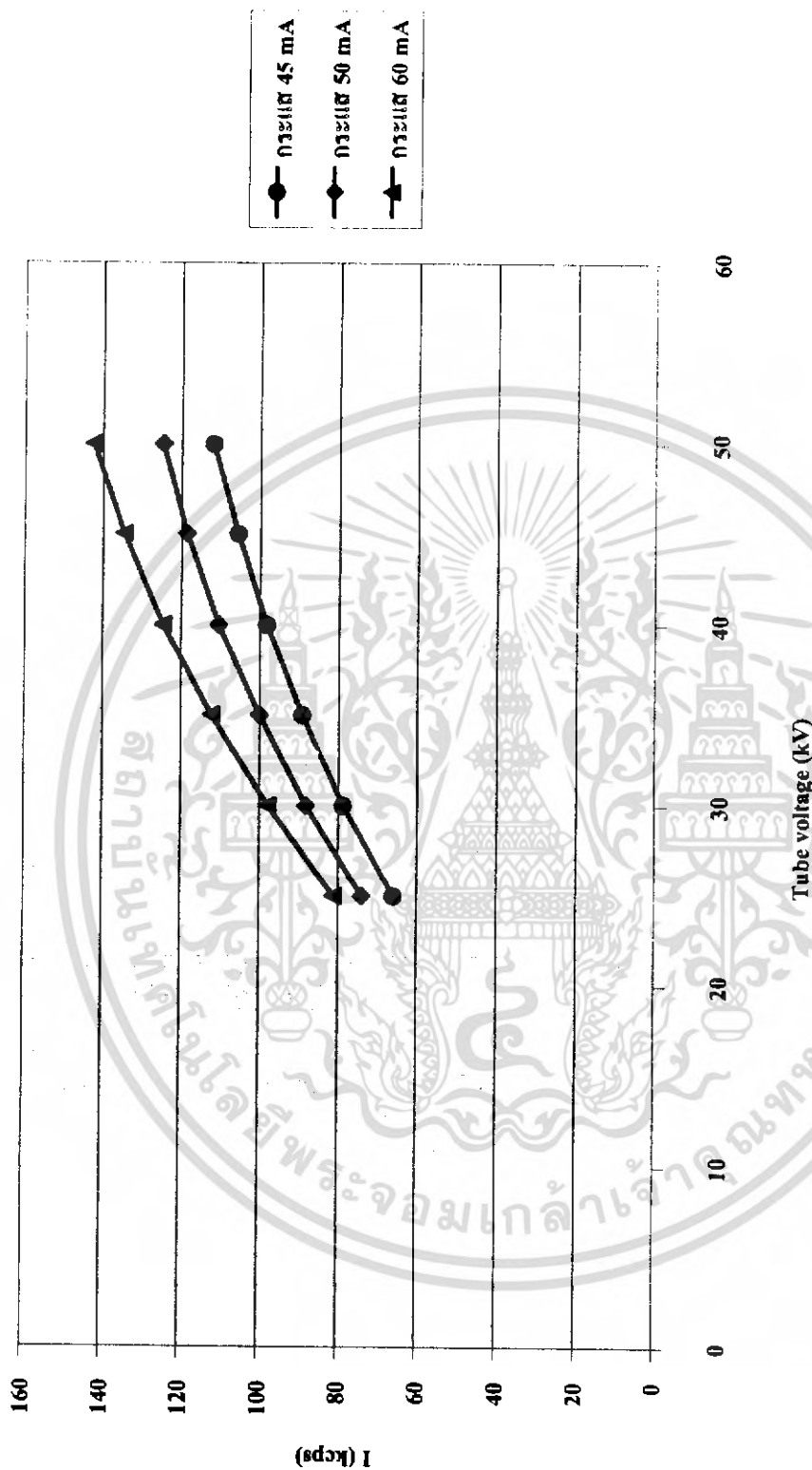
ธาตุ \ kV	ครั้งที่	Intensity (kcps)					
		25	30	35	40	45	50
Mg 50%	1	134.162	160.029	181.789	199.475	210.905	223.888
	2	133.052	160.387	182.095	199.443	213.334	224.609
	3	134.136	160.356	181.116	199.441	214.276	224.284
	เฉลี่ย	133.783	160.257	181.667	199.453	212.838	224.260
Si 50%	1	80.560	97.662	111.726	124.614	134.489	142.457
	2	81.304	98.180	112.249	124.604	134.440	142.064
	3	81.584	97.835	112.866	124.290	134.862	142.392
	เฉลี่ย	81.149	97.892	112.280	124.503	134.597	142.304
Ca 50%	1	235.471	286.001	333.475	378.762	417.982	457.797
	2	235.137	289.010	336.158	382.030	422.012	460.385
	3	232.963	287.324	335.741	380.997	420.445	464.205
	เฉลี่ย	234.524	287.445	335.125	380.596	420.146	460.796
V 50%	1	186.873	241.308	294.280	347.118	398.681	445.974
	2	186.845	241.693	294.980	347.662	398.783	446.762
	3	186.979	241.371	295.144	348.039	399.084	446.904
	เฉลี่ย	186.899	241.457	294.801	347.606	398.849	446.547
Mn 50%	1	183.170	247.119	313.850	380.555	448.123	515.869
	2	183.004	247.109	313.281	380.651	448.718	516.161
	3	182.704	247.501	313.674	381.183	448.925	516.382
	เฉลี่ย	182.959	247.243	313.602	380.796	448.589	516.137
Fe 50%	1	234.914	323.464	415.789	511.830	608.138	705.922
	2	234.885	323.364	416.380	511.932	608.405	706.343
	3	234.967	323.422	416.139	511.807	608.285	705.823
	เฉลี่ย	234.922	323.417	416.103	511.856	608.276	706.029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



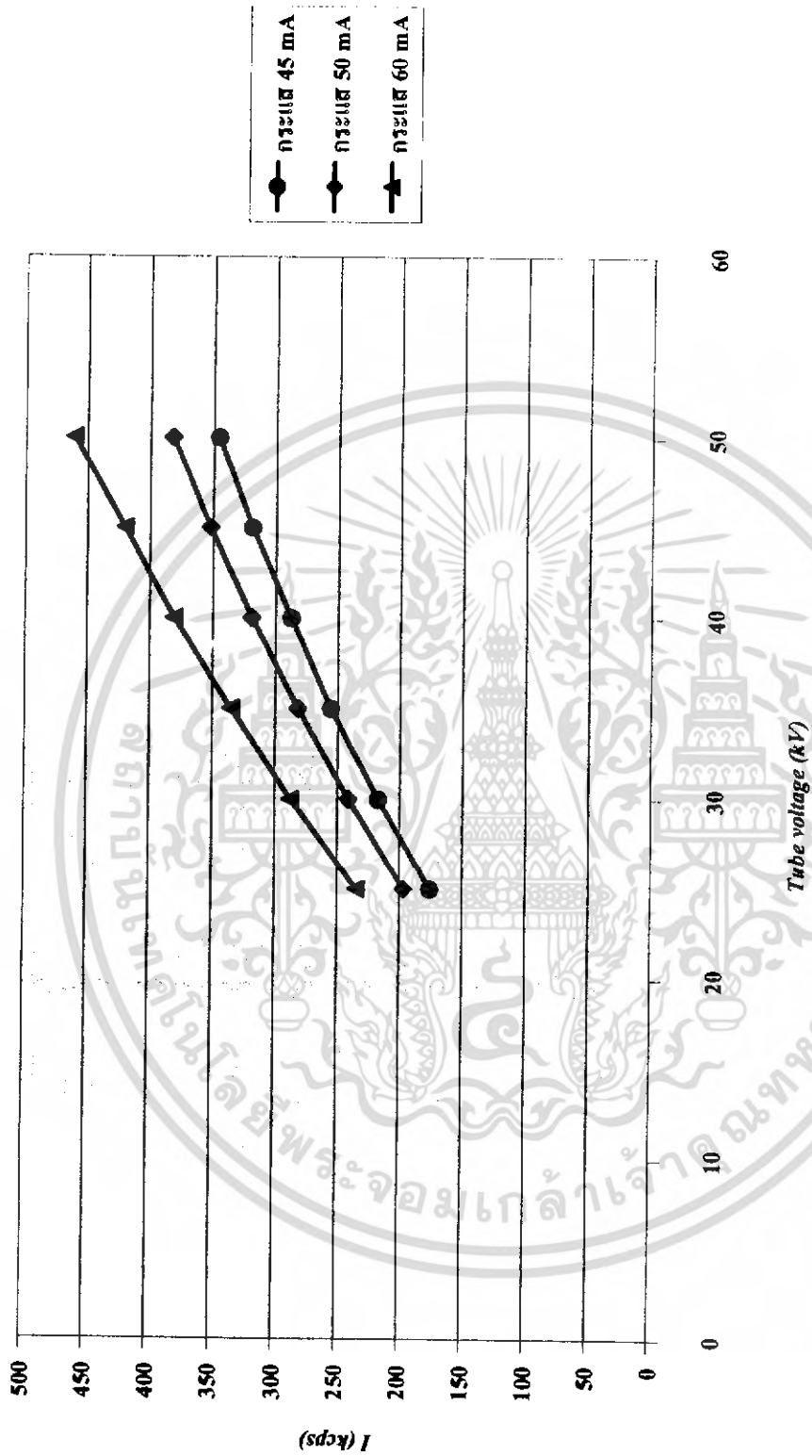
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (kcp/s) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของหลอด MG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



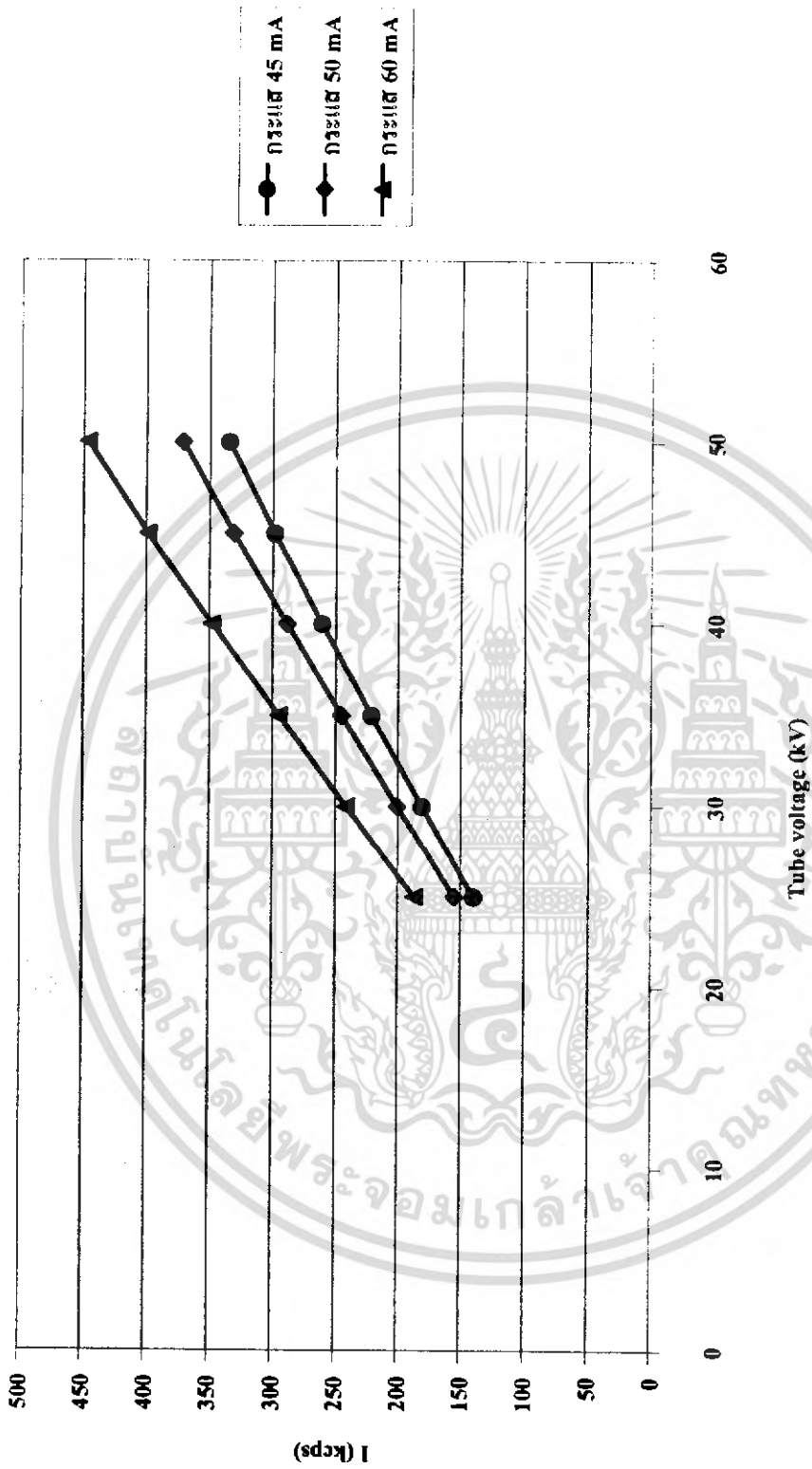
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (kcp/s) กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของหลอด Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



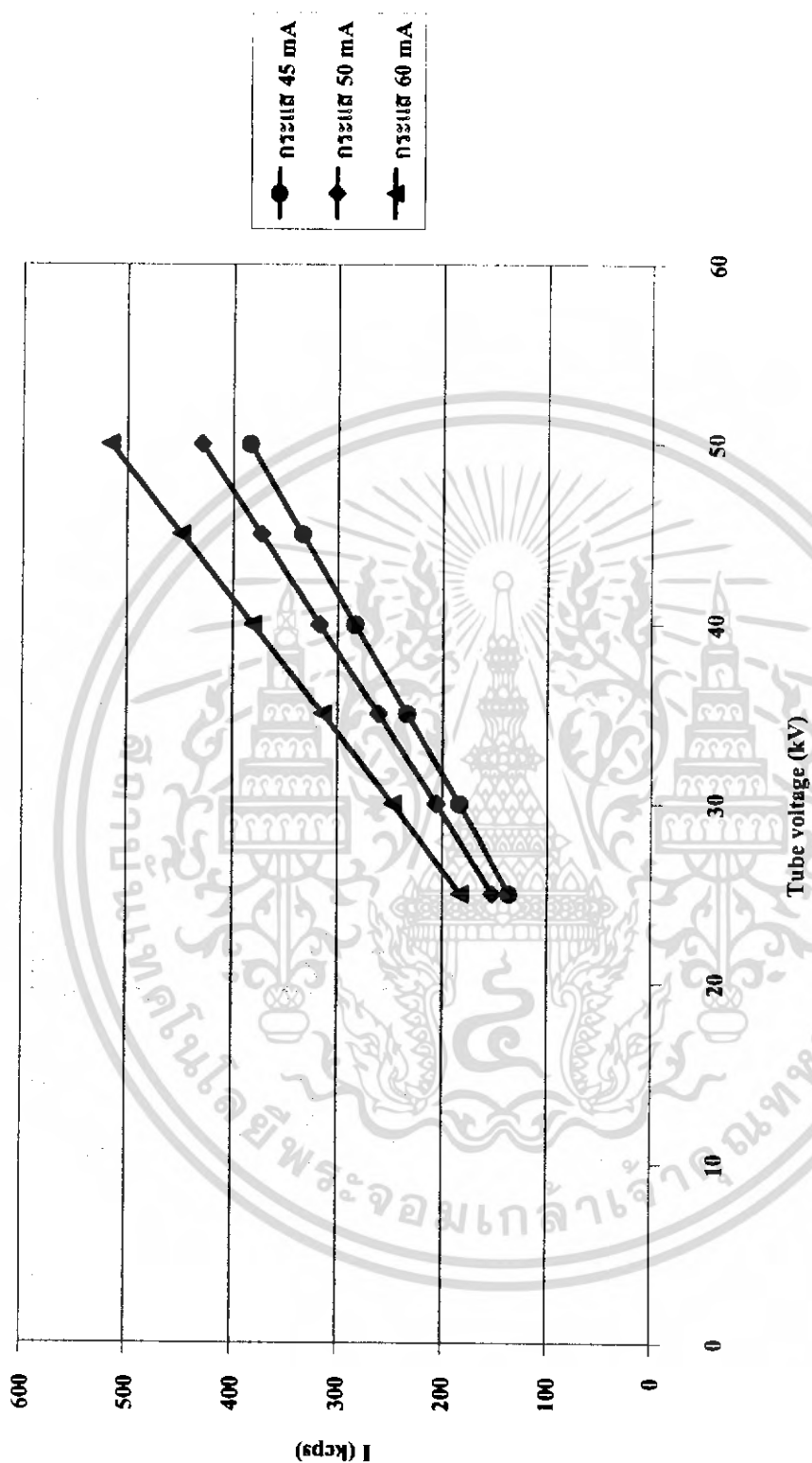
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (kcp) กับศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Ca

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



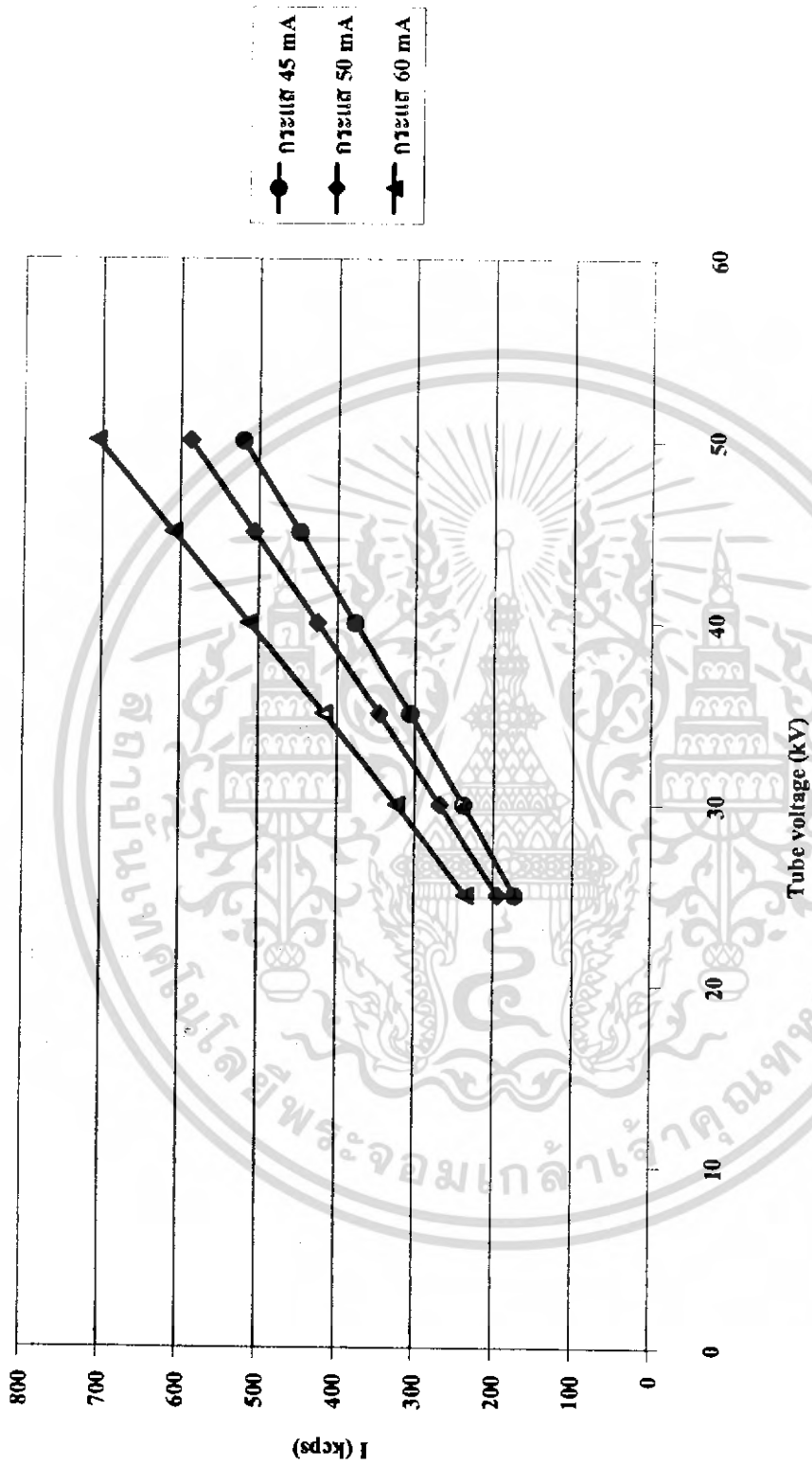
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (kcp) กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (kcps) กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของชุด Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (kcp) กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของหลอด Fe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3) แสดงการคำนวณหาค่า Sensitivity และ Relative sensitivity
ในที่นี่จะขอยกตัวอย่างที่เป็นธาตุแมกนีเซียม (Mg) ที่กระแส 45 mA

kV	Intensities (kcps) ของธาตุ Mg
25	102.397
30	123.037
35	139.549
40	154.350
45	166.281
50	173.701

การคำนวณหาค่า Sensitivity สามารถหาได้โดยใช้ค่านิยามที่กล่าวว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาร์ทูดต่ออินพุท” ซึ่งก็คือการหาค่าความชันนั่นเอง
จากตารางข้างต้นเราจะทำการหาค่าความชันของจุดที่ 1 (Sensitivity ที่จุดที่ 1) โดย

$$\begin{aligned} \text{Sensitivity} &= \frac{123.037 \text{kcps} - 102.397 \text{kcps}}{30 \text{kV} - 25 \text{kV}} \\ &= \frac{20.640 \text{kcps}}{5 \text{kV}} \\ &= 4.128 \text{cps} / \text{V} \end{aligned}$$

และ Sensitivity ที่จุดที่ 2, 3, 4 และ 5 ก็ทำการคำนวณเช่นเดียวกัน ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 3.302, 2.960, 2.386 และ 1.484 ตามลำดับ

ส่วนการคำนวณค่า Relative Sensitivity ที่จุดที่ 1 หาได้โดยใช้ค่าของ Sensitivity ที่จุดที่ 3 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ตรงกลางหารกับ Sensitivity ที่จุดที่ 1 จะได้

$$\begin{aligned} \text{Relative Sensitivity} &= \frac{4.128 \text{cps} / \text{V}}{2.960 \text{cps} / \text{V}} \\ &= 1.395 \end{aligned}$$

และ Relative Sensitivity ที่จุดที่ 2, 3, 4 และ 5 ก็ทำการคำนวณเช่นเดียวกัน ซึ่งจะมีค่าเป็น 1.116, 1.000, 0.806 และ 0.501 ตามลำดับ

ส่วนค่า Sensitivity และ Relative Sensitivity ของธาตุ Si, Ca, V, Mn และ Fe ก็ทำการคำนวณดังตัวอย่างข้างต้น และที่กระแส 50 mA และ 60 mA ก็ทำการคำนวณเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6, ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของ *Sensitivity* และ *Relative Sensitivity* ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยน
ศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 45 mA

ธาตุ	H.V. = 30 kV		H.V. = 35 kV		H.V. = 40 kV		H.V. = 45 kV		H.V. = 50 kV	
	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.
Mg	4.128	1.395	3.302	1.116	2.960	1.000	2.386	0.806	1.484	0.501
Si	2.558	1.405	2.081	1.143	1.821	1.000	1.475	0.810	1.266	0.695
Ca	8.251	1.290	7.605	1.189	6.396	1.000	6.317	0.988	5.289	0.827
V	8.202	1.041	8.039	1.021	7.876	1.000	7.542	0.958	7.252	0.921
Mn	9.511	0.957	9.926	0.998	9.943	1.000	10.126	1.018	9.972	1.003
Fe	13.047	0.919	13.611	0.959	14.193	1.000	14.290	1.007	14.363	1.012

หมายเหตุ : เมื่อ H.V. คือ ศักดาไฟฟ้าสูง มีหน่วยเป็น kV

S คือ *Sensitivity* มีหน่วยเป็น cps/V

R.S. คือ *Relative Sensitivity* ไม่มีหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของ Sensitivity และ Relative Sensitivity ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยน
ศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 50 mA

ธาตุ	H.V. = 30 kV		H.V. = 35 kV		H.V. = 40 kV		H.V. = 45 kV		H.V. = 50 kV	
	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.
Mg	4.402	1.532	3.668	1.276	2.874	1.000	2.377	0.827	1.457	0.507
Si	2.831	1.354	2.373	1.135	2.090	1.000	1.626	0.778	1.207	0.578
Ca	8.84	1.184	8.116	1.087	7.465	1.000	6.592	0.883	6.045	0.81
V	9.084	1.052	8.928	1.034	8.634	1.000	8.486	0.983	8.019	0.929
Mn	10.677	0.950	10.985	0.977	11.238	1.000	11.171	0.994	11.284	1.004
Fe	14.731	0.929	15.464	0.976	15.849	1.000	16.186	1.021	16.263	1.026

หมายเหตุ : เมื่อ H.V. คือ ศักดาไฟฟ้าสูง มีหน่วยเป็น kV

S คือ Sensitivity มีหน่วยเป็น cps/V

R.S. คือ Relative Sensitivity ไม่มีหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของ Sensitivity และ Relative Sensitivity ของแต่ละธาตุ โดยการปรับเปลี่ยน
ศักดาไฟฟ้าสูง (kV) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 60 mA

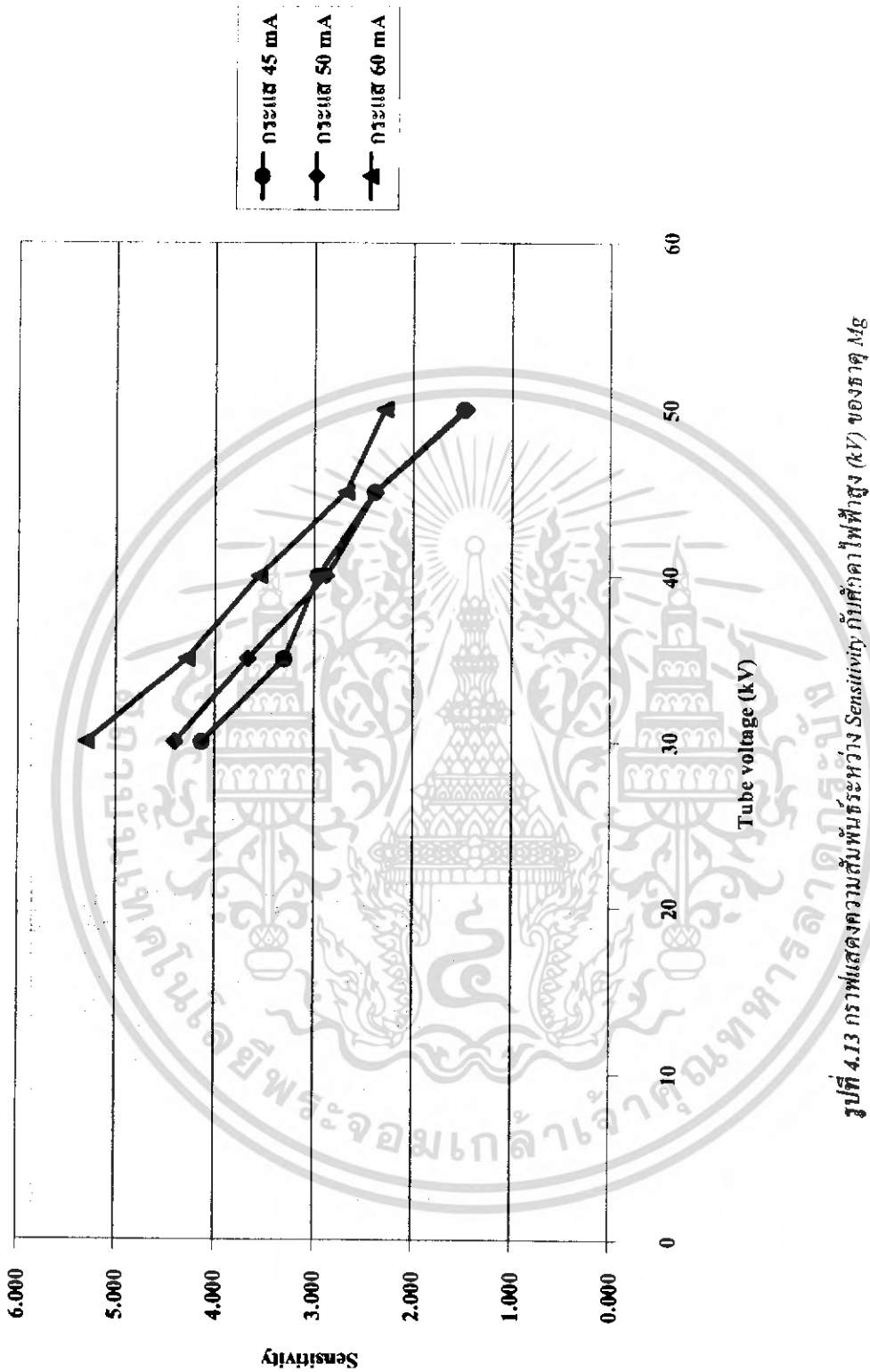
ธาตุ	H.V. = 30 kV		H.V. = 35 kV		H.V. = 40 kV		H.V. = 45 kV		H.V. = 50 kV	
	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.	S	R.S.
Mg	5.295	1.488	4.282	1.204	3.557	1.000	2.677	0.753	2.284	0.642
Si	3.349	1.370	2.878	1.177	2.445	1.000	2.019	0.826	1.541	0.631
Ca	10.584	1.164	9.536	1.049	9.094	1.000	7.910	0.870	8.130	0.894
V	10.912	1.033	10.669	1.010	10.561	1.000	10.249	0.970	9.540	0.903
Mn	12.857	0.957	13.272	0.988	13.439	1.000	13.559	1.009	13.51	1.005
Fe	17.699	0.924	18.537	0.968	19.151	1.000	19.284	1.007	19.551	1.021

หมายเหตุ : เมื่อ H.V. คือ ศักดาไฟฟ้าสูง มีหน่วยเป็น kV

S คือ Sensitivity มีหน่วยเป็น cps/V

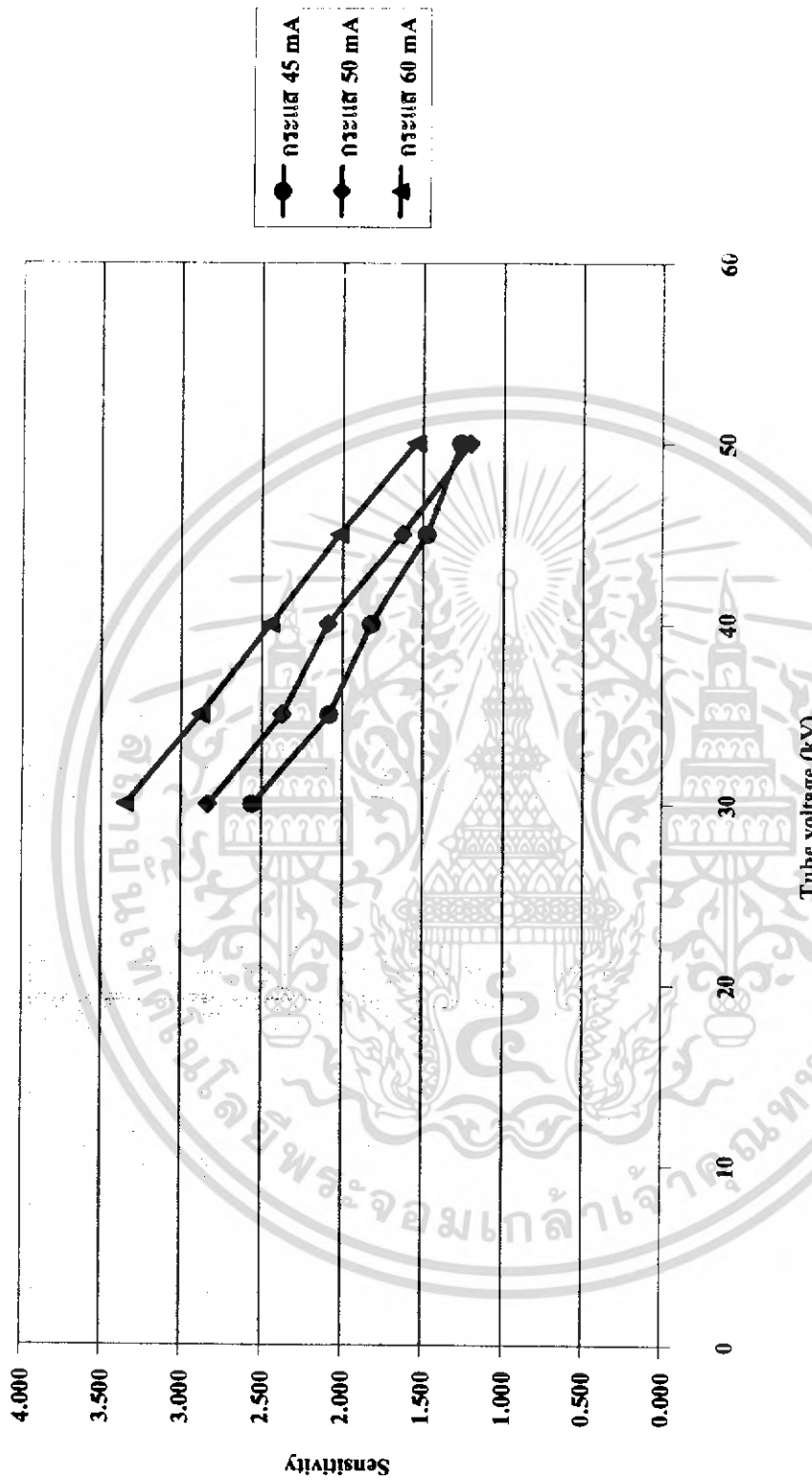
R.S. คือ Relative Sensitivity ไม่มีหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



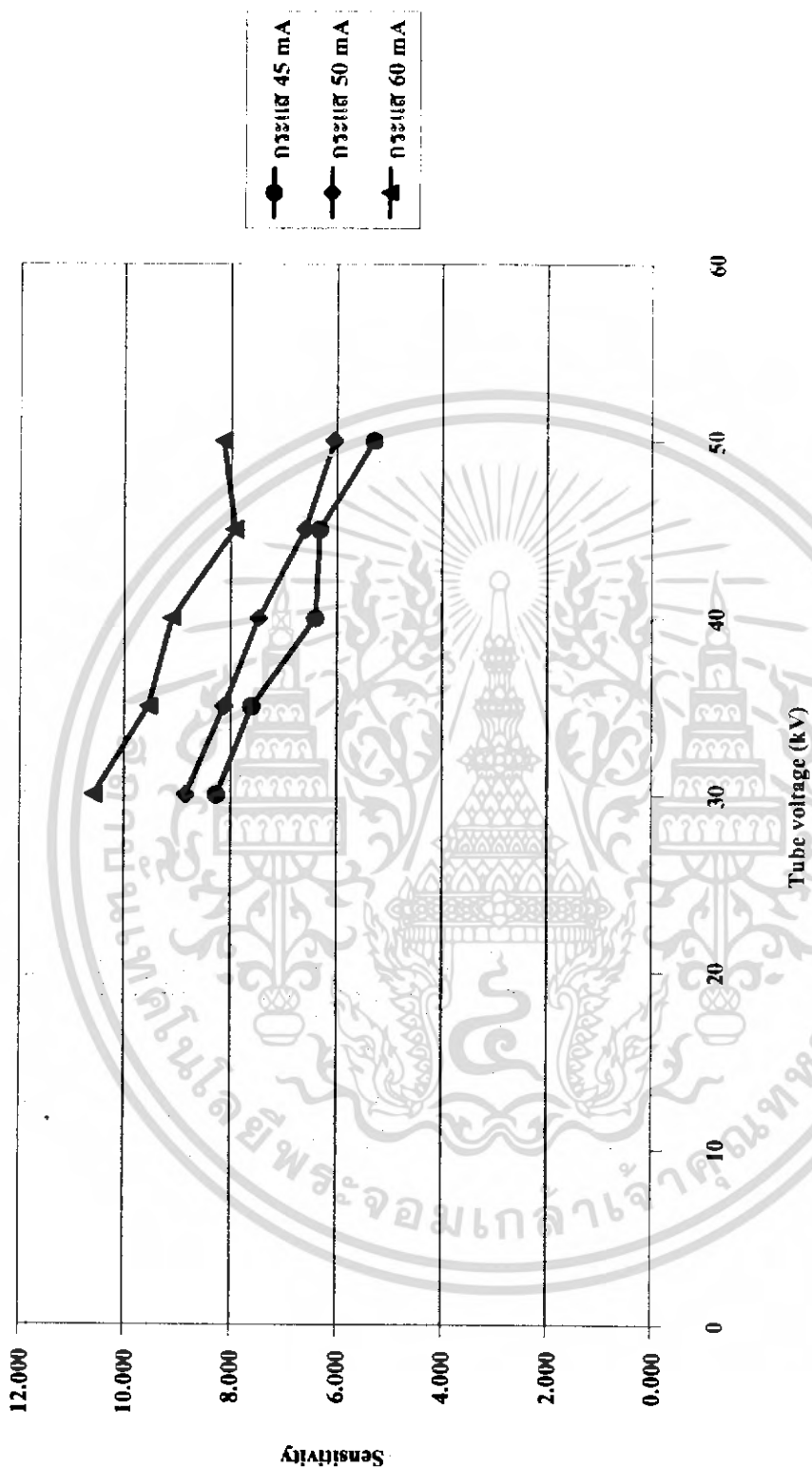
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของหลอด Mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



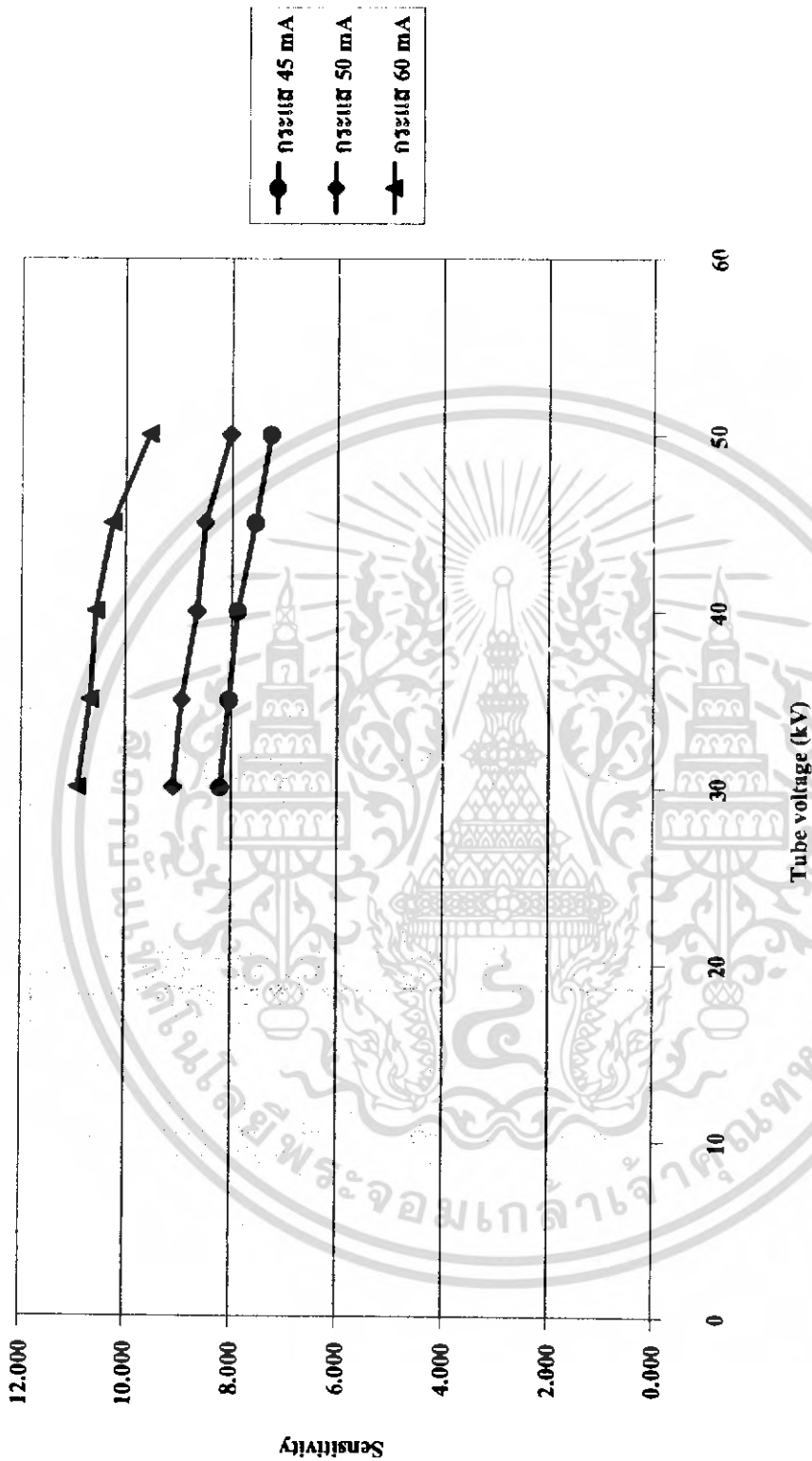
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของหลอด Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



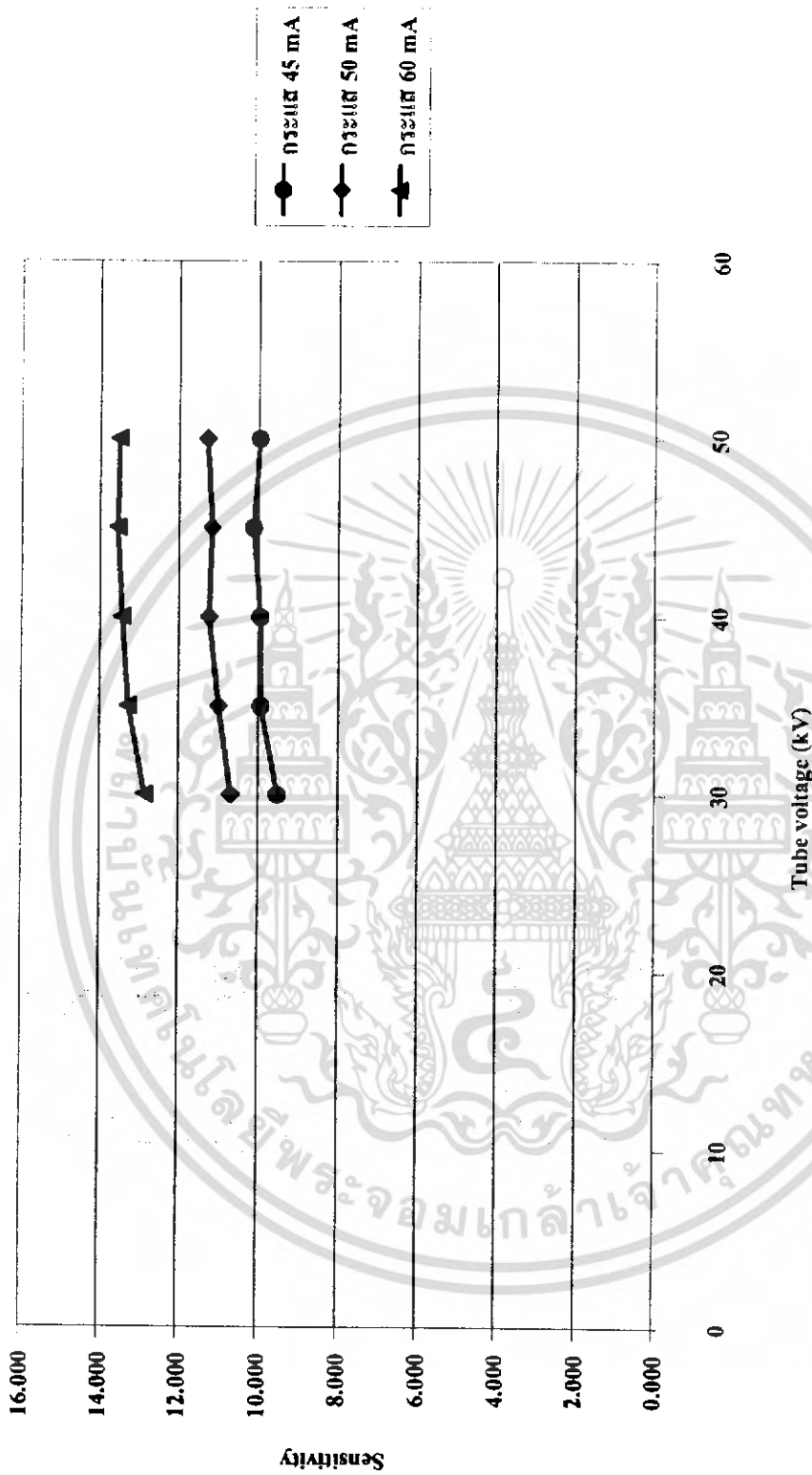
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับค่าไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Ca

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



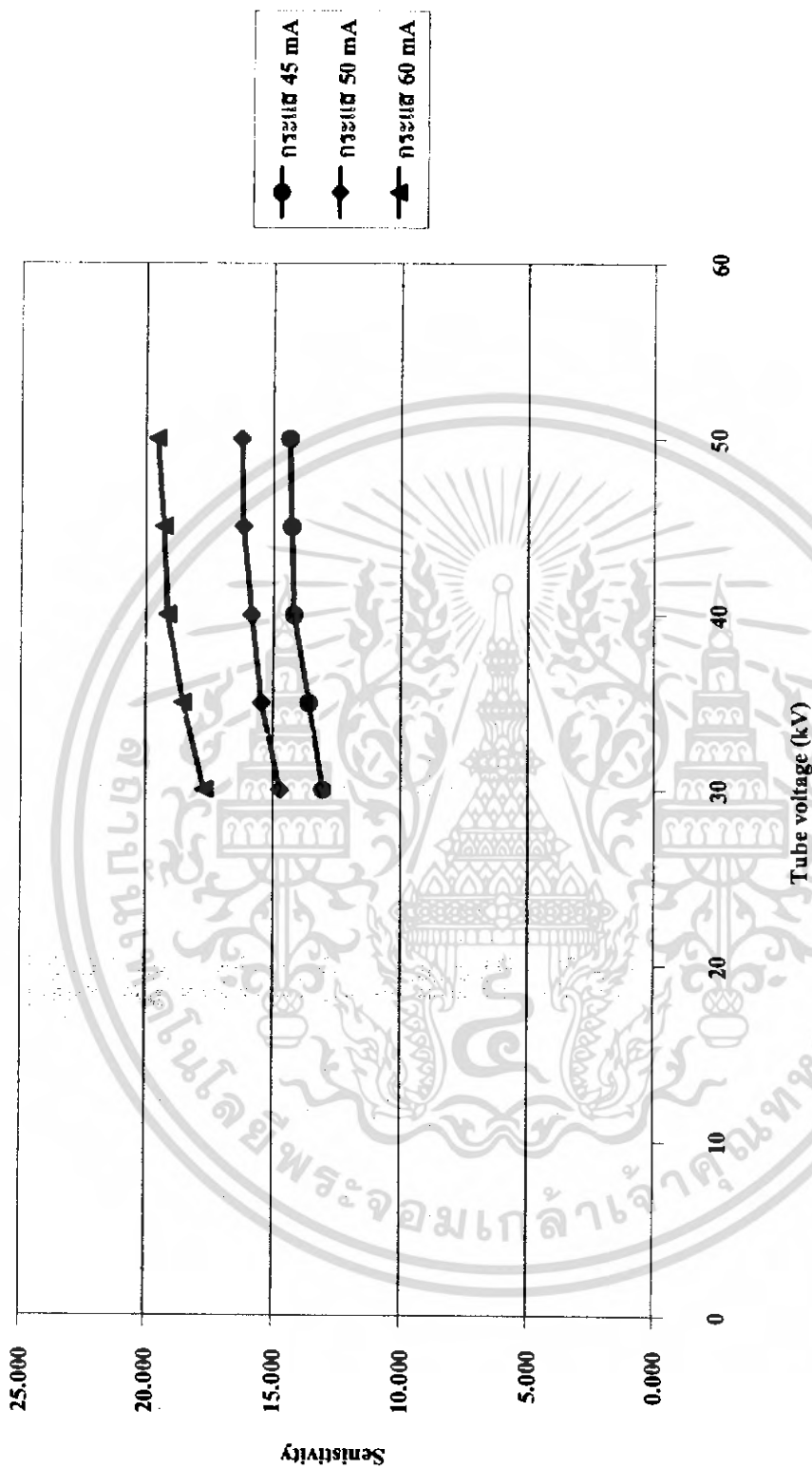
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับกักตไฟฟ้าสูง (kV) ของชุด V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



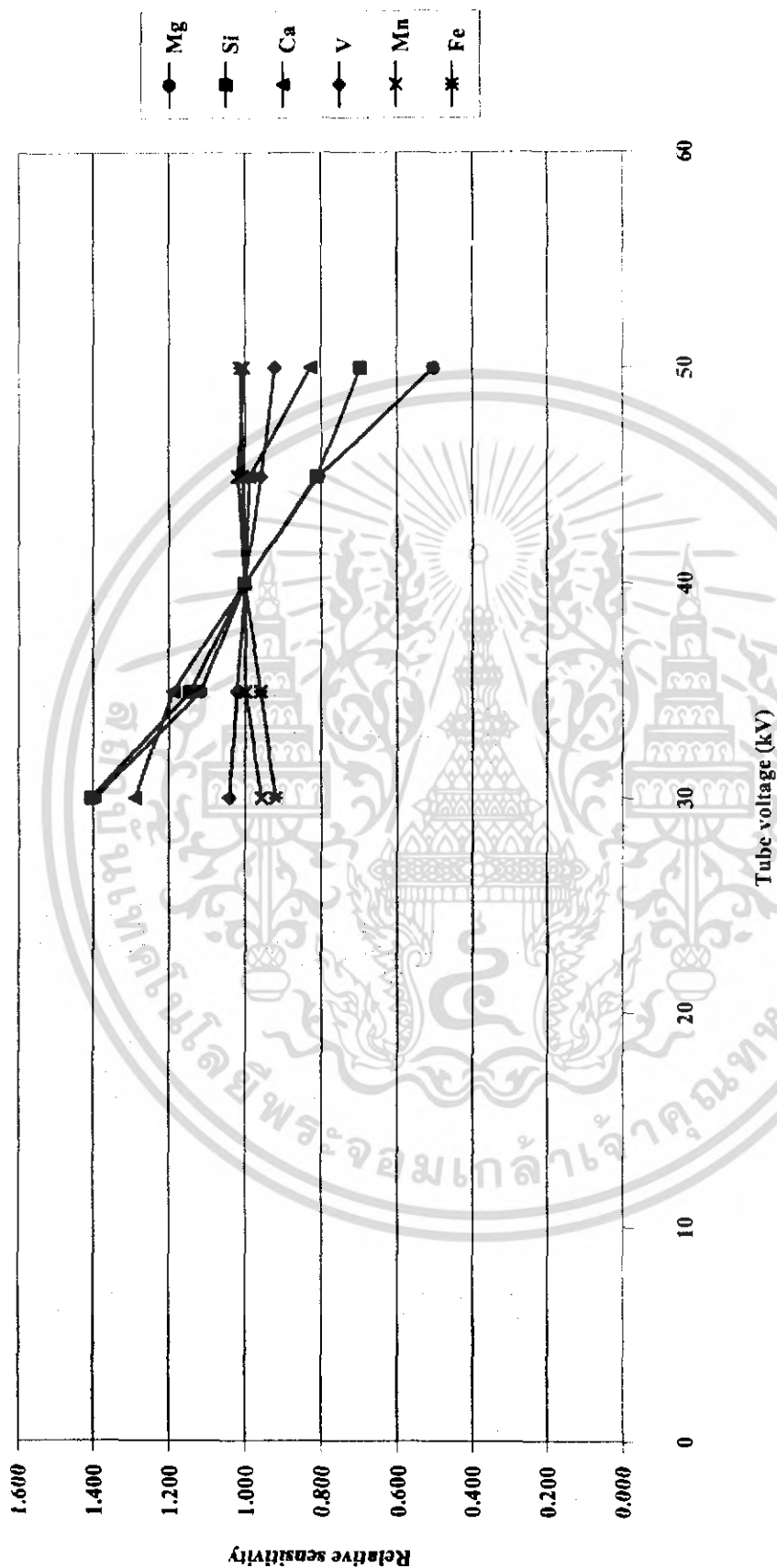
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของหลอด Mn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



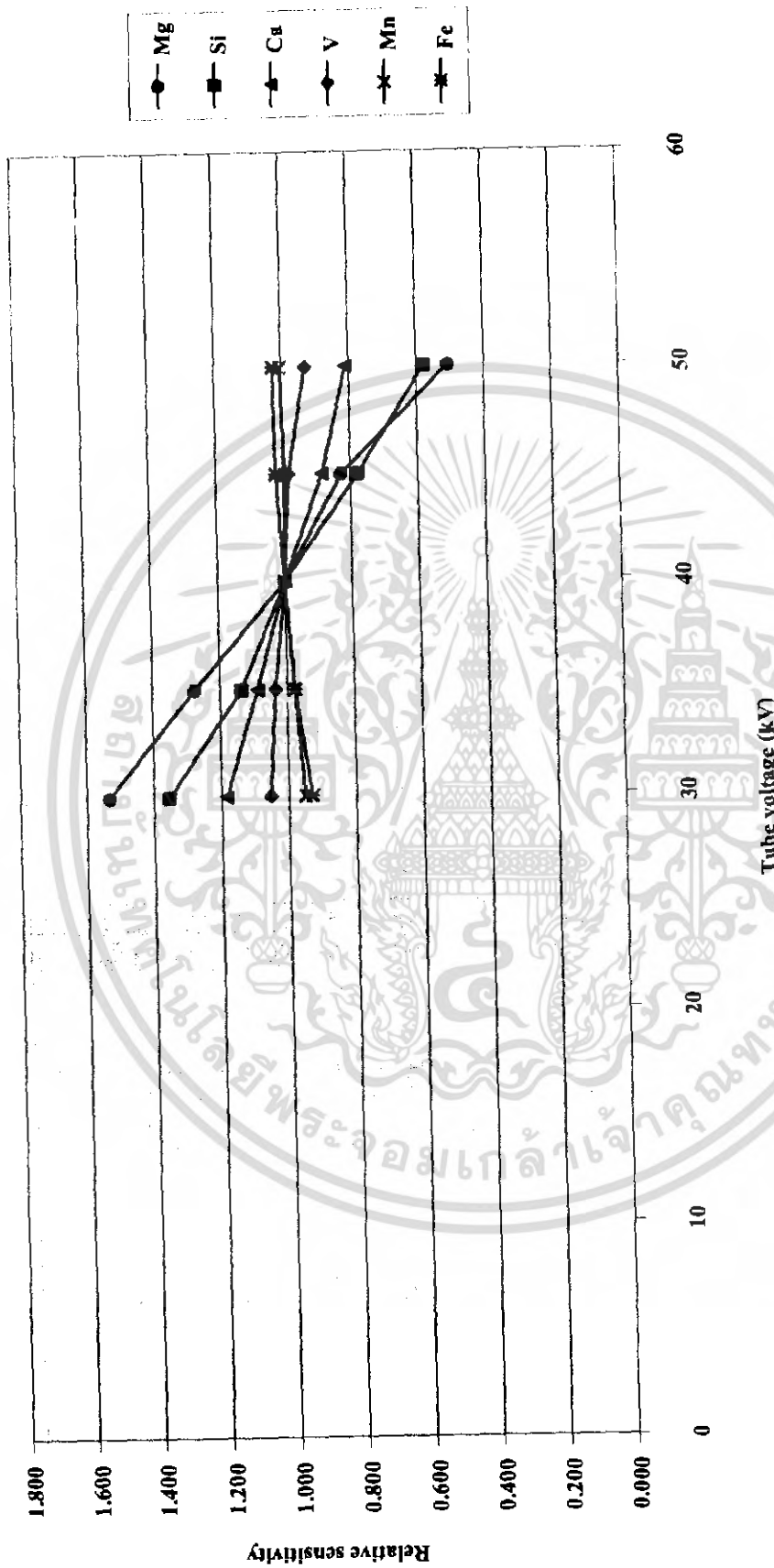
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sensitivity กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ของธาตุ Fe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



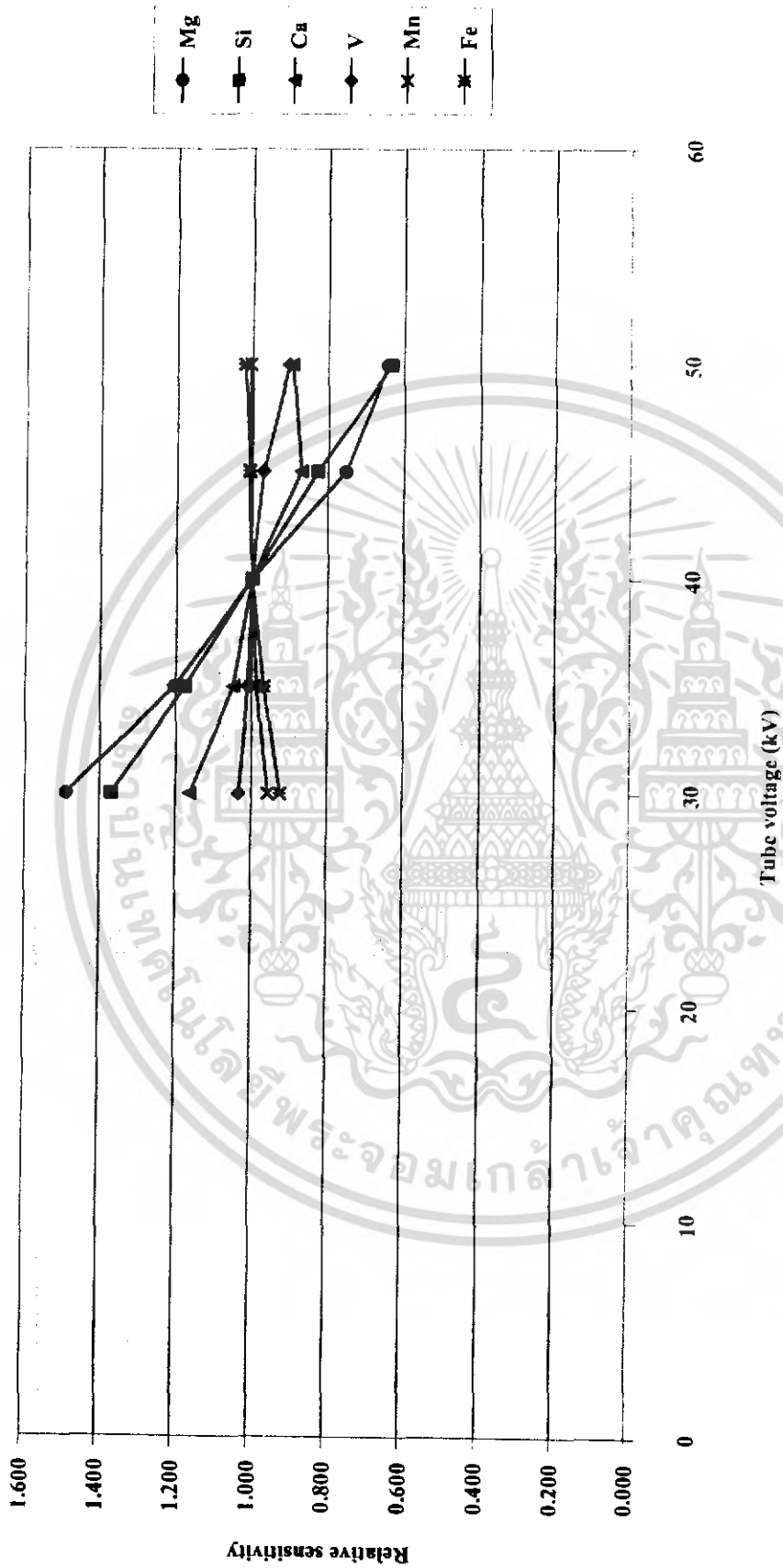
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ที่กระแส 45 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity) กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ที่กระแส 50 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับศักย์ไฟฟ้าสูง (kV) ที่กระแส 60 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

(Conclusion and suggestion)

5.1 สรุปผลการทดลองจากการวัดและวิเคราะห์

1) จากการวิเคราะห์โดยวิธีการทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบโดยใช้สารมาตรฐานที่มากับระบบ พบว่า ระบบการทำงานของเครื่องมีความแม่นยำสูง (accuracy)

2) ผลการทดสอบวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณของสารตัวอย่างมาตรฐานชนิดผงเมื่อทำการวัดด้วยวิธีการปกติ จะพบว่า ค่า Concentration (%) ของธาตุแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียง 50% ซึ่งเป็นค่าที่ได้กำหนดไว้ตอนที่ทำการเตรียมตัวอย่าง โดยจะที่ธาตุอยู่ 2 ตัวเท่านั้นที่มีค่าเท่ากับ 50% ซึ่งก็คือ Mn และ Fe และธาตุอีก 4 ตัวที่เหลือ ซึ่งก็คือ Mg, Si, Ca และ V จะมีค่าเท่ากับ 48.326%, 47.673%, 49.698% และ 49.624% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่อง WDXRFs นี้ยังคงมีความแม่นยำในการวัดสูง

3) ผลการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ของแต่ละธาตุในเชิงคุณภาพ โดยการปรับเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูง (kV) ดังกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 4.7-4.12

- เมื่อให้กระแสที่เท่ากับ 45 mA จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าสูงให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับที่กระแส 50 mA และ 60 mA เมื่อทำการเพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองนี้จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.11)

- เมื่อเปรียบเทียบผลของการเพิ่มกระแสจะพบว่าที่ค่าศักดาไฟฟ้าสูงแต่ละค่าของธาตุแต่ละตัว ความเข้มของรังสีเอกซ์ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับการเพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าสูง ซึ่งผลการทดลองนี้ก็จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.11) ด้วยเช่นกัน

4) จากผลของความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้ เมื่อนำไปคำนวณหาค่า Sensitivity จะพบว่าธาตุ Mg, Si, Ca และ V เมื่อทำการเพิ่มศักดาไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ Sensitivity ลดลง ส่วนธาตุ Mn และ Fe นั้นกลับตรงกันข้าม คือเมื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้าสูงขึ้น Sensitivity กลับเพิ่มขึ้น ดังกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 4.13-4.18

5) การพิจารณาเลือกศักดาไฟฟ้าสูงที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ธาตุ

- จากผลการทดลอง ค่าที่เหมาะสมที่สุดก็คือค่าที่อยู่ตรงจุดกึ่งกลางซึ่งก็คือ 40 kV เนื่องจากเหตุผลที่ว่า “ศักดาไฟฟ้าสูงที่ใช้จะต้องมีค่าก่อนข้างสูงกว่าพลังงาน absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์” และค่าศักดาไฟฟ้าสูงที่ 40 kV ถือว่าไม่สูงจนเกินไปและไม่ต่ำจนเกินไป แต่ในการวัดอย่างแท้จริงนั้นจะขึ้นอยู่กับการปรับศักดาไฟฟ้าสูงและการปรับกระแส โดยกระแสที่เหมาะสมที่จะใช้เท่ากับ 45 mA ซึ่งจะมีผลต่ออายุการใช้งานของหลอดรังสีเอ็กซ์ได้ยาวนานยิ่งขึ้น ดังกราฟที่ 4.19-4.21

5.2 วิจัยรณผลการทดลอง

จากผลการทดสอบวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณของสารตัวอย่างมาตรฐานชนิดผงเมื่อทำการวัดด้วยวิธีการปกตินั้น ควรจะวัดได้ค่า Concentration เท่ากับ 50% ในธาตุทุกตัวที่เตรียม แต่ที่ผลเป็นเช่นนี้อาจจะเกิดจากการเตรียมเอง เช่น การล้างถ้วยบดตัวอย่างไม่สะอาด, ในสารตัวอย่างที่ใช้เตรียม อาจจะมีการปนเปื้อนของสารอื่น หรืออาจจะเกิดจากตัวผู้ทำการเตรียมสารเอง เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) เพื่อที่จะให้เครื่อง WDXRFS สามารถที่จะทำงานได้โดยไม่มีอุปสรรค ควรจะมีการซ่อมบำรุงอยู่เป็นประจำ
- 2) เพื่อที่จะให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำและถูกต้อง ควรจะมีการปรับเทียบมาตรฐานอยู่เสมอ
- 3) จากการศึกษาาระบบการวัดนี้ พบว่ายังมีแนวทางการศึกษาการเลือกใช้ผลึกให้เหมาะสมกับการวัดและการวิเคราะห์ธาตุ โดยทำการปฏิบัติควบคู่ไปกับการปรับศักดาไฟฟ้าสูง

บรรณานุกรม

ผศ.สาหรัย ฤณีพงษ์, 2538, **Sequential X-Ray Fluorescence Spectrometer**. ชลบุรี:

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์และผศ.กณิดา ตั้งคณานุรักษ์, 2547, **สเปกโทรสโกปีด้านวิเคราะห์,**

พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุคมกิจเคชา และคณะ, 2453, **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการ**

งานเบื้องต้น, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2547, **เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน**, กรุงเทพฯ,

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แม่น อมรศรีและอมร เพชรสม, 2535, **Principle and Techniques of Instrumental Analysis,**

กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์ชวนพิมพ์

Ron Jenkins, 1988, **X-ray fluorescence spectrometry**, Canada, Wiki

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1

Wavelengths of the x-ray absorption edges of the chemical elements

Element	K _I	Wavelength (\AA)											
		L _I	L _{II}	L _{III}	M _I	M _{II}	M _{III}	M _{IV}	M _V				
3-Li	226.950	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-Be	107.200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5-B	65.604	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6-C	43.887	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7-N	31.220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8-O	23.233	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9-F	17.897	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10-Ne	14.170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11-Na	11.475	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12-Mg	9.512	197.300	—	220.534	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13-Al	7.951	142.500	163.022	163.942	—	—	—	—	—	—	—	—	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1 (continued)

	Wavelength (\AA)									
14-Si	6.745	105.000	122.028	122.761	—	—	—	—	—	—
15-P	5.787	81.000	95.070	95.801	—	—	—	—	—	—
16-S	5.018	64.100	75.314	75.868	—	—	—	—	—	—
17-Cl	4.397	52.100	60.739	61.222	591.900	—	—	—	—	—
18-Ar	3.871	43.200	50.025	50.446	476.587	—	—	—	—	—
19-K	3.436	36.400	41.754	42.179	373.456	—	—	—	—	—
20-Ca	3.070	30.700	35.797	36.173	309.146	—	—	—	—	—
21-Sc	2.757	26.800	30.943	31.296	264.440	—	—	—	—	—
22-Ti	2.497	23.400	26.936	27.290	228.816	—	—	—	—	—
23-V	2.269	19.803	23.877	24.229	201.484	—	—	—	—	—
24-Cr	2.070	17.840	21.294	21.637	171.626	—	—	—	—	—
25-Mn	1.896	16.138	19.086	19.417	150.739	—	—	—	—	—
26-Fe	1.743	14.650	17.188	17.504	132.991	—	—	—	—	—
27-Co	1.608	13.333	15.545	15.843	118.175	—	—	—	—	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1 (continued)

	Wavelength (\AA)									
28-Ni	1.488	12.201	14.104	14.387	103.062	—	—	—	—	—
29-Cu	1.380	11.172	12.841	13.113	91.685	137.152	—	—	793.498	—
30-Zn	1.283	10.262	11.725	11.987	81.898	116.000	—	—	546.224	—
31-Ga	1.196	9.416	10.728	10.930	73.146	98.670	107.500	405	—	—
32-Ge	1.116	8.692	9.84	10.089	65.116	89.857	93.488	299.437	—	—
33-As	1.045	8.067	9.056	9.298	58.581	79.123	82.205	238.357	—	—
34-Se	0.980	7.456	8.347	8.584	52.835	69.999	72.578	187.662	—	—
35-Br	0.920	6.920	7.721	7.952	46.679	62.341	64.705	150.218	—	—
36-Kr	0.866	6.444	7.158	7.377	42.071	54.882	57.020	129.756	—	—
37-Rb	0.816	5.995	6.642	6.861	37.696	49.562	51.527	108.466	109.986	—
38-Sr	0.770	5.591	6.173	6.387	34.553	44.124	45.866	90.985	92.251	—
39-Y	0.728	5.226	5.752	5.961	31.453	39.733	41.308	77.850	78.973	—
40-Zr	0.689	4.889	5.378	5.656	28.474	35.564	36.972	66.136	67.184	—
41-Nb	0.653	4.595	5.031	5.230	26.482	32.708	34.155	59.815	60.608	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1 (continued)

	Wavelength (\AA)													
42-Mo	0.620	4.323	4.716	4.913	24.413	30.083	31.401	53.277	54.201					
43-Tc	0.589	4.068	4.431	4.623	22.500	27.578	28.853	47.507	48.140					
44-Ru	0.560	3.837	4.169	4.358	20.945	25.461	26.510	42.663	43.038					
45-Rh	0.534	3.623	3.928	4.113	19.453	23.341	24.492	38.561	39.286					
46-Pd	0.509	3.425	3.706	3.889	18.109	23.603	22.699	34.840	35.494					
47-Ag	0.486	3.243	3.501	3.680	16.877	20.011	21.061	31.793	32.299					
48-Cd	0.464	3.073	3.312	3.488	15.873	18.602	19.614	29.269	29.507					
49-In	0.444	2.916	3.137	3.311	14.764	17.314	18.285	26.717	27.165					
50-Sn	0.425	2.648	2.975	3.146	13.856	16.050	17.200	24.500	24.900					
51-Sb	0.407	2.634	2.824	2.994	13.02	15.072	16.014	22.699	23.114					
52-Te	0.390	2.508	2.685	2.853	12.274	14.185	15.079	21.124	21.528					
53-I	0.374	2.390	2.555	2.721	11.575	13.344	14.193	19.670	20.050					
54-Xe	0.358	2.277	2.434	2.597	10.800	12.532	13.381	18.300	18.716					
55-Cs	0.345	2.175	2.321	2.482	10.338	11.824	12.638	17.158	17.607					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1 (continued)

	Wavelength (\AA)													
56-Ba	0.331	2.078	2.214	2.374	9.787	11.156	11.957	16.087	16.513					
57-La	0.318	1.988	2.115	2.273	9.316	10.560	11.343	15.060	15.470					
58-Ce	0.306	1.902	2.022	2.178	8.844	9.997	10.758	14.242	14.560					
59-Pr	0.295	1.822	1.934	2.089	8.394	9.498	10.242	13.429	13.792					
60-Nd	0.284	1.747	1.852	2.007	8.026	9.033	9.787	12.789	13.092					
61-Pm	0.274	1.675	1.775	1.928	7.551	8.610	9.342	12.160	12.461					
62-Sm	0.265	1.608	1.703	1.855	7.338	8.199	8.926	11.547	11.828					
63-Eu	0.256	1.545	1.634	1.785	7.013	7.827	8.548	10.975	11.257					
64-Gd	0.247	1.485	1.569	1.719	6.703	7.496	8.200	10.457	10.747					
65-Tb	0.238	1.428	1.507	1.656	6.398	7.135	7.829	9.958	10.233					
66-Dy	0.230	1.375	1.449	1.5997	6.139	6.865	7.547	9.506	9.791					
67-Ho	0.223	1.323	1.393	1.540	5.892	6.571	7.225	9.079	9.342					
68-Er	0.216	1.274	1.341	1.487	5.675	6.283	6.950	8.664	8.950					
69-Tm	0.209	1.227	1.391	1.436	5.410	5.985	6.661	8.275	8.541					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1 (continued)

	Wavelength (\AA)													
70-Yb	0.202	1.183	1.243	1.387	5.192	5.724	6.361	7.912	8.164					
71-Lu	0.196	1.140	1.198	1.341	4.981	5.480	6.119	7.573	7.813					
72-Hf	0.190	1.100	1.155	1.297	4.765	5.238	5.876	7.216	7.450					
73-Ta	0.184	1.062	1.114	1.255	4.594	5.041	5.675	6.951	7.183					
74-W	0.178	1.025	1.074	1.215	4.407	4.831	5.453	6.649	6.875					
75-Rc	0.173	0.990	1.037	1.177	4.237	4.632	5.250	6.371	6.597					
76-Os	0.168	0.956	1.001	1.14	4.067	4.440	5.052	6.097	6.313					
77-Ir	0.163	0.924	0.966	1.105	3.909	4.262	4.858	5.848	6.076					
78-Pt	0.158	0.893	0.933	1.071	3.761	4.082	4.679	5.622	5.820					
79-Au	0.153	0.863	0.902	1.039	3.669	3.936	4.518	5.374	5.584					
80-Hg	0.149	0.835	0.872	1.008	3.476	3.771	4.352	5.182	5.409					
81-Tl	0.145	0.807	0.843	0.979	3.348	3.626	4.192	4.992	5.187					
82-Pb	0.141	0.781	0.815	0.95	3.217	3.484	4.035	4.792	4.989					
83-Bi	0.137	0.756	0.788	0.923	3.097	3.342	3.890	4.601	4.793					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 1 (continued)

	Wavelength (\AA)									
84-Po	0.133	0.731	0.762	0.897	2.989	3.209	3.742	4.430	4.624	
85-At	0.129	0.708	0.738	0.872	2.850	3.092	3.616	4.267	4.458	
86-Rn	0.125	0.686	0.715	0.848	2.740	2.982	3.506	4.112	4.301	
87-Fr	0.122	0.665	0.692	0.825	2.650	2.866	3.392	3.966	4.151	
88-Ra	0.119	0.644	0.671	0.803	2.576	2.769	3.280	3.829	4.008	
89-Ac	0.116	0.625	0.650	0.782	2.470	2.673	3.185	3.698	3.871	
90-Th	0.113	0.606	0.629	0.761	2.394	2.577	3.076	3.568	3.742	
91-Pa	0.110	0.587	0.610	0.741	2.314	2.483	2.977	3.446	3.628	
92-U	0.108	0.570	0.592	0.722	2.240	2.394	2.887	3.339	6.509	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 2

X-ray properties

Element		Edge energies (keV)		Edge jumps		Fluorescence yield	
Symbol	Mg	K	1.30499995	K	11.5671673	K	0.02999999993
Z	12	L1	0.063000001	L1	1.08463252	L1	2.90000007E-05
Atomic Weight	24.3199997	L2	0.0496000014	L2	2.35597992	L2	0
Density	1.74000001	L3	0.0491999984	L3	0	L3	1.25399995
		M	0				
		K - alpha	1.25399995				
		K - Beta	1.29700005				
		L - Alpha	0				
		L - Beta	0				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 2 (continued)

Element		Edge energies (keV)		Edge jumps		Fluorescence yield	
Symbol	Si	K	1.8389999	K	10.426959	K	0.163000003
Z	14	L1	0.118000001	L1	1.12803292	L1	0.000310000003
Atomic Weight	28.0860004	L2	0.0997999981	L2	2.35597992	L2	0.04399999998
Density	2.32999992	L3	0.0992000028	L3	0	L3	3.690999998
		M	0				
		K - alpha	1.74000001				
		K - Beta	1.83200002				
		L - Alpha	0				
		L - Beta	0				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 2 (continued)

Element		Edge energies (keV)		Edge jumps	Fluorescence yield
Symbol	Ca	K	4.03800011	K	0.0500000007
Z	20	L1	0.400000006	L1	2.99999992E-05
Atomic Weight	40.0800018	L2	0.349700004	L2	0
Density	1.54999995	L3	0.346199989	L3	1.74000001
		M	0.0439999998		
		K - alpha	3.69099998		
		K - Beta	4.01200008		
		L - Alpha	0		
		L - Beta	0		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 2 (continued)

Element		Edge energies (keV)		Edge jumps		Fluorescence yield	
Symbol	V	K	5.46500015	K	8.76572227	K	0.243000001
Z	23	L1	0.603999972	L1	1.15541482	L1	0.00057999993
Atomic Weight	50.9420013	L2	0.519800007	L2	2.35597992	L2	0.0670000017
Density	6.11000013	L3	0.512099981	L3	0	L3	4.95200014
		M	0.0670000017				
		K - alpha	4.95200014				
		K - Beta	5.42700005				
		L - Alpha	0				
		L - Beta	0				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 2 (continued)

Element		Edge energies (keV)		Edge jumps	Fluorescence yield
Symbol	Mn	K	6.53999996	K	K
Z	25	L1	0.75400008	L1	L1
Atomic Weight	54.9399986	L2	0.649900019	L2	L2
Density	7.4200008	L3	0.638700008	L3	L3
		M	0.089999989		
		K - alpha	5.89799976		
		K - Beta	6.48999977		
		L - Alpha	0		
		L - Beta	0		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 2 (continued)

Element		Edge energies (keV)		Edge jumps		Fluorescence yield	
Symbol	Fe	K	7.11199999	K	8.0714798	K	6.340000004
Z	26	L1	0.842000008	L1	1.1567719	L1	0.00100000005
Atomic Weight	55.8499985	L2	0.719900012	L2	2.35597992	L2	0.09399999968
Density	7.86000013	L3	0.706799984	L3	0	L3	6.402999988
		M	0.09399999968				
		K - alpha	6.402999988				
		K - Beta	7.05700016				
		L - Alpha	0				
		L - Beta	0				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้