

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเปรียบเทียบความแตกต่างของหัวข้อรังสีสำหรับการเลือกวัด
และวิเคราะห์ธาตุในระบบการเรืองรังสีเอกซ์แบบແຈກແຈງ
ความยาวคลื่น



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

รฟ.

๑๖37911

๒549

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 58673

วันเดือนปี..... 31 ส.ค. 2549

ปีการศึกษา 2547

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

b.....
i.....

COMPARISON DIFFERENT OF DETECTOR FOR
MEASURE AND ANALYZE ELEMENT OF WAVELENGTH
DISPERSIVE X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY



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 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การเปรียบเทียบความแตกต่างของหัววัดรังสีสำหรับการเลือกวัดและ
วิเคราะห์ธาตุในระบบการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น

นักศึกษา นางสาวณัฐินี ภูเอี่ยม

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร-
บัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์	
กรรมการ	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	
กรรมการ	ดร.ปิณฑร ถนอมงาม	
กรรมการที่ปรึกษา	ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	

.....
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเปรียบเทียบความแตกต่างของหัตถ์รังสีสำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์ธาตุในระบบการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น
นักศึกษา	นางสาวณัฐินี ภูเอี่ยม
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2547
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของหัตถ์รังสีชนิดโฟลว์-เคาน์เตอร์(Flow counter;FC) และซินทิลเลชันเคาน์เตอร์(Scintillation counter;SC) ของระบบวัดและวิเคราะห์ธาตุ WDXRF Model SRS3400 AXS ของ Bruker(Sewent) ตามคู่มือการทำงาน หัตถ์รังสีชนิด FC จะวัดในย่าน $0.2\text{keV} < E < 8\text{keV}$ หรือ $2\theta = 4^\circ$ และ 148° (Soft radiation) ส่วนหัตถ์รังสี SC จะวัดในย่าน $E > 4\text{keV}$ หรือ $2\theta \geq 90^\circ$ (Hard radiation) ซึ่งจากการเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการวัดและวิเคราะห์ที่ย่าน $4\text{keV} < E < 8\text{keV}$ โดยทำการวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ด้วยการเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานชนิดผง ซึ่งประกอบด้วยธาตุ K, Ca, Ti, Mn, Fe และ Cu มีน้ำหนักสารชนิดละ 0.2 กรัม จะพบว่าหัตถ์รังสี FC จะวัดอยู่ในย่านพลังงาน $4\text{keV} - 8\text{keV}$ ส่วนหัตถ์รังสี SC จะวัดในย่านพลังงานตั้งแต่ 8keV ขึ้นไป เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์ธาตุอยู่ระหว่าง $4\text{keV} < E < 8\text{keV}$ นั้นควรจะเลือกใช้หัตถ์รังสี FC มากกว่า SC เพราะให้ผลการวัดความเข้มรังสีของฟลักซ์ของแต่ละธาตุได้สูงกว่าหรือให้ประสิทธิภาพในการวัดได้สูงกว่า

Special Project Title Coparision Differrent of Detector for Measure and Analyze
Element of Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence
Spectroscopy

Name Natthinee Pueiam

Department Applied Physics Faculty of Science

Program Applied Physics

Academic Year 2004

Special Project Advisor Asst.Prof.Sarai Kuneepong

ABSTRACT

This project is comparison different of flow counter and scintillation counter detector for measure and analyze element of Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy (WDXRFS), Bruker(Sewent) model SRS3400 AXS. Follow to manual, flow counter detector is used in range $0.2\text{keV} < E < 8\text{keV}$ or $2\theta = 4^\circ$ and 148° (Soft radiation) and scintillation counter detector is used in range $E > 4\text{keV}$ or $2\theta \geq 90^\circ$ (Hard radiation). Comparison different of measure and analyze in range $4\text{keV} < E < 8\text{keV}$ both quantitative and qualitative from standard powder sample that include K, Ca, Ti, Mn, Fe and Cu. Each element has mass 0.2 g. Flow counter detector measures in energy range $4\text{keV}-8\text{keV}$. Scintillation counter detector measures in energy range above 8 keV. When compare element analysis in range $4\text{keV} < E < 8\text{keV}$, should choose flow counter detector because each peak intensity is more high or more efficiency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ที่ช่วยให้คำแนะนำชี้แนวทาง ในการทำงานรวมถึงข้อมูลต่างๆ และแนวทางแก้ไขปัญหาที่พบขณะทดลอง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของโครงการพิเศษนี้ ขอบขอบคุณ อลงกต ตริทอง และพี่ๆ ที่ศูนย์เครื่องมือฯ สจล. ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำการทดลองและช่วยหาข้อมูลของเครื่อง WDXRFS Model SRS3400 AXS เป็นอย่างดี รวมถึงพี่ยะพงษ์ (Analytical Systems Engineer) ที่สอนวิธีการวิเคราะห์แบบเลือกหัววัดรังสีและช่วยแก้ไขปัญหาที่พบจากผลการวิเคราะห์ นอกจากนี้ต้องขอบคุณพี่มานพ และพี่สมบุญ (ศูนย์เครื่องมือฯ จุฬาฯ) ที่ให้สารตัวอย่างมาตรฐานและคำแนะนำ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้เป็นอย่างดี

นางสาวณัฐินี ภูเอี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 บทนำ	4
2.2 หลักการเกิดสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์จากหลอดรังสีเอ็กซ์	6
2.3 คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (Properties of X-Rays)	12
2.4 ระบบเครื่องมือวัดของสเปกโตรมิเตอร์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ แบบการแจกแจงความยาวคลื่น (Instrumentation of Wavelength – Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer ; WDXRFS)	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของระบบ WDXRFS Model SRS 3400 AXS	28
3.2 ศึกษาโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ	34
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวิเคราะห์ของระบบ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพของ สารมาตรฐานตัวอย่างของหัววัดรังสี FC และ SC	42
4.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์ เชิงปริมาณของหัววัดรังสีชนิด FC และ SC และวิธีปกติ	52
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบจากการวัดและวิเคราะห์	100
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	101
5.3 ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงชั้นนิล็กตรอนและเลขควอนตัม	10
ตารางที่ 2.2 แสดงสัญลักษณ์สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์และการเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงาน	12
ตารางที่ 3.1 แสดงตารางธาตุ	26
ตารางที่ 3.2 แสดงวิธีการทดสอบการวัดและวิเคราะห์	39
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS โดยใช้สารมาตรฐาน STG2-Glass Verification Test ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างบริษัท Bruker AXS (ผู้ผลิต) กับสจล. (ผู้ปฏิบัติงาน) ณ. วันที่ 11/1/2000	40
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ ณ. วันที่ 3/02/2548	41
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดความเข้มรังสีของแต่ละธาตุเมื่อเลือกหัววัดรังสี FC และ SC	50
ตารางที่ 4.4 การเตรียมสารมาตรฐาน เมื่อเวลาบดคงที่(t) เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด (P)	52
ตารางที่ 4.5 การเตรียมสารมาตรฐาน เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	53
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.1 เมื่อเวลาบด(t) คงที่ =1.5 นาที แรงดันอัด(P) = 100 kN	55
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.2 เมื่อเวลาบด(t) คงที่ =1.5 นาที แรงดันอัด(P) = 150 kN	57
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.3 เมื่อเวลาบด(t) คงที่ =1.5 นาที แรงดันอัด(P) = 200 kN	59
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.4 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 100 kN เวลาบด(t) =1นาที	64
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.5 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 100 kN เวลาบด(t) =1.5นาที	66
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.6 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 100 kN เวลาบด(t) =2นาที	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.7 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 150 kN เวลาบด(t) =1นาที	70
ตารางที่ 4.13 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.8 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 150 kN เวลาบด(t) =1.5นาที	72
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.9 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 150 kN เวลาบด(t) =2นาที	74
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.10 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 200 kN เวลาบด(t) =1นาที	76
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.11 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 200 kN เวลาบด(t) =1.5นาที	78
ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.12 เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ = 200 kN เวลาบด(t) =2นาที	80

สารบัญญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงช่วงความยาวคลื่นย่านต่างๆ	4
รูปที่ 2.2 แสดงผลความเข้มแสงที่ออกมาจากเป้าโลหะทำด้วยโมลิบดีนัม ของหลอดรังสีเอกซ์ โดยปรับค่าความต่างศักย์ตกคร่อมหลอด เท่ากับ 10, 20 และ 30 kV	7
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว	9
รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว	9
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามฟลูออเรสเซนซ์(Fluorescence yield) กับ เลขอะตอม(Atomic number)	10
รูปที่ 2.6 แสดงเส้นสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะ ลงมาชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า	11
รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาของลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับตัวอย่าง	13
รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านระนาบของอะตอม	14
รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนผ่านผลึก (crystals-Bragg) ของรังสี	15
รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ทั้งพีก (Peak) และแบ็คกราวนด์ (Background)	16
รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของระบบ WDXRFS	17
รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบความสูงของพัลส์(pulse) ของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ อนุกรมชั้น K ของธาตุเงินจากหัววัดรังสี 3 ชนิด	19
รูปที่ 2.13 แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีพร็อพพอชันแนล	20
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแก๊สแอมพลิฟิเคชันเฟคเตอร์ (Gas Amplification - factor) กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแก๊สฟิลล์เทคเตอร์ (Gas filled detectors)	20
รูปที่ 2.15 แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีซินทิลเลชัน	24
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของ WDXRFS model SRS 3400 AXS	27
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์	28
รูปที่ 3.3 การเกิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ(Primary X-ray)	29
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม $\Delta 2\theta$ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึก 2d	31

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 แสดงผลการวัดจาก WDXRFS	32
รูปที่ 3.6 ซ้าย – เป็นตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน ขวา – เป็นตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	37
รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง	38
รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของสารตัวอย่างมาตรฐานด้วยโปรแกรม HS-min-FC	47
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของสารตัวอย่างมาตรฐานด้วยโปรแกรม HS-min-SC	48
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของสารตัวอย่างมาตรฐานด้วยโปรแกรม HS-min-BOTH	47
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุ กับความเข้มรังสีเอกซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการวัดแบบวิธี ปกติของระบบ	51
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการวัดด้วยหัววัดรังสี FC ที่เวลาบดคงที่ t =1.5 นาที เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด (P)	61
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการวัดด้วยหัววัดรังสี SC ที่เวลาบดคงที่ t =1.5 นาที เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด (P)	62
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการวัดด้วยวิธีปกติ (BOTH) ที่เวลาบดคงที่ t =1.5 นาที เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด (P)	63
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.4, 5, 6 ด้วยหัววัดรังสี FC ที่ P =100 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	82
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.4, 5, 6 ด้วยหัววัดรังสี SC ที่ P =100 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	83
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.4, 5, 6 ด้วยวิธีปกติ (BOTH) ที่ P =100 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	84
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9 ด้วยหัววัดรังสี FC ที่ P =150 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	85
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9 ด้วยหัววัดรังสี SC ที่ P =150 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9 ด้วยวิธีปกติ (BOTH) ที่ P =150 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	87
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12 ด้วยหัววัดรังสี FC ที่ P =200 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	88
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12 ด้วยหัววัดรังสี SC ที่ P =200 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	89
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12 ด้วยวิธีปกติ (BOTH) ที่ P =200 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)	90
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการ วัดแบบวิธีปกติของระบบที่ t =1 นาที P =100 kN	91
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการ วัดแบบวิธีปกติของระบบที่ t =1.5 นาที P =100 kN	92
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการ วัดแบบวิธีปกติของระบบที่ t =2 นาที P =100 kN	93
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการ วัดแบบวิธีปกติของระบบที่ t =1 นาที P =150 kN	94
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการ วัดแบบวิธีปกติของระบบที่ t =1.5 นาที P =150 kN	95
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการ วัดแบบวิธีปกติของระบบที่ t =2 นาที P =150 kN	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอกซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการวัดแบบวิธีปกติของระบบที่ $t=1$ นาที $P=200$ kN	97
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอกซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการวัดแบบวิธีปกติของระบบที่ $t=1.5$ นาที $P=200$ kN	98
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของแต่ละธาตุกับความเข้มรังสีเอกซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC,SC และการวัดแบบวิธีปกติของระบบที่ $t=2$ นาที $P=200$ kN	99



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันระบบการวัดวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ระบบหนึ่งที่มีนิยมนั้นก็คือ ระบบการวัดและวิเคราะห์ด้วยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-Rays Fluorescence Spectrometer) ระบบการวัดและวิเคราะห์นี้เป็นเทคนิคการวัดที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive) ซึ่งมีความสะดวกรวดเร็วและให้ผลที่แม่นยำและสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งชนิดของแข็งและของเหลว อย่างไรก็ตามระบบการวัดและวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกันคือ

1. ระบบวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงาน (Energy Dispersive X-Rays Fluorescence Spectrometer ; EDXRF)
2. ระบบวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Rays Fluorescence Spectrometer ; WDXRF)

ในระบบการวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ทั้งสองระบบจะต่างกันตรงที่การแจกแจงการวัด (Resolution) พีก(Peak) ของธาตุในส่วนผสมของตัวอย่าง โดยที่ระบบการวัดแบบแจกแจงพลังงานการวัดจะขึ้นอยู่กับหัววัดรังสี(Detector) ซึ่งจะเป็นแบบหัววัดสารกึ่งตัวนำ(Semiconductor-Detectors) แต่ระบบการวัดแจกแจงความยาวคลื่นการวัดของพีก(Peak) ขึ้นอยู่กับผลึก(Crystals) ดังนั้นในระบบ WDXRF เมื่อรังสีเอกซ์เฉพาะตัว(Characteristic X-Rays) ออกจากผลึกจึงเข้ามาถึงหัววัดรังสี ซึ่งหัววัดรังสีในระบบ WDXRF จะมีอยู่สองหัววัดด้วยกันก็คือ พร็อพพอร์ชันเนลเคาน์เตอร์(Proportional counters) และซินทิลเลชันเคาน์เตอร์(Scintillation counters)

อย่างไรก็ตามการพิจารณาหัววัดรังสีที่นำมาใช้กับระบบ WDXRF จะพบว่าการแจกแจงการวัดของหัววัดรังสีทั้ง 2 ชนิดจะขึ้นอยู่กับย่าน (Range) ของพลังงานหรือย่านของความยาวคลื่น ในทางทฤษฎีจะกล่าวได้ว่าหัววัดรังสีชนิดพร็อพพอร์ชันเนล (Proportional counters) จะเหมาะสมกับการวัดธาตุตั้งแต่ Be-Mo ส่วนชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation counters) จะเหมาะสมกับการวัดธาตุตั้งแต่ Mo ขึ้นไป

โครงการพิเศษนี้จะศึกษาการเปรียบเทียบความแตกต่างของหัววัดรังสีสำหรับการวัดและวิเคราะห์ในระบบ WDXRF Model SRS3400 AXS ของ Bruker (Sewent) ประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นระบบเครื่องมือที่ได้รับมาจากโครงการเงินกู้ทบวงมหาวิทยาลัย โดยหัววัดรังสีที่อยู่ในระบบ

เครื่องมือที่จะศึกษาคือ พร็อพพอร์ชันเนลเคาน์เตอร์(Proportional counters) หรือโฟลเคาน์เตอร์ (Flow counters:FC) และซินทิลเลชันเคาน์เตอร์(Scintillation counters ; SC) ซึ่งตามคู่มือการทำงานและการวัดจะพบว่า FC จะวัดในย่าน $0.2\text{keV} < E < 8\text{keV}$ หรือ $2\theta = 4$ และ 148° (Soft radiation) ส่วน SC จะวัดในย่าน $E > 4\text{keV}$ หรือ $2\theta \geq 90^\circ$ (Hard radiation)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหัววัดรังสีของระบบ WDXRF Model SRS3400 AXS ของ Bruker (Sewent) ประเทศเยอรมัน

1.2.2 เพื่อศึกษาการเลือกวัดและวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณของหัววัดรังสีชนิด FC และ SC

1.2.3 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบความแตกต่างของการวัดธาตุในเชิงปริมาณของหัววัดรังสีชนิด FC และ SC

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์

1.3.2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ WDXRF Model SRS3400 AXS ของ Bruker (Sewent) ประเทศเยอรมัน

1.3.3 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของหัววัดรังสีชนิด FC และ SC ของ WDXRF Model SRS3400 AXS ของ Bruker (Sewent) ประเทศเยอรมัน

1.3.4 ศึกษาและเตรียมตัวอย่างมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์เครื่องมือ WDXRF Model SRS3400 AXS ของ Bruker (Sewent) ประเทศเยอรมัน

1.3.5 ศึกษาและทำการเลือกวัดและวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณพร้อมเปรียบเทียบความแตกต่างของหัววัดรังสีชนิด FC และ SC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน	- ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ธาตุของเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์(XRFS) คือ EDXRFS และ WDXRFS
กรกฎาคม	- ศึกษาทฤษฎีของหัววัดรังสีของเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRFS) ทั้ง 2 ชนิด คือ EDXRFS และ WDXRFS
สิงหาคม	- ศึกษาการเตรียมตัวอย่างและการใช้เครื่องจากหลักการในหนังสือ
กันยายน	- หาตัวอย่างในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลใช้เป็นค่ามาตรฐานในการทดลอง
ตุลาคม	- ฝึกฝนการใช้เครื่อง XRFS จากเครื่องที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ตึกจุฬารักษ์ 2
พฤศจิกายน	- ทำการทดลองจากตัวอย่างมาตรฐานชนิดผง
ธันวาคม	- วิเคราะห์และประเมินผลตามจุดประสงค์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 นำความรู้พื้นฐานทางด้านรังสีเอกซ์มาประยุกต์กับระบบการวัดและวิเคราะห์ ด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น
- 2 สามารถนำความรู้พื้นฐานในหลักการเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ มาอธิบายเกี่ยวกับหัววัดรังสีได้
- 3 การเลือกหัววัดรังสีให้เหมาะสมต่อย่านการวัดธาตุในเชิงปริมาณจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ให้ความถูกต้อง (Accuracy) สูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการวัดและวิเคราะห์ของระบบ WDXRFS สำหรับงานในด้านการศึกษาค้นคว้าวิจัย และใน ด้านอุตสาหกรรม

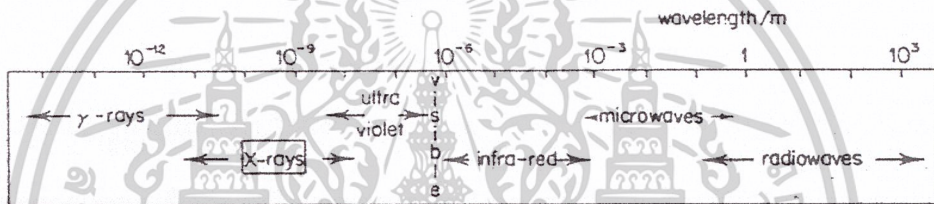
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

การศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ของรังสีเอ็กซ์จากลักษณะเฉพาะของแต่ละสสารจะมีเทคนิควิเคราะห์ที่ใช้ศึกษาได้อย่างกว้างขวาง อย่างเช่น การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Rays diffraction) การวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray fluorescence) และสามารถให้หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristic X-Ray) วิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงช่วงความยาวคลื่นย่านต่างๆ

รังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจัดอยู่ในย่านของความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1\AA - 100\AA รังสีเอ็กซ์นอกจากแสดงคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาคได้อีกด้วยแล้วแต่กรณี สำหรับคุณสมบัติที่เป็นอนุภาครังสีเอ็กซ์จะมีชื่อเรียกว่า “โฟตอน (photon)” หรือในที่นี้จะเรียกว่าโฟตอนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray photon) โฟตอนรังสีเอ็กซ์ที่นำไปใช้ประโยชน์จะมีพลังงานที่สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของรังสีเอ็กซ์กับความยาวคลื่น (λ) ของรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้

$$E = hv \quad (2.1)$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 6.62×10^{-34} จูล-วินาที

หรือ 6.62×10^{-27} เฮอร์ก-วินาที)

v = ความถี่หรือมีค่าเท่ากับ c/λ

ดังนั้นจากสมการที่ (2.1) ถ้าแทนค่า v จะเป็นดังสมการ (2.2)

$$E = hc/\lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ c = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าเท่ากับ 2.98×10^8 มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

λ = ความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร

จากสมการที่ (2.2) เมื่อแทนค่าคงที่ hc และจัดหน่วยความยาวคลื่นในหน่วยอังสตรอม ($1\text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 0.0001\mu\text{m}$) พลังงานในหน่วยของกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) จะเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$E(\text{keV}) = 12.4/\lambda \quad (2.3)$$

โฟตอนรังสีเอกซ์เกิดจากการหลุด (ejection) ของอิเล็กตรอนจากวงโคจรของอะตอมแล้วเกิดการปลดปล่อยรังสีซึ่งเป็นพลังงานส่วนเกินจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงไปสู่ระดับพลังงานต่ำ เมื่อลำโฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบบนวัตถุจะทำให้เกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างวัตถุกับลำโฟตอนรังสีเอกซ์ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ขึ้น อย่างเช่น เกิดการเปล่งแสง (emission) การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) หรือการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น ลำแสงของโฟตอนรังสีเอกซ์เมื่อผ่านตัวกลางความเข้มแสงจะลดลง (attenuation) ตามทางที่ผ่าน โดยเป็นผลจากการดูดกลืนจากการเกิดกระเจิงของโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric absorption) และส่วนที่สำคัญควรพิจารณาในการทำให้ความเข้มแสงลดลงก็คือ ผลการดูดกลืนความเข้ม (magnitude) จากสารตัวกลางตัวอย่างเช่น โฟตอนรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบตัวกลางจะเกิดการสูญเสียความเข้มเนื่องจากการดูดกลืนตามทางที่ผ่าน โดยการดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่าเลขอะตอม (atomic number ;Z) ของธาตุในตัวกลาง นั่นคือธาตุที่มีค่า Z สูงจะลดความเข้มโฟตอนรังสีเอกซ์ได้มากกว่าธาตุที่มีค่าเลขอะตอมต่ำ

การเรืองรังสีเอกซ์ (X-Ray fluorescence) เกิดจากคุณสมบัติของธาตุหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) หรือ รังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary radiation) (เมื่อเทียบกับระบบการวิเคราะห์) การเรืองรังสีเอกซ์นี้จึงสามารถใช้เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์หาธาตุในวัตถุ โดยทั่วไปแล้วจะอาศัยคุณสมบัติความยาวคลื่น (แสงแสดงคุณสมบัติเป็นคลื่น) และพลังงาน (แสงแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาค) ของธาตุในระบบงานวิเคราะห์ที่เรียกระบบนี้ว่า X-Ray fluorescence spectrometer แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

1. ระบบการแจกแจงวัดความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; WDXRFS)
2. ระบบการแจกแจงวัดพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; EDXRFS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบงานวิเคราะห์หนึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวทีละธาตุ (Sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ทันสมัยมีความสามารถสูงสำหรับงานวิเคราะห์ ข้อมูลนี้จึงทำให้เทคนิคนี้เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ และงานวิจัย เพราะจะสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของตัวอย่าง ในระดับปริมาณความเข้มข้นสูงถึงระดับปริมาณความเข้มข้นต่ำ และบางครั้งได้ถึงระดับธาตุพลังงานต่ำ (trace elements) เทคนิควิเคราะห์หนึ่งจึงมีความสะดวกและรวดเร็วมาก

2.2 หลักการเกิดสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์จากหลอดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสภาวะระดับพลังงานของอะตอมจากระดับพลังงานสูงไปสู่ระดับพลังงานต่ำ รังสีเอ็กซ์นี้อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (isotope) หรือเกิดจากกลไกอิเล็กตรอนที่มนุษย์ผลิตขึ้น กล่าวคือเมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้น (excite) จะทำให้บริเวณวงโคจรอิเล็กตรอนของอะตอมนอกนิวเคลียสได้รับการกระตุ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากสภาวะปกติ (ground state) ไปสู่สภาวะกระตุ้น (excited state) และจะลดระดับพลังงานกลับเข้าสู่สภาวะปกติโดยมวลอะตอมไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่กลับเข้าสู่สภาวะปกตินั้นจะเกิดการแทนที่ในที่ว่างจากชั้นอิเล็กตรอนวงนอกซึ่งมีพลังงานสูงเข้าแทนที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออกไปจากวงโคจรนั้น การแทนที่นี้จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนออกมาจากอะตอมทุกครั้งที่ได้รับ การกระตุ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาเรียกว่า "รังสีเอ็กซ์" แต่ถ้าสภาวะรับการกระตุ้นให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานเกิดในนิวเคลียสการลดระดับพลังงานสู่สภาวะปกติบริเวณนิวเคลียสแล้วปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาจะเรียกว่า "รังสีแกมมา" จะเห็นว่ารังสีชนิดนี้มีคุณสมบัติเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดเท่านั้น

สำหรับรังสีเอ็กซ์ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอนคือ

- ก. รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray) ,มีลักษณะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องกระจายจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดบางครั้งเรียกว่า "โพลีโครมาติก" (Poly chromatic) หรือ รังสีขาว (White radiation) หรือ เบรมสตราลุง (Bremsstrahlung)

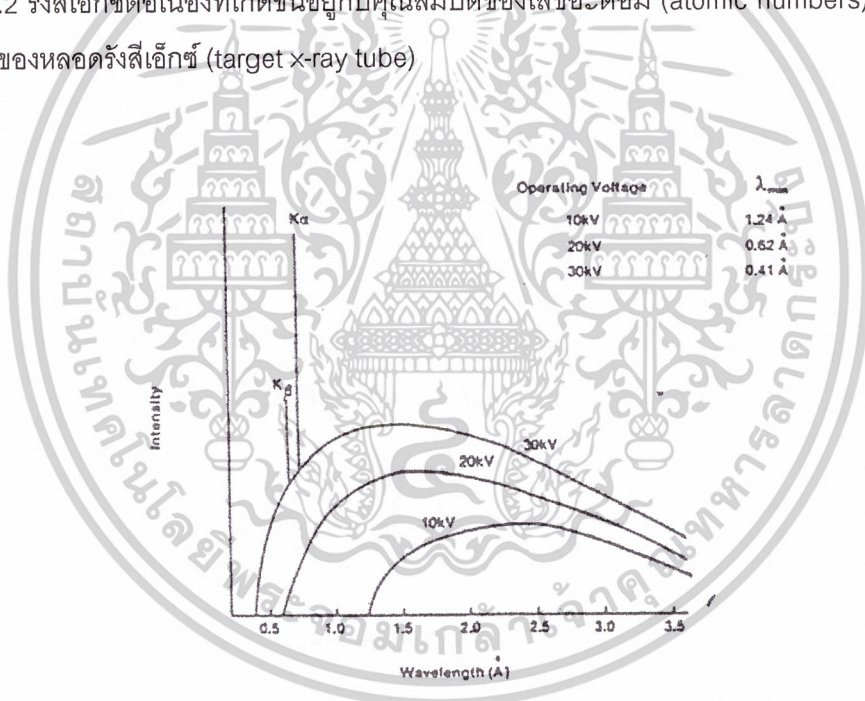
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเดียว (monochromatic) เพราะเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอนจากวงโคจรของอะตอม

หลักการเกิดรังสีเอกซ์ทั้งสองชนิดมีดังนี้

1) รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องนี้เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าสู่สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้นิวเคลียส ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตจะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และลดความเร็วลงพร้อมทั้งสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว และปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาจะเรียกการปลดปล่อยนี้ว่า “เบรมสตราลุง” (Bremsstrahlung หรือ Breaking radiation) ความเข้มของรังสีเอกซ์และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะกระจายอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.2 รังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเลขอะตอม (atomic numbers) ที่นำมาทำเป้าของหลอดรังสีเอกซ์ (target x-ray tube)



รูปที่ 2.2 แสดงผลความเข้มแสงที่ออกมาจากเป้าโลหะทำด้วยโมลิบดีนัมของหลอดรังสีเอกซ์

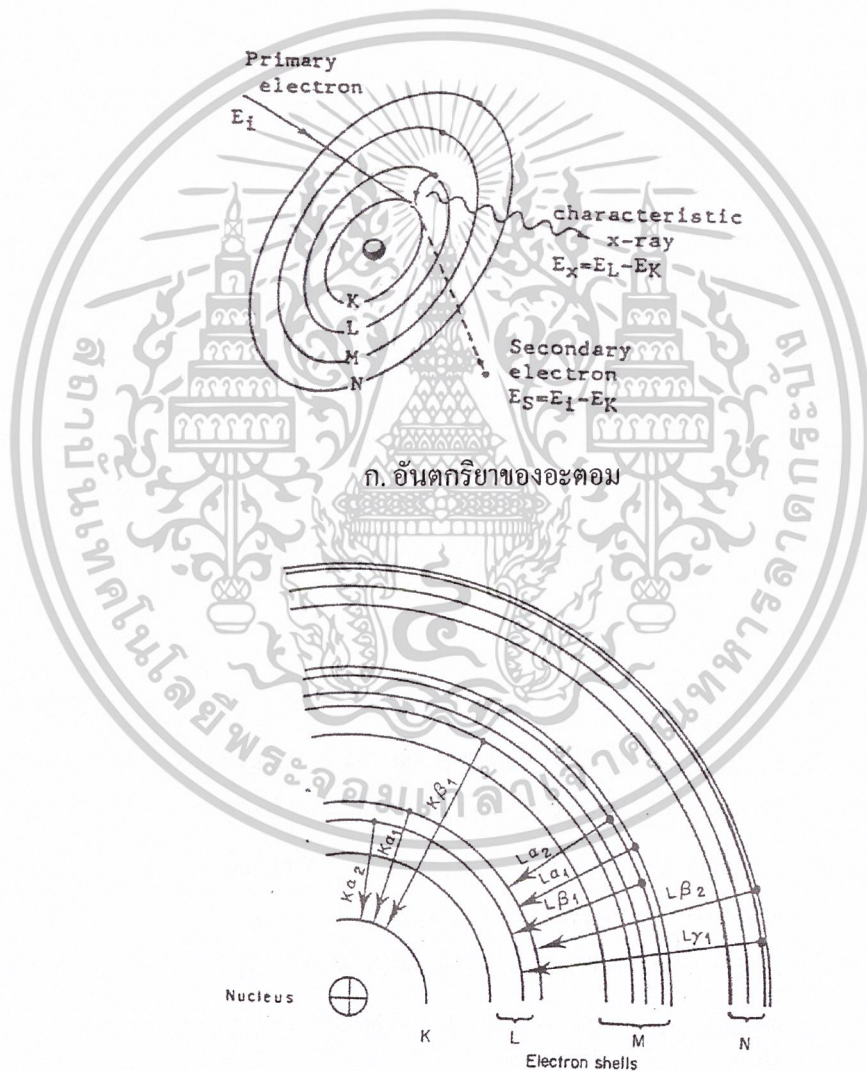
โดยปรับค่าความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดเท่ากับ 10, 20 และ 30 kV

2) รังสีเอกซ์เฉพาะตัว

ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่น ๆ หรือโฟตอนพลังงานสูง (E) เคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่นชั้น K, L, M หรือ N เป็นต้น แล้วเกิดการถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นโคจรที่ได้รับ

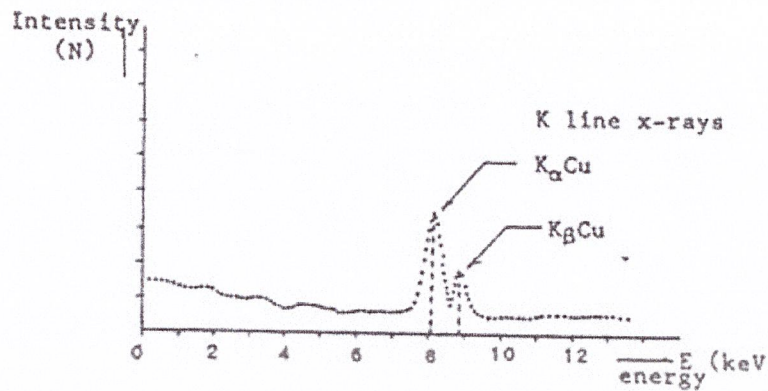
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานเพิ่มขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร (binding energy, E_K) จะทำให้หลุดออกจากวงโคจร ($E_L - E_K$) เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ในวงโคจรชั้นที่ว่างและเกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกินออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ พลังงานส่วนที่เกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความแตกต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและชนิดของธาตุนั้นๆ และจะมีพลังงานเฉพาะค่า ดังนั้นรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้เรียกว่า "รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว" ดังรูปที่ 2.3



ข. การเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ

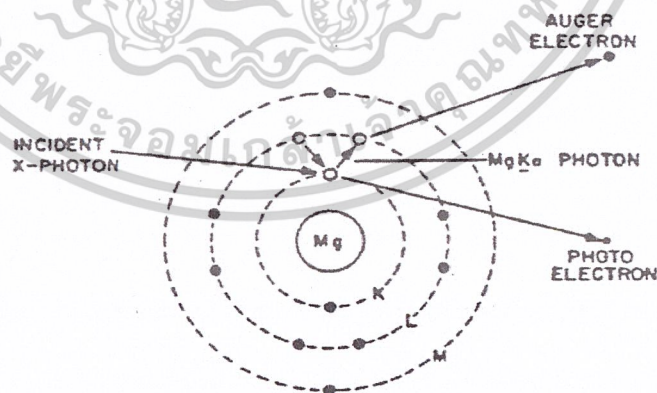
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก
(Photoelectric effect)

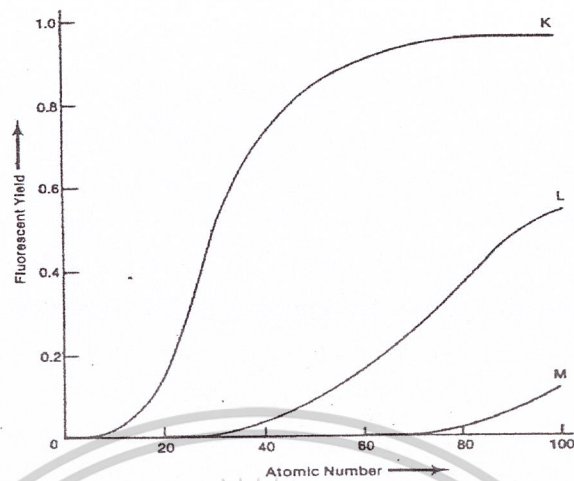
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

จากปรากฏการณ์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรนี้จะเรียกว่า“ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก” (Photoelectric effect) และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรว่า“โฟโตอิเล็กตรอน” (Photoelectron) อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากวงโคจร K-shell จะเกิดที่ว่างขึ้นอิเล็กตรอนใน L-shell จะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวขึ้นคือ K X-ray มีค่าเท่ากับ $E_x = E_L - E_K$ และจะเรียกระดับพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ว่า K X-ray ดังตัวอย่างในรูป 2.4 แสดงให้เห็นถึงการเกิดฟีก (peak) หรือสเปกตรัมเส้น (line spectrum) ของธาตุแมกนีเซียม (Mg) ซึ่งเป็นระดับพลังงาน Mg K_{α}



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามฟลูออเรสเซนซ์(Fluorescence yield) กับ เลขอะตอม(Atomic number)

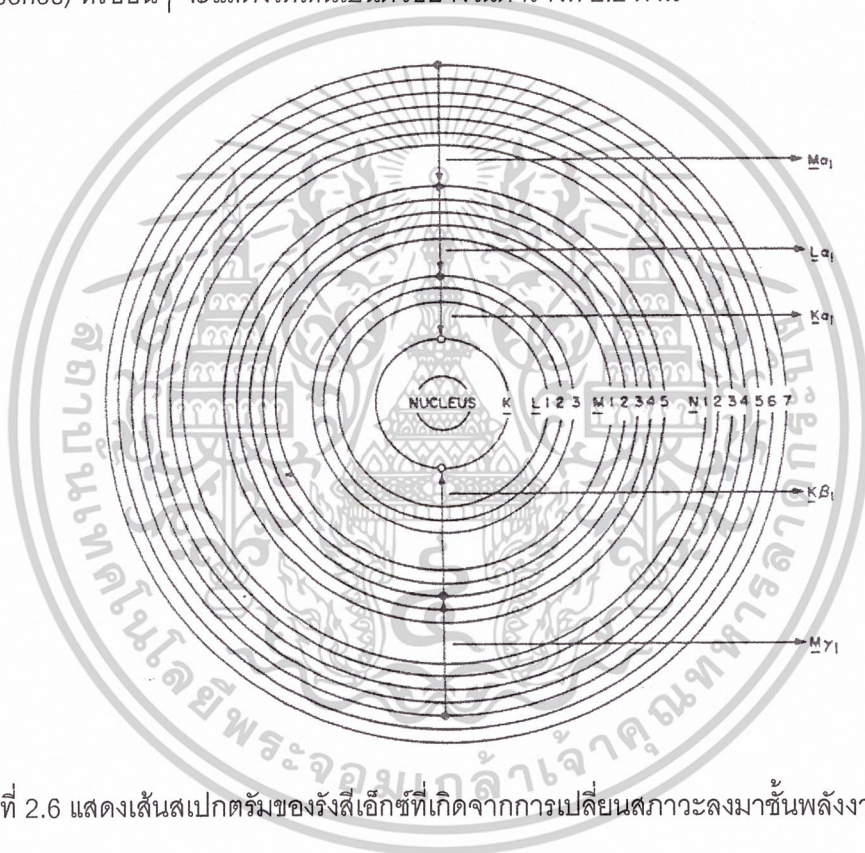
การแทนที่ว่างในวงโคจร K และ L จะเกิดขึ้นภายในเวลา $10^{-9} - 10^{-16}$ วินาทีเท่านั้น อัตราการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวหรือรังสีเอ็กซ์เรือง (x-ray fluorescence) ต่ออัตราการเกิดที่ว่างจะเรียกว่า “ฟลูออเรสเซนส์ยิลด์ (fluorescence yield)” ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอม โดยปกติแล้วรังสีเอ็กซ์ระดับชั้น K จะมีฟลูออเรสเซนส์ยิลด์สูงกว่า L,M,... ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 2.5 และจะเห็นว่าฟลูออเรสเซนส์ยิลด์จะสูงขึ้นเมื่อค่า Z (atomic numbers) สูงขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 แสดงชั้นอิเล็กตรอนและเลขควอนตัม

X-ray Shell	No. of electrons n	Quantum numbers			s-p-d notation
		l	j		
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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานหนึ่งไปยังระดับพลังงานหนึ่งนั้น จะสามารถนำทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม(quantum mechanics) มาอธิบาย กล่าวคือ การเปลี่ยนสถานะของอะตอมจะมีลักษณะคล้ายกับการสั่นของไดโพลไฟฟ้า(electronic dipole) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสถานะทั้งสองเป็นไปตามกฎการคัดเลือก (selection rule) คือ $\Delta l = \pm 1$ และ $m_l = 0, \pm 1$ เท่านั้น และการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับพลังงานนั้น (ดังตารางที่ 2.1 และดังในรูป 2.6) ทำให้เกิดอนุกรมของเส้นสเปกตรัมรังสีเอกซ์สำหรับแต่ละธาตุ โดยทั่วไปสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในอนุกรมชั้นเค(K-series) ,อนุกรมชั้นแอล(L-series) หรืออนุกรมชั้นเอ็ม(M-series) หรืออื่นๆ จะแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดงเส้นสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะลงมาจากชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า

เส้นสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะ ถ้าหากระดับพลังงานเกิดอยู่ใกล้กันมากทำให้ไม่อาจบอกถึงความแตกต่างได้ แต่ถ้าจะบอกถึงความเข้มของเส้นสเปกตรัมแล้ว จะเห็นว่า เอลฟาไลน์(α -line) จะเข้มกว่า เบต้าไลน์(β -line) หรือ α_1 จะเข้มกว่า α_2 เป็นต้น โดยที่การบอกความแตกต่างจะดูที่ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น (shell) ซึ่งจะเขียนกำกับด้วยเลขโรมันดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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}

ส่วนความถี่ของรังสีเอ็กซ์ที่แผ่ออกมาเฉพาะตัวนั้นจะสัมพันธ์กับค่าของเลขอะตอม (atomic number) ของธาตุที่ถูกกระตุ้นและจะเป็นไปตามกฎของมอสเลย์ (Moseley's law) คือ

$$\nu = k(Z - \sigma)^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ

ν = ความถี่

k = ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นบนค่าความแตกต่างสำหรับ spectral series

σ = The shielding constant และมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1

Z = เลขอะตอมของธาตุ (atomic number)

และสามารถเขียนสมการที่ (2.4) ใหม่ได้ดังนี้

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

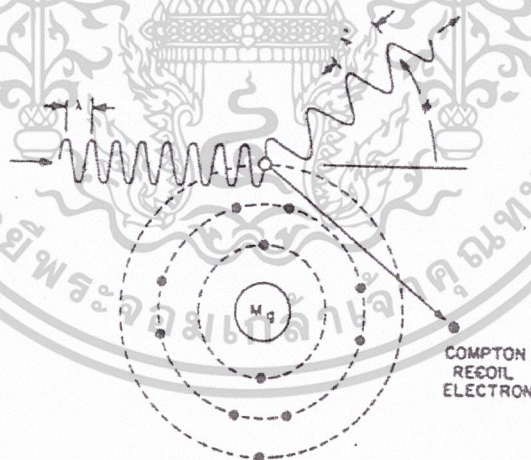
2.3 คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (Properties of X-Rays)

รังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติคล้ายรังสีแกมมา ดังนั้นเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับสสารหรือวัตถุต่างๆ จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (Absorption of X-Rays) การสะท้อนหรือการกระเจิง (scattering) และการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น รายละเอียดจะกล่าวต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1. การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์และอินโคฮีเรนต์ (Coherent and Incoherent-Scattering)

การกระเจิงจะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนรังสีเอกซ์เกิดอันตรรกิริยากับอิเล็กตรอนของธาตุที่เป็นเป้าโลหะ (target) ถ้าการชนไม่เกิดการสูญเสียพลังงานจะเรียกรวมการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) การกระเจิงที่เกิดขึ้นจากการชนครั้งนี้จะเป็นแบบโคฮีเรนต์ (Coherent or reyleigh scattering) โดยที่พลังงานทั้งหมดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือรังสีที่เกิดจากการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์จะมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นของลำรังสีที่ตกกระทบ คลื่นของการกระเจิงนี้จะอธิบายโดยโฟตอนปฐมภูมิ(primary photon) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) เมื่อคลื่นเกิดอันตรรกิริยากับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกออสซิลเลท(Oscillate) ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่เดียว โดยความเข้มของการกระเจิงจะขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมและพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ ส่วนปรากฏการณ์ที่มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนของพลังงานที่ชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวน้อยจะเรียกรวมการชนแบบนี้ว่าอินโคฮีเรนต์ (Incoherent(Compton) scattering) การชนแบบนี้อิเล็กตรอน จะถูกสะท้อนกลับ (recoil) ภายใต้อันตรรกิริยา ในส่วนที่อิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (recoil) เล็กน้อยนั้น จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานหรือทำให้ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรรกิริยาของลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับตัวอย่าง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\lambda = 0.0243(1 - \cos\phi) \quad (2.6)$$

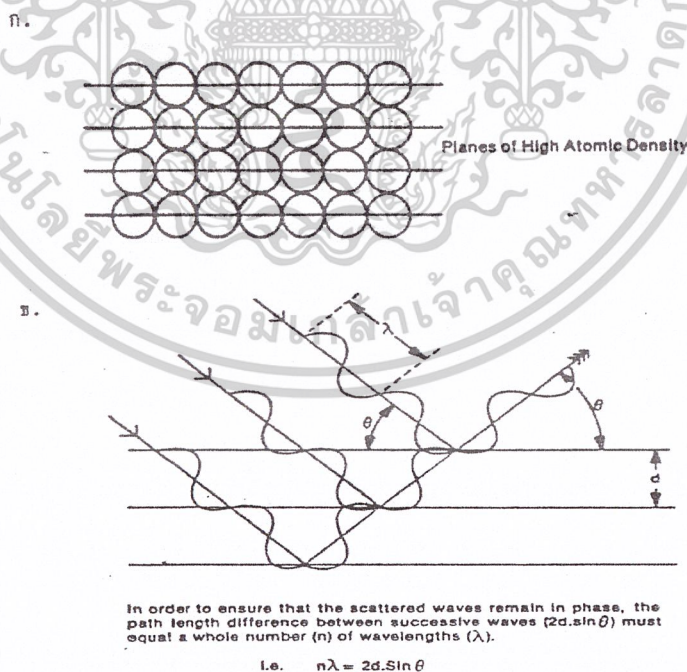
เมื่อ ϕ = the angle (deg) between unscattered and scattered x-rays

ในการจัดทำสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ค่ามุม ϕ มีค่าเท่ากับ 90° ซึ่ง cosine 90° จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการหาความแตกต่างความยาวระหว่าง Incoherent และ Coherent มีค่า 0.0243 อังสตรอม

2.3.2. การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน (Interference and diffraction)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-rays diffraction) เป็นการรวมกันของสองปรากฏการณ์คือการเกิดการกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent scattering) และการแทรกสอด (Interference) ซึ่งถ้ามีคลื่นตั้งแต่สองชุดขึ้นไปเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันจะเกิดการแทรกสอดกันกลายเป็นคลื่นรวมโดยที่เงื่อนไขในทางเรขาคณิตจะอธิบายปรากฏการณ์แทรกสอดนี้ว่าความยาวคลื่นจะเป็นเฟสที่แน่นอนถึงแม้ว่าจะมีคลื่นส่วนอื่นเพิ่มเข้าไปแต่ก็ยังแสดงให้เห็นถึงเฟสที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งจะทำให้ผลการเลี้ยวเบนเกิดสูงสุด

ในรูป 2.8 จะแสดงให้เห็นโครงตาข่ายผลึก (crystal lattice) ประกอบไปด้วยการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแถว ในแต่ละชั้นของโครงสร้างผลึก (crystal structure) จะมีความหนาแน่นอะตอมสูงมาก

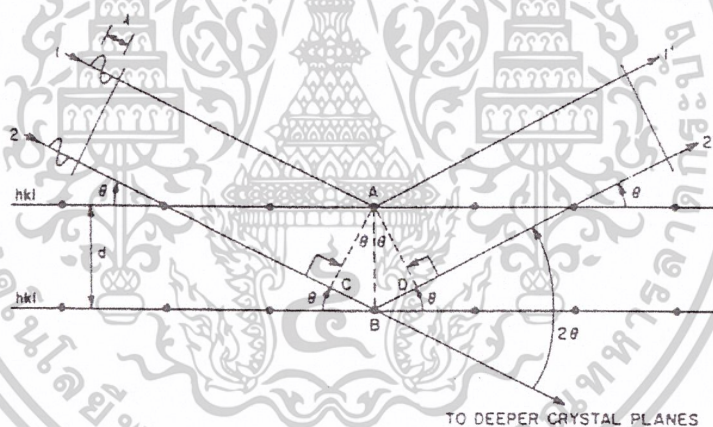


รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านระนาบของอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรกิริยาระหว่างรังสีของคลื่นกับผลึกเป็นภาพที่เข้าใจยาก แบริก (W.L.Bragg) ได้อธิบายการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีที่แสดงพฤติกรรมเป็นคลื่นกับผลึกนี้อย่างง่ายๆ คือผลึกประกอบด้วยโครงตาข่ายที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในลักษณะที่เป็นกลุ่มของระนาบที่ขนานกัน เมื่อรังสีของคลื่นตกกระทบบนกลุ่มของระนาบที่ขนานกันภายในผลึกแต่ละระนาบสะท้อนรังสีตกกระทบบางส่วนออกมาในลักษณะกระจกเงาที่ฉายสารสะท้อนแสงไว้บ้าง แนวรังสีสะท้อนจะพบได้เมื่อรังสีที่สะท้อนจากกลุ่มของระนาบที่ขนานกันแทรกสอดกันแบบเสริมสร้าง (constructive interference) ดังในรูปที่ 2.8 และถือว่าการกระเจิงของรังสีสะท้อนจากกลุ่มระนาบเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic) นั่นคือพลังงานของรังสีเอ็กซ์สะท้อนออกมาจะมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบน

พิจารณาระนาบของโครงตาข่ายที่ขนานกันและห่างกัน d ดังรูป 2.8. และแนวรังสีตกกระทบบนระนาบ ผลต่างระยะทางที่รังสีทั้งสองสะท้อนจากระนาบคู่ขนานที่อยู่ติดกันจะเท่ากับ $2d\sin\theta$ เมื่อ θ เป็นมุมตกกระทบบนรังสีที่เท่ากับแนวระนาบ



รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนผ่านผลึก (crystals-Bragg) ของรังสี

การแทรกสอดแบบเสริมสร้างของรังสีสะท้อนจากระนาบคู่ขนานจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของระยะทางมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม n ของความยาวคลื่น พิจารณาในรูปที่ 2.9 และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$CB + BD = n\lambda$$

เมื่อ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

θ = มุมที่ลำรังสีมาตกกระทบบนระนาบแล้ว จะได้ว่า

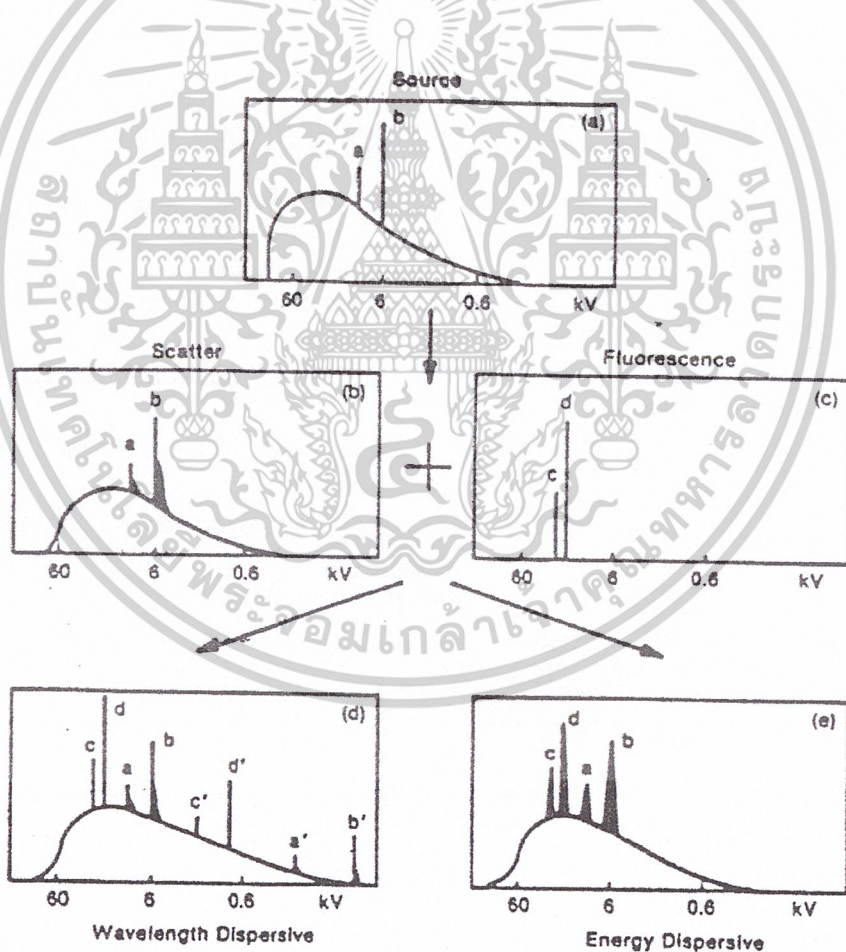
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 CB &= AB\sin\theta \\
 BD &= AB\sin\theta \\
 n\lambda &= 2AB\sin\theta \\
 n\lambda &= 2d\sin\theta \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

สมการนี้คือกฎของแบรกก์ (bragg's law) ซึ่งระยะห่างระหว่างระนาบคู่ขนาน d ขึ้นอยู่กับเลขดัชนีของระนาบ hkl และค่าคงที่โครงข่าย a

$$d = a / (h^2 + l^2 + k^2)^{1/2} \tag{2.8}$$

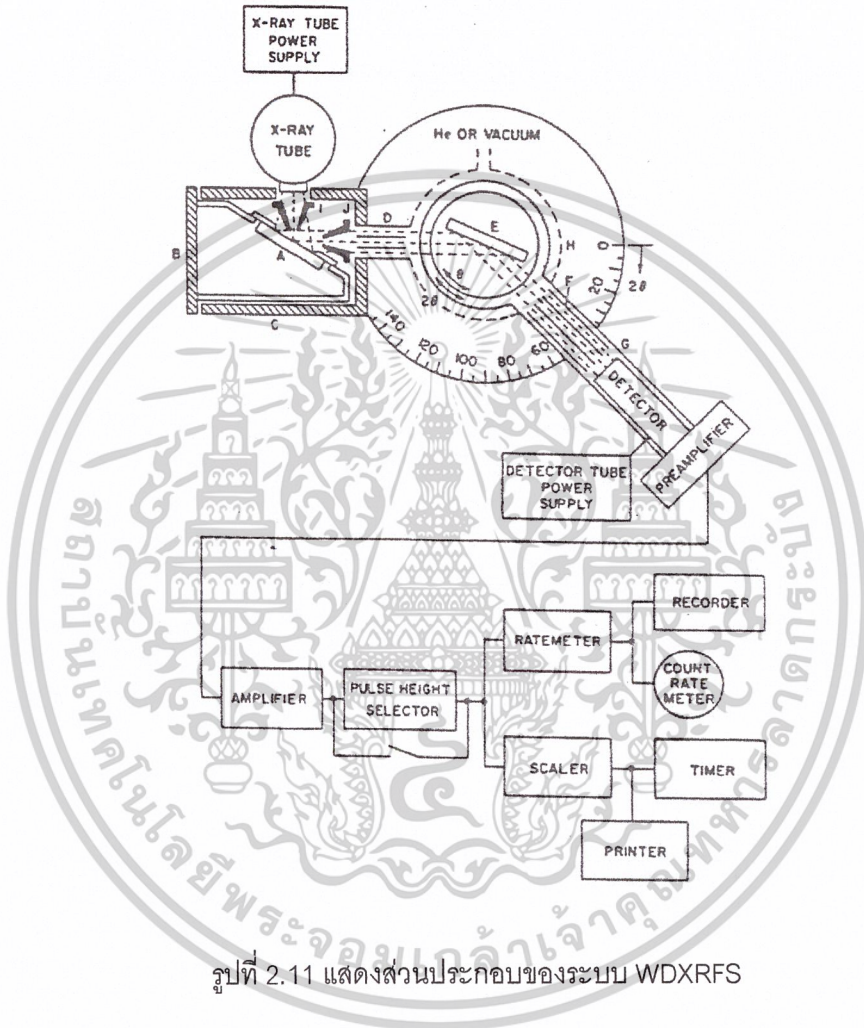
จากรายละเอียดที่กล่าวมาทั้งหมดถ้าทำการทดลองวัดสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ทั้งพีคและแบ็กกราวนด์(Background) จะแสดงให้เห็นดังรูป 2.10 ทั้งในระบบการแยกวัดความยาวคลื่น (wavelength Dispersion) และการแยกวัดพลังงาน (Energy Dispersion)



รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ทั้งพีค (Peak) และแบ็กกราวนด์ (Background)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ระบบเครื่องมือวัดของสเปกโตรมิเตอร์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบการแยกแรงแจกความยาวคลื่น (Instrumentation of Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer ; WDXRFS)



รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของระบบ WDXRFS

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบการแยกแรงแจกความยาวคลื่น จะแสดงส่วนประกอบของระบบในรูป 2.11 ระบบเครื่องมือการวัดแบบ WDXRFS (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer) นี้ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนการกระตุ้น (excitation) ส่วนการแยกแรงแจก (dispersion) และส่วนการตรวจวัด (detection) และสามารถอธิบายหลักการทำงานได้ดังนี้

2.4.1 ส่วนการกระตุ้น (Excitation)

ในส่วนการกระตุ้นกล่าวคือ เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ถูกกระตุ้น (excitation) ด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (High Voltage) และกระแสจะทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์พลังงานสูงขึ้นไป และเรียกรังสีเอกซ์นี้ว่า รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (primary X-ray) หรือรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous X-ray หรือ Bremsstrahlung radiation) รังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะผ่านหน้าต่างซึ่งทำด้วยแบริลเลียมบางๆ (~125 μm) ออกมาตกกระทบตัวอย่าง A (specimen) ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับอะตอมของตัวอย่างและเกิดปรากฏการณ์ต่างๆอย่างเช่น เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) การกระเจิง (scattering) การเลี้ยวเบน (diffraction) การแทรกสอด (interference) และการดูดกลืน (absorption) เป็นต้น

2.4.2 ส่วนการแจกแจง (Dispersion)

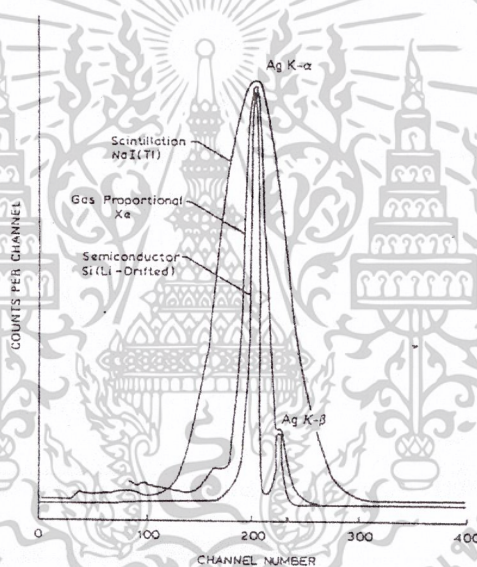
ผลจากอันตรกิริยาที่สนใจก็คือ การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจากตัวอย่างจากนั้นจะไปตกกระทบที่ผลึก E (crystal) ซึ่งเป็นส่วนการแจกแจง เพื่อทำการแจกแจงความยาวคลื่นคลื่นต่างๆกันของธาตุในตัวอย่างออกไปยังหัววัดรังสี G (Detector) หัววัดรังสีจะทำหน้าที่สแกนไปรับความยาวคลื่นที่ตำแหน่งมุมต่างๆ โดยที่หัววัดรังสีจะดูดกลืนโฟตอนรังสีเอกซ์และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณพัลส์ของกระแสไฟฟ้า (electric current) ที่พีรีแอมพลิไฟลอร์ (preamplifier) และแอมพลิไฟลอร์ (amplifier) ซึ่งมีความเข้ม (amplitude) เป็นสัดส่วนกับพลังงานของโฟตอนรังสีเอกซ์ที่เข้ามาสัญญาณพัลส์จะถูกส่งเข้าไปยังชุดพัลส์ไฮซีเล็กเตอร์ (pulse height selector) เพื่อทำการเลือกความเข้มที่เหมาะสมส่งไปยังเรตมิเตอร์ (rate meter) หรือสเกลาร์เรตมิเตอร์ (scalar rate meter) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสแกนและสเกลาร์ ทำหน้าที่วัดความเข้มแสงสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (qualitative and quantitative analysis)

2.4.3 ส่วนการตรวจวัด (Detection)

ในส่วนที่สามของเครื่อง WDXRF นี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนตรวจจับ (detection) และส่วนการวัด (measurement) โดยในที่นี้จะขอล่าวถึงรายละเอียดของการตรวจจับจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดรังสี (Detectors)

หัววัดรังสี โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือแก๊สฟิลล์เทคเตอร์ (Gas filled detectors), ซินทิลเลชันเคาน์เตอร์ (Scintillation counters) และโซลิดสเตทเซมิคอนดักเตอร์ดี-เทคเตอร์ (Solid-state Semiconductor detectors) ซึ่งหัววัดรังสีทั้งสามประเภทนี้จะต้องเลือกให้

เหมาะสมกับการใช้งาน ในที่นี้หัววัดรังสีเอกซ์ที่เลือกสำหรับระบบ WDXRFS จะเป็นแบบแก๊สฟิล-ดีเทคเตอร์ (Gas filled detectors) ชนิดพร็อพพอร์ชันเนลเคาน์เตอร์ (Proportional counters) และแบบซินทิลเลชันเคาน์เตอร์ (Scintillation counters) ส่วนหัววัดรังสีเอกซ์แบบเซมิคอนดักเตอร์ดีเทคเตอร์ (Semiconductor detectors) จะเหมาะสมสำหรับระบบ EDXRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer) ความแตกต่างของการแจกแจง (resolution) ของหัววัดรังสีทั้งสามจะแสดงในรูปที่ 2.12 ในการวัดของทั้งสองระบบการแจกแจง (resolution) ของระบบจะแตกต่างกัน นั่นคือถ้าในระบบ EDXRF นั้นการแจกแจง (resolution) ของระบบจะขึ้นอยู่กับหัววัดรังสีซึ่งเลือกใช้หัววัดรังสีแบบเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) เพราะสามารถแยกพีคได้ชัดเจนกว่าหัววัดชนิดอื่น ส่วนระบบ WDXRFS นั้นการแจกแจง (resolution) ของระบบจะขึ้นอยู่กับผลึก (crystals) ดังนั้นที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นหัววัดรังสีที่ใช้กับระบบ WDXRFS



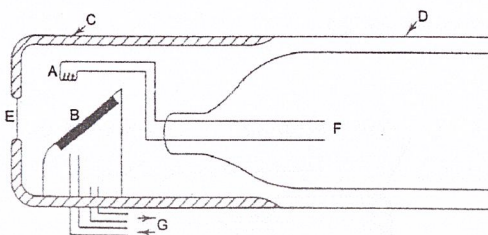
รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบความสูงของพัลส์ (pulse) ของสเปกตรัมรังสีเอกซ์อนุกรมชั้น K ของธาตุเงินจากหัววัดรังสี 3 ชนิด

ก. หัววัดรังสีชนิดพร็อพพอร์ชันเนล (Proportional counters)

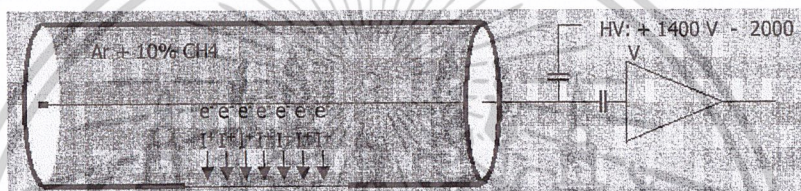
หัววัดรังสีแบบพร็อพพอร์ชันเนล (Proportional counters) โครงสร้างภายในพื้นฐานของหัววัดรังสี จะเป็นดังรูป 2.13 หลักการทำงานก็คือ เมื่อมีพลังงานของโฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบหัววัดจะทำให้เกิดไอออนไนเซชันระหว่างโฟตอนรังสีเอกซ์ (ionization) กับแก๊สที่บรรจุอยู่ในหัววัด ผลที่ได้ก็คือจะเกิดคู่อิออน (ion-pairs) ขึ้น จำนวนของคู่อิออน (ion-pairs) ที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานโฟตอน ในทำนองเดียวกันพลังงานของโฟตอนรังสีเอกซ์จะเกิด ไอออนไนเซชันก็ต่อเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ที่ใช้ในการเร่งไอออนบวกและอิเล็กตรอนวิ่งไปยังอิเล็กโทรดอยู่ในช่วงขอบเขตหัววัดรังสีหรือพหุคูณชั้นเนล (Proportional counter region) ดังกราฟที่ 2.14

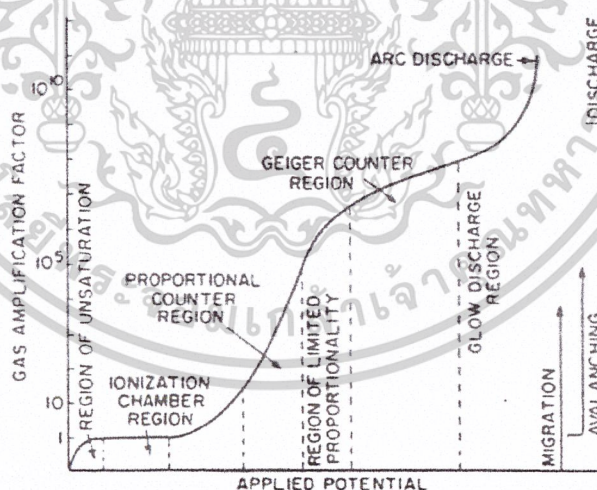


ก. แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีหรือพหุคูณชั้นเนลแบบทั่วไป



ข. แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีหรือพหุคูณชั้นเนลแบบWDXRF Model SRS3400 AXS

รูปที่ 2.13 แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีหรือพหุคูณชั้นเนล



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแก๊สแอมพลิฟิเคชันเฟคเตอร์ (Gas Amplification - factor) กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแก๊สฟิลดีเทคเตอร์ (Gas filled detectors)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของไอออนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับศักย์ที่ใช้โดยตรง นั่นคือถ้าใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง (Proportional counter region) อิเล็กตรอนก็จะถูกเร่งให้เร็วขึ้น การชนกับโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแก๊สก็จะเกิดมากขึ้น นอกจากนี้จำนวนประจุที่เกิดขึ้นภายในหัววัดรังสีสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = n_0 e M \quad (2.9)$$

เมื่อ Q = total charge

n_0 = original ion pairs

e = electron charge

M = gas multiplication factor

โดย M หาได้จาก

$$\ln M = \frac{V}{\ln(b/a)} \times \frac{\ln 2}{\Delta V} \left(\ln \frac{V}{pa \ln(b/a)} - \ln K \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ V = applied voltage

a = anode radius

b = cathode radius

P = gas pressure

ΔV และ K นั้นหาได้จากส่วนผสมของแก๊สภายในหัววัดรังสีดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนผสมของแก๊สภายในหัววัดรังสีหรือพอพชั่นเนลเคาน์เตอร์

Gas Mixture	K (10^4 V/cm · atm)	ΔV (eV)	Reference
90% Ar, 10% CH ₄ (P-10)	4.8	23.6	33
95% Ar, 5% CH ₄ (P-5)	4.5	21.8	33
100% CH ₄ (methane)	6.9	36.5	33
100% C ₃ H ₈ (propane)	10.0	29.5	33
96% He, 4% isobutane	1.48	27.6	33
75% Ar, 15% Xe, 10% CO ₂	5.1	20.2	33
69.4% Ar, 19.9% Xe, 10.7% CH ₄	5.45	20.3	33
64.6% Ar, 24.7% Xe, 10.7% CO ₂	6.0	18.3	33
90% Xe, 10% CH ₄	3.62	33.9	32
95% Xe, 5% CO ₂	3.66	31.4	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) การส่งผ่าน (Transmission)

โฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบที่หน้าต่าง (Window) และถูกดูดกลืนเข้าไปยังผนังของหัววัด ถ้าความยาวคลื่นสั้นมากและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) ของหัววัดต่ำจะทำให้ไม่มีสัญญาณพัลส์ออกทางเอาต์พุต (output) เลย เริ่มเกิดไอออนแล้วถ้าไม่เพิ่มแรงดัน จะทำให้ไอออนมันรวมตัวกันอีกจึงไม่สามารถสร้างเป็นหัววัดรังสีได้

(2) การเกิดคู่อิออน (Ion-Pair Production)

เมื่อโฟตอนรังสีเอกซ์เกิดไอออนในเซชันระหว่างโฟตอนรังสีเอกซ์กับแก๊สที่บรรจุตามทางที่ผ่านในหัววัด ซึ่งจะเขียนอันตรกริยาได้ดังนี้



จะเห็นว่าผลของอันตรกริยาจะเกิดคู่อิออนเป็นสัดส่วนกับพลังงานที่เข้ามาการเกิดคู่อิออนนี้ก็ถือเป็นวิธีการเปลี่ยนจากโฟตอนรังสีเอกซ์ไปเป็นประจุไฟฟ้า (Electric charge) อย่างไรก็ตามความยาวคลื่นของโฟตอนรังสีเอกซ์จะต้องสั้นกว่าค่า K-absorption edge ของ อาร์กอนช่วงนี้แม้ว่าเพิ่มแรงดัน ถ้าไม่เกิดการรวมตัวของไอออนอีกไอออนเกิดขึ้นจากอนุภาค α, β โดยตรงเรียกว่าไอออนปฐมภูมิ (primary ions) สามารถสร้างเป็นหัววัดไอออนในเซชันได้

(3) ผลการเกิดเอสเคปพีค (Escape peak) ของ Ar K_{α} จากการกระตุ้นชั้น K

การเกิดเอสเคปพีค (Escape peak) นี้จะเป็นผลจากการกระตุ้นระดับพลังงานชั้น K ของ Ar (K_{α} หรือ K_{β}) ซึ่งโฟตอนรังสีเอกซ์ที่เข้ามากระตุ้นนี้จะมีพลังงานสูงกว่าค่า K-absorption edge ของ Ar จึงทำให้เกิดการหลุดของอิเล็กตรอนและเกิดการแทนที่ปลดปล่อย Ar K_{α} พร้อมทั้งพลังงานโฟโตอิเล็กตรอนหรือเรียกว่า “escape peak”

(4) ผลการเกิดการดูดกลืน Ar K_{α} จากการกระตุ้น Ar K

การเกิดการดูดกลืน Ar K_{α} จากการกระตุ้นด้วยโฟตอนรังสีเอกซ์นั้นมีผลเช่นเดียวกับการเกิด เอสเคปพีค (escape peak) แต่เนื่องจากเอสเคปพีค (escape peak) และ Ar K_{α} มีจำนวนของการเกิดคู่อิออน (ion-pair) เท่ากัน จึงทำให้ถูกดูดกลืน Ar K_{α} ไว้หมด ซึ่งทำให้ลักษณะของพัลส์สูงที่ได้เหมือนกับรูป (b) จำนวนไอออนเกือบจะคงที่แม้เปลี่ยนแรงดันสามารถให้เป็นหัววัดไกเกอร์มูลเลอร์ได้ โดยจำนวนไอออนทุติยภูมิ (ion secondary e⁻) ไม่ขึ้นกับจำนวนไอออนปฐมภูมิ (ion primary e⁻) และพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary e⁻)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) ผลการเกิดปรากฏการณ์ไอเจ (Auger effect) จากการกระตุ้น Ar K

การเกิดปรากฏการณ์ไอเจ(Auger effect) จะเป็นเช่นเดียวกับแผนภาพ (b),(c) และ (d) แต่เนื่องจากว่าพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาของ Ar K_{α} พร้อมกับพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าระดับชั้นพลังงานของโครงสร้างอะตอมที่ผ่านจึงทำให้เกิดการกระตุ้นอีกจะเรียกผลการกระตุ้นครั้งนี้ว่า "Auger electron"

ดังนั้นการเลือกใช้หัววัดรังสีชนิดพรอพอซันเนล(Proportional counter) ในระบบ WDXRFs นี้ จะเหมาะสมกับการวัดความยาวคลื่นของธาตุตั้งแต่ Be-Mo (เบริเลียมถึงโมลิบดีนัม) ถ้าสูงกว่า Mo แล้วควรเลือกใช้หัววัดรังสีซินทิลเลชัน(Scintillation counter) ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

ข. หัววัดรังสีซินทิลเลชัน (Scintillation counter)

หัววัดรังสีแบบซินทิลเลชันจะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือผลึกซินทิลเลชัน (Scintillation) และหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) จะกล่าวถึงรายละเอียดได้ดังนี้

ผลึกซินทิลเลชัน (Scintillation) หรือซินทิลเลเตอร์ (Scintillator) หรือฟอสฟอรัส(Phosphor) หมายถึงผลึกที่เกิดการเรืองแสง (visible-light photon) เมื่อได้รับโฟตอนรังสีเอกซ์ ตกกระทบสารที่ใช้ทำเป็นซินทิลเลเตอร์นั้นอาจจะเป็นทั้งอินทรีย์ (inorganic) และอินทรีย์ (organic) และควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ต้องมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงเพียงพอและความหนาที่เหมาะสมกับการตกกระทบของรังสีพลังงานสูง

- อัตราส่วนพลังงานของแสงโฟตอนช่วงที่ตามองเห็นกับโฟตอนรังสีเอกซ์มีค่าค่อนข้างสูง

- การเรืองแสงที่เกิดขึ้นจะต้องพอดีกับความไว (sensitivity) ของโฟโตคาโทด

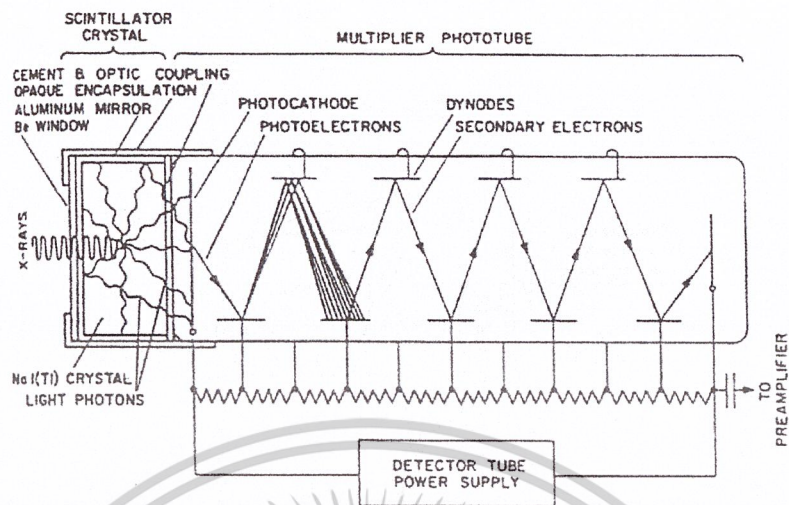
(photocathode) ในส่วนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube)

- ผลึกนั้นควรมีความสามารถส่งดูการเรืองแสงของตัวเองได้

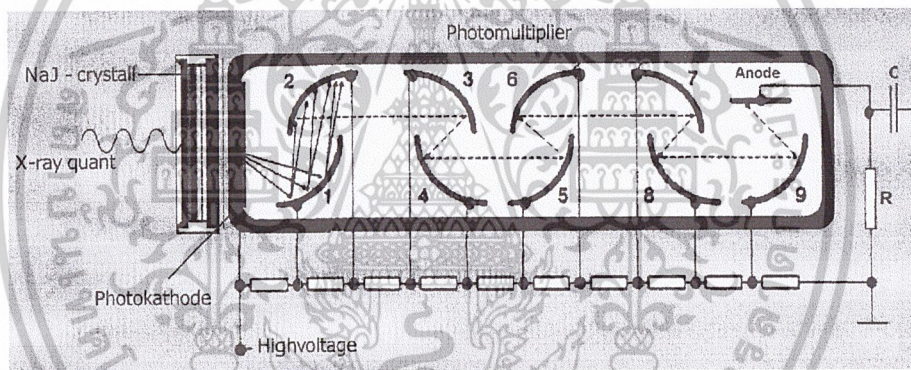
- การสะท้อนของผลึกต้องมีสัมประสิทธิ์ภาพที่แน่นอนจนกว่าจะมีการเรืองแสงส่งไปยัง โฟ

โตคาโทด(photocathode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีซินทิลเลชันแบบทั่วไป



ข แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีซินทิลเลชันของ WDXRFS Model SRS3400 AXS

รูปที่ 2.15 แสดงภาพไดอะแกรมของหัววัดรังสีซินทิลเลชัน

ในที่นี้ผลึกที่จะกล่าวถึงก็คือโซเดียมไอโอดีนทาลเลียม(NaI(Tl)) ซึ่งโซเดียมไอโอดีน (NaI) จะเป็นผลึกเดี่ยว(Single crystal) มีสีขาว แต่ถ้าหากเกิดการดูดความชื้นจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองทำให้หมดสภาพเป็นสารเรืองแสง ส่วนทาลเลียม(Tl) ที่เติมเข้าไปในผลึกเดี่ยวจะมีหน้าที่ในการจับอิเล็กตรอน(Trap electron) เมื่อโฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบกับผลึกเดี่ยวไอโอดีนจะดูดกลืนโฟตอนรังสีเอกซ์ทำให้อยู่ในสภาวะกระตุ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงสถานะโดยมีการถ่ายเทพลังงานที่สูงเกินไปไปยังทาลเลียม(Tl) อะตอม ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงสถานะนี้จะทำให้ทาลเลียม(Tl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ระบบการวิเคราะห์ธาตุแบบแจกแจงความยาวคลื่น (WDXRF) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ได้รับจากโครงการเงินกู้ทบวงมหาวิทยาลัยนี้ พบว่าเครื่องมือชนิดนี้มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ทั้งในด้านการศึกษาค้นคว้าวิจัยด้านอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามงานวิเคราะห์ของเครื่องมือนี้จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ C-U ตามตารางธาตุ (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 แสดงตารางธาตุ

Diagram illustrating the periodic table of elements, highlighting key properties for several elements:

- Atomic number:** 35 (Bromine, Br)
- Atomic weight:** 79.90 (Bromine, Br)
- Density (g/cm³):** 3.12 (Bromine, Br)
- Spectral Line:** 20.91 (Bromine, Br)
- Energy (keV):** 20.91 (Bromine, Br)
- Biangular angles (2θ):** 20.91 (Bromine, Br)

Equations shown:

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1.24}{E(\text{keV})}$$

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

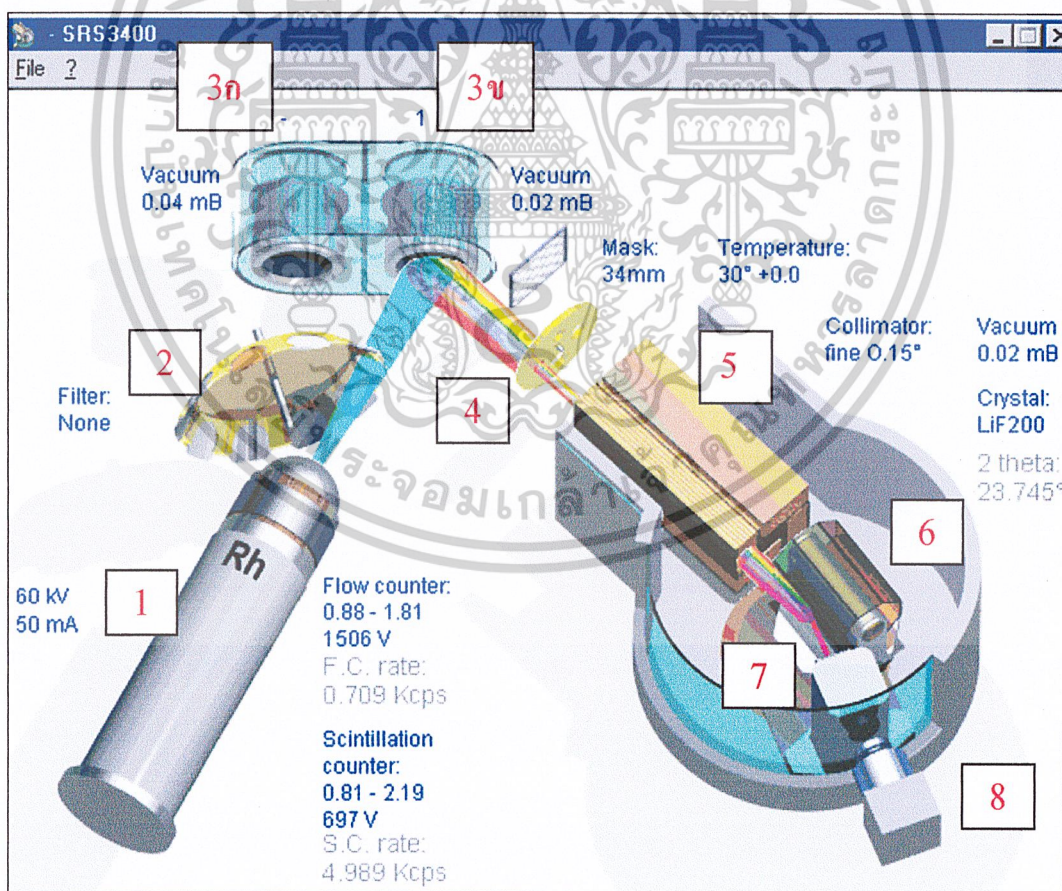
Additional elements highlighted include: H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi,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

ในการทำงานของระบบ WDXRF Model SRS3400 AXS นี้จะให้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของระบบรวมทั้งการวัดและการวิเคราะห์ ซึ่งในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) จะพบว่ามีโปรแกรมเซมิควอนติเททีฟ (Semi-Quantitative) มาช่วยการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณให้มีความสะดวกต่อการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณได้เร็วยิ่งขึ้น แต่ในความเป็นจริงของการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณจากตัวอย่าง ถ้าต้องการความถูกต้องสูง (Accuracy) จะพบว่าผลกระทบขององค์ประกอบ (Matrix Effect) ในตัวอย่างแต่ละประเภทจะไม่เหมือนกัน (รวมถึงผลการเตรียมตัวอย่าง) ทำให้โปรแกรมเซมิควอนติเททีฟ (Semi-Quantitative)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถให้ข้อมูลเชิงปริมาณได้อย่างคร่าวๆเท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการผลวิเคราะห์เชิงปริมาณที่มีความถูกต้องสูง จึงจำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจองค์ประกอบของระบบการวัดและวิเคราะห์ ซึ่งในการศึกษาโครงการนี้ จะศึกษาในส่วนของหัววัดรังสี (Detector) ของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS (หมายเลข 7,8) มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS
2. ศึกษาโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงคุณภาพ(Qualitative) และเชิงปริมาณ(Quantitative)
3. การเตรียมตัวอย่างสารมาตรฐาน
4. การเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกหัววัดรังสีต่อการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ(Qualitative) และเชิงปริมาณ(Quantitative)



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของ WDXRFS model SRS3400 AXS

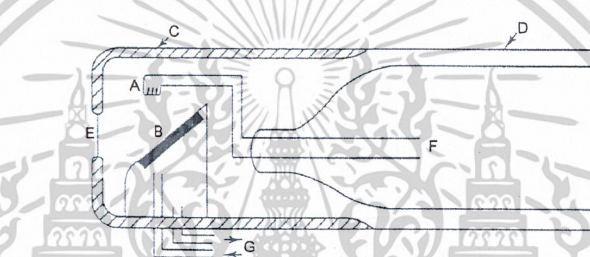
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS

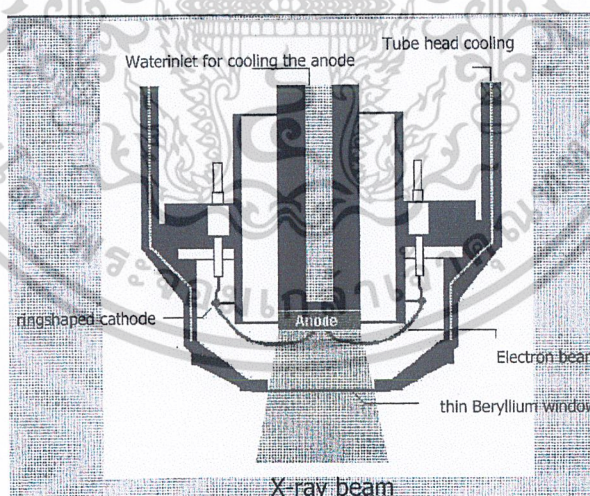
ระบบการวัดและวิเคราะห์ของ WDXRFS Model SRS3400 AXS จะเป็นดังรูปที่ 3.1 หลักการทำงานจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนการกระตุ้น (Excitation) หมายเลข 1-3, ส่วนการแยกแยะ (Dispersion) หมายเลข 4-6 และส่วนการตรวจวัด (Detection) หมายเลข 7,8

3.1.1 ส่วนการกระตุ้น จะประกอบด้วยหลอดรังสีเอกซ์, ฟิลเตอร์และตำแหน่งวางตัวอย่าง ดังจะกล่าวรายละเอียดได้ดังนี้

หมายเลข 1 : หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube)



ก. แสดงโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์แบบทั่วไป



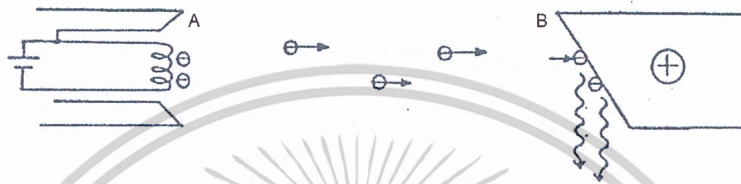
ข. แสดงโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์แบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS

รูปที่ 3.2 ข แสดงโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์

ปฐมภูมิ ซึ่งพบว่าเป็กโลหะของหลอดรังสีเอกซ์ จะทำด้วยธาตุโรเดียม (Rh) มีขนาดกำลังการใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน 4 กิโลวัตต์ ลักษณะของหลอดจะเป็นแบบหน้าต่างปลายสุด (End Window Tube) กล่าวคือ รังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะออกจากหน้าต่างปลายสุด หลอดรังสีเอกซ์นี้จะทำงานก็ต่อเมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าสูง (High Voltage) และศักย์ไฟฟ้าต่ำ (Low Voltage) โดยศักย์ไฟฟ้าต่ำที่จ่ายให้จะทำให้ อิเล็กตรอนหลุดจากไส้หลอด (Filament) และศักย์ไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้ จะไปเร่งอิเล็กตรอนที่หลุดจากไส้หลอดวิ่งมายังเป้าโลหะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray) ของระบบ



รูปที่ 3.3 การเกิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ(Primary X-ray)

อินทรีย์รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ประกอบด้วยรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray) และรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) โดยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจะเป็นธาตุใดก็ตาม ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative) จะเรียกพีก (Peak) ของธาตุนี้ว่า พีกการกระเจิง (Scattered peak)

ในการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ในระบบนี้จะต้องมีการระบายความร้อนที่เกิดขึ้น การระบายความร้อนรังสีเอกซ์จะระบายด้วยน้ำซึ่งในระบบนี้จะใช้อัตราในการไหลของน้ำ 5.2 ลิตร/นาที ด้วยอุณหภูมิประมาณ 20-23 องศาเซลเซียส

หมายเลข 2 : ฟิลเตอร์ (Filter)

ในระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS นี้จะไม่มีฟิลเตอร์ หน้าทีของฟิลเตอร์คือ จะคอยตัดหรือกรองพีกการกระเจิงที่เกิดจากหลอดรังสีเอกซ์ ตามปกติในการวิเคราะห์ธาตุ ถ้าระบบไม่มีฟิลเตอร์พีกการกระเจิงจะเกิดขึ้นจากการวัดตัวอย่างเสมอ ซึ่งผลของความเข้มแสงของพีกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับส่วนผสมของธาตุในตัวอย่าง

หมายเลข 3 : ตำแหน่งวางตัวอย่าง (Specimen Presentation)

ตำแหน่งวางตัวอย่างของระบบนี้จะถูกกำหนดให้มีตำแหน่งที่แน่นอนและให้วางตัวอย่างได้ทั้งหมด เช่น เมื่อระบบทำการวัดจะพบว่าที่ตำแหน่ง 3ก และ 3ข มีความแตกต่างกันของสภาวะสุญญากาศ โดยที่ตำแหน่ง 3ก จะมีค่าความความดันในสภาวะสุญญากาศที่สูงกว่าตำแหน่ง 3ข เสมอ โดยตำแหน่ง 3ข มีค่า 0.02 mbar แนวทางเดินของลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็กซ์ฟลูตียูมิ (รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว) จะอยู่ตรงกลางพื้นที่ของตัวอย่างเสมอ และมุมที่เกิดขึ้น (Take-of Angle) ระหว่างลำแสงทั้งสองปกติ จะมีมุมระหว่าง 30-45 องศา และมุมของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจากจุดศูนย์กลางของลำรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ จะมีมุมเท่ากับ 90 องศาเสมอ

3.1.2 ส่วนการແจกแฉง จะประกอบด้วยแนวทางเดินของรังสี (Radiation Path) คอลลิเมเตอร์และผลึก ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

หมายเลข 4 : แนวทางเดินของรังสี

รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างอาจถูกดูดกลืนหรือความเข้มรังสีลดลงไป ซึ่งจะมีผลต่อการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวจากตัวอย่างไปหาวัดรังสี ทั้งนี้เนื่องมาจากบรรยากาศที่ถูกระบุไว้ในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ดังนั้นในการออกแบบระบบนี้จะอยู่ในสถานะของฮีเลียม ซึ่งสถานะนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 Å หรือ 4 Å ขึ้นไป ถ้าเป็นสถานะสุญญากาศจะเหมาะสำหรับธาตุที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 Å ขึ้นไป

หมายเลข 5 : คอลลิเมเตอร์ (Collimator)

คอลลิเมเตอร์ทำหน้าที่จำกัดทางเดินของลำแสงระหว่างตัวอย่างกับผลึก ซึ่งเป็นการจำกัดฟลักของธาตุตัวอย่างโดยตรง และยังทำหน้าที่ในการลดแบ็กกราวนด์ (Background) และความเข้มของลำแสงอีกด้วย โดยระบบจะออกแบบให้มีคอลลิเมเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด คือ 0.077°, 0.15°, 0.46°, 0.93°, 1.16°, 1.54° ซึ่งในการทำงานของระบบในขณะวัดจะเลือกเปลี่ยนตามความเหมาะสมกับธาตุในตัวอย่าง

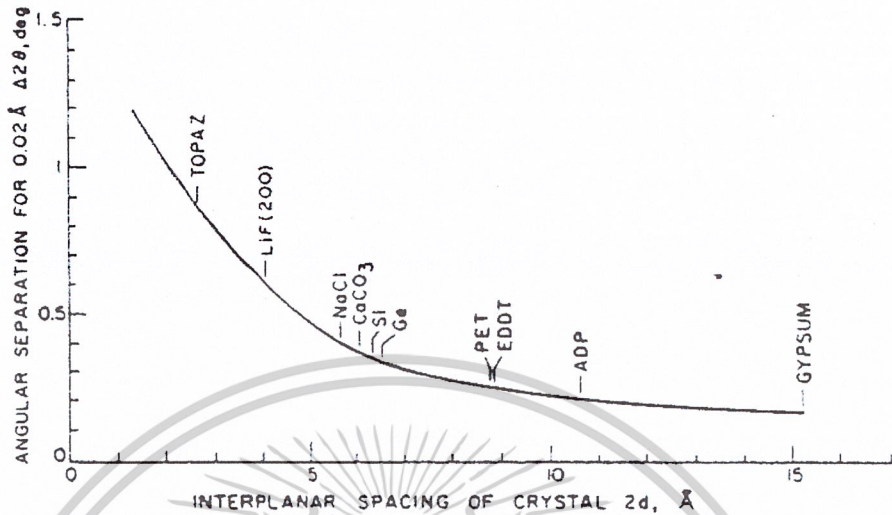
หมายเลข 6: ผลึก (Crystal)

ผลึกทำหน้าที่ในการແจกแฉงความยาวคลื่นของธาตุในตัวอย่าง โดยระบบนี้จะทำการพิจารณาค่าการແจกแฉงของระบบ (Resolution) จะพบว่าขึ้นอยู่กับผลึกที่ใช้วัดนั่นเอง โดยตำแหน่งนี้จะถูกออกแบบตามกฎของแบรกก์ จะเขียนความสัมพันธ์ของสมการคือ

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (3.1)$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ในระบบจะมีผลึกให้เลือก ซึ่งในระบบนี้จะมีอยู่ 4 ชนิด คือ LiF (200) , LiF (220) , PET และ OVO -55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม $\Delta 2\theta$ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึก $2d$

การแจกแจง (Resolution) ของระบบจะขึ้นอยู่กับผลึก โดยการกระจายของรังสี ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึก d ที่ทำการเลือกสำหรับการวิเคราะห์ จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ค่าการแจกแจงของผลึกในระบบได้ดังนี้

จากสมการ

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

ถ้าดิฟเฟอเรนเชียล สมการแบรกก์ก็จะได้ค่าการแจกแจงของผลึกคือ

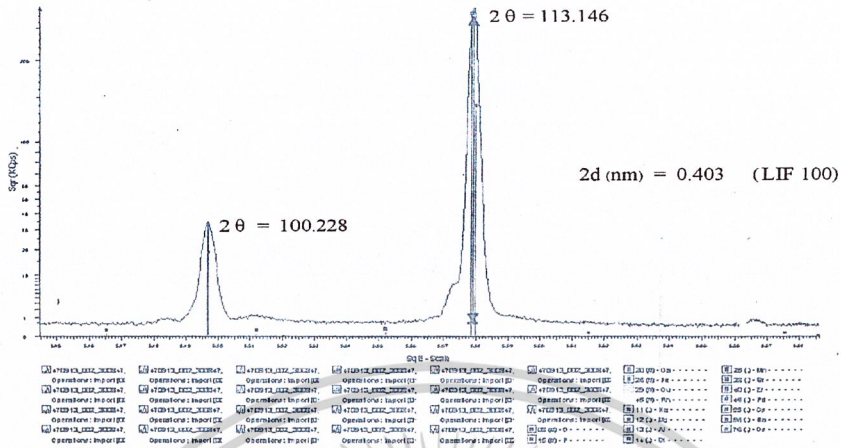
$$d(2d \sin \theta) = d(n\lambda)$$

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

$$d\theta / d\lambda = n / 2d \cos \theta \quad (3.2)$$

จากสมการ (3.2) เป็นค่ากำลังการกระจายของรังสีเฉพาะตัว ซึ่งจะพบค่า $d\theta / d\lambda$ เพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อระยะห่างระหว่างระนาบผลึกลดลงโดยผลึกแต่ละชนิดจะมีผลต่อมุม (2θ) การเลี้ยวเบนความยาวคลื่นของธาตุแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงผลการวัดจาก WDXRFs

ตัวอย่างการคำนวณ จากสเปกตรัมการวัดดังรูปที่ 3.5 จะคำนวณหาตำแหน่งพีกของธาตุจากมุมที่วัดคือ $2\theta = 100.228^\circ$ และ $2\theta = 113.146^\circ$ โดยใช้ผลึก LiF (100) มีค่า $2d = 0.403$ nm. จากสมการ 3.1

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

$$2\theta = 100.228^\circ$$

$$\theta = 50.114^\circ$$

$$\lambda = 2d \sin \theta / n \quad \text{เมื่อ } n = 1$$

$$= (0.403 \times 10^{-9} \text{ m})(\sin 50.114)$$

$$= 3.09 \text{ \AA}$$

$$E \text{ (keV)} = 12.4 / 3.09 \text{ \AA}$$

$$= 4.01 \approx 4 \text{ keV}$$

ซึ่งเป็นพีกของของธาตุ Ca k_β

และมุม

$$2\theta = 113.146^\circ$$

$$\theta = 56.573^\circ$$

$$\lambda = (0.403 \times 10^{-9} \text{ m})(\sin 56.573)$$

$$= 3.36 \text{ \AA}$$

$$E \text{ (keV)} = 12.4 / 3.36 \text{ \AA}$$

$$= 3.69 \text{ keV}$$

ซึ่งเป็นพีกของของธาตุ Ca k_α

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ส่วนการตรวจวัด

แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 องค์ประกอบ คือหัววัดรังสี (Detector) และระบบการวัด (Measurement System) โดยทั่วไประบบการวัดประกอบด้วย พรีแอมพลิไฟเออร์ (Preamplifier), พัลส์ไฮซีเล็คเตอร์ (Pulse-Height Selector), เรตมิเตอร์ (Ratemeter) , เรคอร์ดเดอร์ (Recorder) และสเกลาร์และไทม์เมอร์ (Scalar and Timer) ซึ่งในโครงการพิเศษนี้จะขอกกล่าว เฉพาะหัววัดรังสี

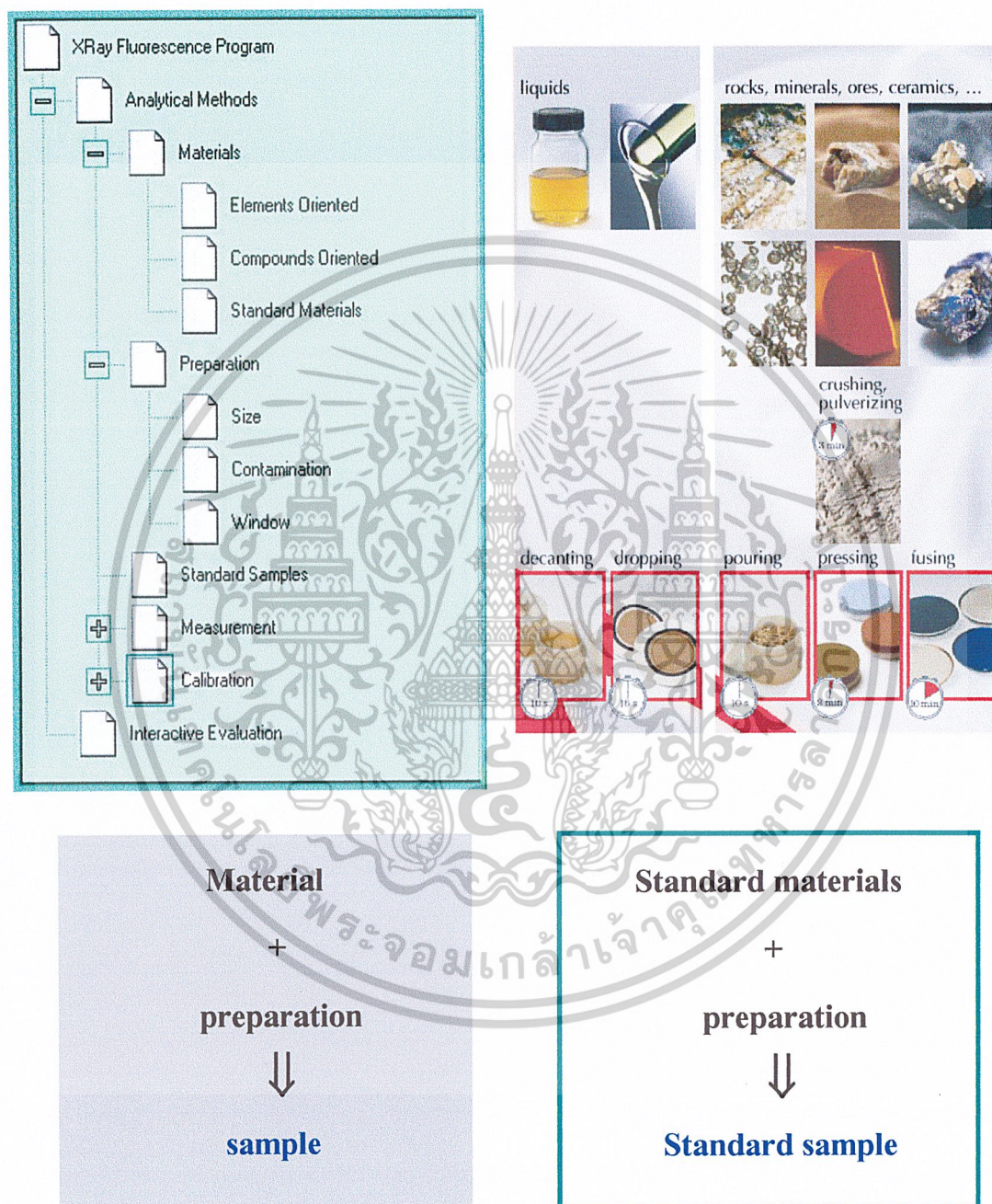
หมายเลข 7 : หัววัดรังสีชนิดโฟลเคาน์เตอร์ (FC)

หัววัดรังสีชนิด FC จากคู่มือการทำงานพบว่าหัววัดรังสีชนิด FC จะออกแบบให้วัด อยู่ในย่านพลังงาน $0.2 \text{ keV} < E < 8 \text{ keV}$ หรือ $2\theta = 4$ และ 148° (Soft Radiation) หัววัดรังสี ชนิด FC จัดการไบแอสหัววัดนี้ด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงบวก (+HV) ด้วยขนาด 1.818 kV. โดยสามารถจ่ายศักย์ไฟฟ้าได้ที่ค่า 0.4 – 2.3 kV.

หมายเลข 8 : หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชั่นแคาน์เตอร์ (SC)

จากคู่มือการทำงานของระบบ หัววัดรังสี SC จะออกแบบให้วัดอยู่ในย่านพลังงาน $E > 4 \text{ keV}$. หรือ $2\theta \geq 90^\circ$ (Hard Radiation) โดยหัววัดรังสี SC จะมีการจัดไบแอสให้หัววัดทำงาน ด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงบวกขนาด 0.4 -1.4 keV.

3.2 ศึกษาโปรแกรมควบคุมการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

ในการเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์ของหัววัดรังสี ระหว่างหัววัดรังสี FC และ SC นั้นจะทำการเปรียบเทียบพลังงานในช่วง $4 \text{ keV} < E < 8 \text{ keV}$ ซึ่งพบว่าย่านพลังงานที่เปรียบเทียบจะเป็นย่านตั้งแต่ K – Cu ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างจะเลือกตัวอย่างที่เป็นสารมาตรฐาน (Standard Sample) โดยจะพิจารณาสารมาตรฐานที่มีผลกระทบของค้ประกอบ (Matrix Effect) ของการวัดประเภทผง (Powder) การเตรียมตัวอย่างมีขั้นตอนดังนี้

ธาตุที่จะทำมาวิเคราะห์คือ K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu ธาตุทั้งหมดนี้จะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ KNO_3 , Ca(OH)_2 , TiO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3 , CuO ตามลำดับ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบหัววัดรังสีทั้ง 2 ชนิด เราจึงใช้ธาตุต่างๆในการวิเคราะห์ด้วยปริมาณเท่ากันคือธาตุละ 0.2 กรัม แต่สารตัวอย่างอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ดังนั้นจะมีการคำนวณหาปริมาณธาตุที่เตรียมเป็นตัวอย่างมาตรฐานได้ดังนี้

1. ธาตุโพแทสเซียม(K) จากสารประกอบออกไซด์ KNO_3

$$\frac{\text{molecularmassKNO}_3}{\text{molecularmassK}} = \frac{\text{weight(g)KNO}_3}{\text{weight(g)K}}$$

$$\frac{39.18 + 14.00 + 3(16.00)}{39.18} = \frac{\text{weight(g)KNO}_3}{0.2\text{g}}$$

$$\frac{101.08}{39.18} = \frac{\text{weight(g)KNO}_3}{0.2\text{g}}$$

น้ำหนัก $\text{KNO}_3 = 0.5170$ กรัม

ดังนั้นต้องใช้ $\text{KNO}_3 = 0.5170$ กรัม จึงจะมี K อยู่ 0.2 กรัม

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

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

$$\frac{40.08 + 2(16 + 1)}{40.08} = \frac{\text{weight(g)Ca(OH)}_2}{0.2\text{g}}$$

$$\frac{74.06}{40.08} = \frac{\text{weight(g)Ca(OH)}_2}{0.2\text{g}}$$

น้ำหนัก $\text{Ca(OH)}_2 = 0.3696$ กรัม

ดังนั้นต้องใช้ $\text{Ca(OH)}_2 0.3696$ กรัม จึงจะมี Ca อยู่ 0.2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ธาตุไททาเนียม(Ti) จากสารประกอบออกไซด์ TiO_2

$$\frac{\text{molecularmass}TiO_2}{\text{molecularmass}Ti} = \frac{\text{weight}(g)TiO_2}{\text{weight}(g)Ti}$$

$$\frac{47.90 + 2(16.00)}{47.90} = \frac{\text{weight}(g)TiO_2}{0.2g}$$

$$\frac{79.88}{47.90} = \frac{\text{weight}(g)TiO_2}{0.2g}$$

$$\text{น้ำหนัก } TiO_2 = 0.3335 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้ TiO_2 0.3335 กรัม จึงจะมี Ti อยู่ 0.2 กรัม

4. ธาตุแมงกานีส(Mn) จากสารประกอบออกไซด์ MnO_2

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

$$\frac{54.94 + 2(16.00)}{54.94} = \frac{\text{weight}(g)MnO_2}{0.2g}$$

$$\frac{86.72}{54.94} = \frac{\text{weight}(g)MnO_2}{0.2g}$$

$$\text{น้ำหนัก } MnO_2 = 0.3164 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้ MnO_2 0.3164 กรัม จะมี Mn อยู่ 0.2 กรัม

5. ธาตุเหล็ก(Fe) จากสารประกอบออกไซด์ Fe_2O_3

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

$$\frac{2(55.84) + 3(16.00)}{55.84} = \frac{\text{weight}(g)Fe_2O_3}{0.2g}$$

$$\frac{159.65}{55.84} = \frac{\text{weight}(g)Fe_2O_3}{0.2g}$$

$$\text{น้ำหนัก } Fe_2O_3 = 0.5718 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้ Fe_2O_3 0.5718 กรัม จึงจะมี Fe อยู่ 0.2 กรัม

6. ธาตุคอปเปอร์(Cu) จากสารประกอบออกไซด์ CuO

$$\frac{\text{molecularmass}CuO}{\text{molecularmass}Cu} = \frac{\text{weight}(g)CuO}{\text{weight}(g)Cu}$$

$$\frac{63.55 + 16.00}{63.55} = \frac{\text{weight}(g)CuO}{0.2g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{79.55}{63.55} = \frac{\text{weight}(g)\text{CuO}}{0.2g}$$

น้ำหนัก CuO = 0.2503 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ CuO = 0.2503 กรัม จึงจะมี Cu อยู่ 0.2 กรัม

เมื่อคำนวณสารประกอบออกไซด์ดังกล่าวแล้วจะได้ธาตุที่เราต้องการในปริมาณที่เท่ากัน
ธาตุละคือ 0.2 กรัม โดยมีปริมาณสารตัวอย่างรวมเท่ากับ 2.3586 กรัม

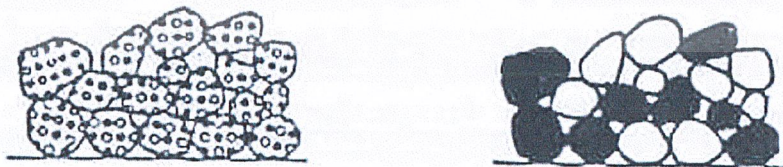
ปริมาณสารตัวอย่างรวมเท่ากับ 2.3586 กรัม มีธาตุที่ต้องการธาตุละ 0.2 กรัม

ถ้าปริมาณสารตัวอย่างรวมเท่ากับ 100 % จะมีธาตุที่ต้องการธาตุละ $\frac{0.2}{2.3586} \times 100 = 8.47\%$

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ในระบบ WDXRF นั้นเราจำเป็นต้องใส่กรดบอริก
เพื่อเป็นตัวช่วยในการยึดเหนี่ยวสารทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยที่สารตัวอย่างทั้งหมดต้องรวมให้ได้ 5
กรัม เพื่อใส่ด้วยออกซิเจน (ความจุ 5 กรัม) ดังนั้นจึงต้องใส่กรดบอริก $5 - 2.3586 = 2.6414$ กรัม
จึงจะได้ว่าไดลูท (dilute) กรดบอริก (H_2BO_3) เป็น 1.89 เท่า โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Dilute } \text{H}_2\text{BO}_3 &= \frac{\text{Total weight}}{\text{weight } \text{H}_3\text{BO}_3} = \frac{5g}{2.6414g} \\ &= 1.89 \text{ เท่า} \end{aligned}$$

สารประกอบออกไซด์ทั้ง 6 ชนิดก่อนจะชั่งจะต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 75°C เพื่อไล่
ความชื้น หลังจากนั้นนำไปชั่งตามที่คำนวณข้างต้น ต่อจากนั้นจะนำไปบดเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน
การบดสารตัวอย่างก็ เพื่อลดขนาดของอนุภาคและลดการกระจายของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่าง
กันดังรูปที่ 3.6



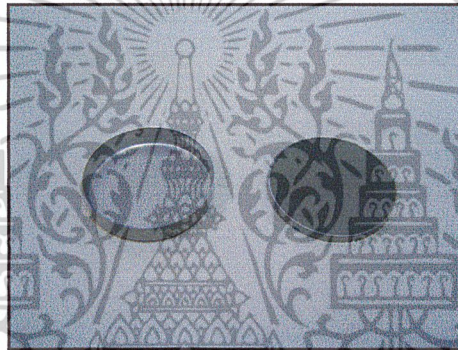
รูปที่ 3.6 ซ้าย – เป็นตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน

ขวา – เป็นตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

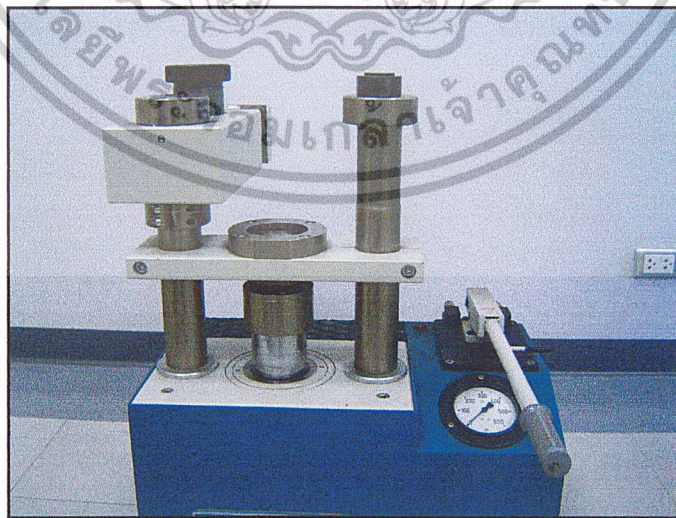
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออบสารตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันแล้วต้องทำการอัดตัวอย่าง ประโยชน์ของการอัดแน่น ก็เพื่อให้ตัวอย่างสามารถคงตัวอยู่ได้โดยไม่ต้องอาศัยฟิล์มรอง อีกประการหนึ่งก็คือรังสีเอ็กซ์ เฉพาะตัวที่พลังงานต่ำจะไม่ถูกดูดกลืนจากตัวอย่างและไม่มีฟลักที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากตัวอย่าง ปรากฏในสเปกตรัม นอกจากนี้การอัดแน่นจะมีผลทำให้ความไวเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาแน่น ดังนั้นวิธีเตรียมตัวอย่างแบบการอัดแน่นนี้จึงมีความเหมาะสมและสะดวกต่อการเตรียม ตัวอย่างซึ่งจะเกิดช่องว่างน้อยที่สุด

โดยทั่วไปในการอัดแผ่นตัวอย่างจะนิยมใช้วงอะลูมิเนียมหรือถ้วยอะลูมิเนียม เนื่องจากง่าย ต่อการวัดและยังป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนในระหว่างการอัดด้วย



ก ถ้วยอะลูมิเนียม



ข เครื่องอัดสารตัวอย่าง

รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของห้วงวัดรังสี สำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์ค่าตั้ง
ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ จะแสดงวิธีการทดสอบการวัดและวิเคราะห์ของห้วงวัดรังสีของ
ระบบ จากการเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานด้วยการปรับเปลี่ยนตัวแปร ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่3.2 แสดงวิธีการทดสอบการวัดและวิเคราะห์

ตอนที่	แรงดันในการ อัดตัวอย่าง	เวลาในการบด ตัวอย่าง	ชนิดของห้วงวัด		
			FC	SC	วิธีปกติ
1	variable	fixed	ใช้	ใช้	ใช้
2	fixed	variable	ใช้	ใช้	ใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์ของหัววัดรังสีชนิด FC และ SC ของระบบ WDXRFS Mode SRS3400 AXS ได้ทำการเตรียมตัวอย่างสารมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการวัดและวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยจะมีขั้นตอนดังนี้

4.1 การทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวิเคราะห์ของระบบ

การทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวัดวิเคราะห์ของระบบโดยใช้สารมาตรฐานที่มากับระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS สารมาตรฐานนี้คือ STG2 – Glass verification Test โดยจะมีการปรับเทียบมาตรฐานการวัดวิเคราะห์ของระบบ ในวันที่ติดตั้งระบบวันที่ 11 มกราคม พ.ศ.2543 (11/1/2000) ดังตารางที่ 4.1 และผลทดสอบการปรับเทียบมาตรฐานการวิเคราะห์ของระบบ ณ.วันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 จะแสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงการปรับเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS โดยใช้สารมาตรฐาน STG2 – Glass Verification Test ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างบริษัท Bruker AXS (ผู้ผลิต) กับสจล.(ผู้ปฏิบัติงาน) ณ.วันที่ 11/1/2000

STG2-Glass Verification

Test Date 11/1/2000

Compound	Expected range(%)	Results, %(measured at)		max.allowed deviation(%abs)	actual deviation(%abs)
		BrukerAXS	Customer		
Na ₂ O	13.00-16.50	15.800	15.500	± 0.50	15.300-16.300
Al ₂ O ₃	0.60-1.65	1.600	1.650	± 0.05	1.550-1.650
SiO ₂	66.00-74.50	73.700	74.200	± 0.70	73.000-74.400
SO ₃	0.70-1.30	1.210	1.180	± 0.05	1.160-1.260
Cl	0.20-0.38	0.318	0.337	± 0.02	0.308-0.348
K ₂ O	4.00-6.00	4.980	4.980	± 0.05	4.930-5.030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Compound	Expected range(%)	Results,%(measured at)		max.allowed deviation(%abs)	actual deviation(%abs)
		BrukerAXS	Customer		
CaO	4.00-6.00	5.160	5.170	± 0.05	5.110-5.210
TiO ₂	0.01-0.15	0.035	0.018	± 0.01	0.025-0.045
Fe ₂ O ₃	0.01-0.15	0.065	0.086	± 0.01	0.055-0.070
SrO ₂	1.40-2.35	1.380	1.370	± 0.05	1.330-1.430
Sb ₂ O ₃	0.20-0.85	0.202	0.180	± 0.05	0.152-0.252

Sample	STG-2 glass reference sample
Sample holder mask	34 mm.
Measurement routine	standard less XRF routine

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดและวิเคราะห์ของระบบ ณ.วันที่ 3/02/2005

Measuring Program	Parameter	Compound						
		Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO
STG-Check (automatic)	Spr(KCps)	49.90	12.40	552.80	7.80	5.10	114.40	94.80
	Concentration%	14.70	1.68	74.70	1.14	0.30	5.09	5.28
HS-min-FC	Spr(KCps)	-	-	-	-	-	121.60	97.90
	Concentration%	-	-	-	-	-	4.72	5.65
HS-min-SC	Spr(KCps)	-	-	-	-	-	-	-
	Concentration%	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measuring Program	Parameter	Compound						
		TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SrO	Sb ₂ O ₃	Com-ton	Ray-Leigh	Sum %
STG-Check (automatic)	Spr(KCps)	0.60	4.90	664.10	41.60	1.12	1.37	104.5
	Concentration%	0.0303	0.0708	1.380	0.211			
HS-min-FC	Spr(KCps)	0.70	-	-	-	0.45	0.88	10.42
	Concentration%	0.0451	-	-	-			
HS-min-SC	Spr(KCps)	-	-	-	-	0.00	-	0.00
	Concentration%	-	-	-	-			

4.2 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพของสารมาตรฐานตัวอย่างของหัววัดรังสี FC และ SC

4.2.1 วิธีการทดสอบ

1) เตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร ที่ความดัน 100 kN เวลาที่บด 1.5 นาที ซึ่งประกอบด้วยธาตุ K, Ca, Ti, Mn, Fe และ Cu เตรียมปริมาณธาตุละ 0.2 กรัม.

2) คำนวณหาค่ามุมพีคของแต่ละธาตุที่เกิดขึ้นจากสมการของแบรกก์

3) วางสารตัวอย่างมาตรฐานเพื่อทำการวัดและวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพด้วยการเลือกหัววัดรังสี FC ด้วยโปรแกรม HS-min-FC หัววัดรังสี SC ด้วยโปรแกรม HS-min-SC และวัดแบบอัตโนมัติ (ตามปกติของการทำงานของหุ่นยนต์) ด้วยโปรแกรม HS-min-BOTH ดังแสดงผลวิเคราะห์ ดังรูปสเปกตรัมที่ 4.1 – 4.3

4) เปรียบเทียบความเข้มรังสีของแต่ละธาตุ เมื่อเลือกหัววัดรังสี FC และ SC ดังตารางที่ 4.3 พร้อมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.4

4.2.2 ผลการทดสอบการวัดและวิเคราะห์

1) การคำนวณหาค่ามุมพีค(Peak) ของแต่ละธาตุในเชิงคุณภาพจากสมการแบรกก์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ธาตุของโครงการพิเศษนี้ได้ใช้ผลึก LiF(200) ในการแจกแจงความยาวคลื่นซึ่งมีค่า $2d = 0.403 \text{ nm}$. นอกจากนี้ระบบเป็นแบบเฟิร์สทอเดอร์เดอริเฟลคชัน(First order reflection) คือ $n = 1$ และเราสามารถหาค่าความยาวคลื่น(λ) ได้จากสมการ

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

ซึ่ง $E(\text{keV})$ คือค่าพลังงานของธาตุแต่ละชนิด โดยมีค่าแต่ละระดับชั้นพลังงานดังตารางที่ 3.1

- 1.1) ธาตุโพแทสเซียม(K) ระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 3.3 keV
และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 3.6 keV

หาค่าความยาวคลื่น

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

จะได้ว่า

$$\lambda_{K_{\alpha_1}} = 3.743 \text{ \AA}$$

และ

$$\lambda_{K_{\beta_1}} = 3.444 \text{ \AA}$$

จากสมการแบรกก์

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

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

จะได้ว่า

$$\theta_{K_{\alpha_1}} = 68.246^\circ$$

$$2\theta_{K_{\alpha_1}} = 136.492^\circ$$

และ

$$\theta_{K_{\beta_1}} = 58.715^\circ$$

$$2\theta_{K_{\beta_1}} = 117.429^\circ$$

- 1.2) ธาตุแคลเซียม(Ca) ระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 3.7 keV
และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 4.0 keV

หาค่าความยาวคลื่น

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

จะได้ว่า

$$\lambda_{K_{\alpha_1}} = 3.360 \text{ \AA}$$

และ

$$\lambda_{K_{\beta_1}} = 3.100 \text{ \AA}$$

จากสมการแบรกก์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะได้ว่า $\theta_{K\alpha_1} = 56.486^\circ$

$2\theta_{K\alpha_1} = 112.972^\circ$

และ $\theta_{K\beta_1} = 50.285^\circ$

$2\theta_{K\beta_1} = 100.570^\circ$

1.3) ธาตุไททาเนียม(Ti) ระดับพลังงานชั้น $K\alpha_1$ เท่ากับ 4.5 keV
และระดับพลังงานชั้น $K\beta_1$ เท่ากับ 4.9 keV

หาค่าความยาวคลื่น

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

จะได้ว่า

$$\lambda_{K\alpha_1} = 2.750 \text{ \AA}$$

และ

$$\lambda_{K\beta_1} = 2.530 \text{ \AA}$$

จากสมการแบรกก์

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

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

จะได้ว่า

$$\theta_{K\alpha_1} = 43.030^\circ$$

$$2\theta_{K\alpha_1} = 86.060^\circ$$

และ

$$\theta_{K\beta_1} = 38.899^\circ$$

$$2\theta_{K\beta_1} = 77.797^\circ$$

1.4) ธาตุแมงกานีส(Mn) ระดับพลังงานชั้น $K\alpha_1$ เท่ากับ 5.9 keV
และระดับพลังงานชั้น $K\beta_1$ เท่ากับ 6.5 keV

พลังงาน 5.898 keV

หาค่าความยาวคลื่น

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

จะได้ว่า

$$\lambda_{K\alpha_1} = 2.102 \text{ \AA}$$

และ

$$\lambda_{K\beta_1} = 1.908 \text{ \AA}$$

จากสมการแบรกก์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะได้ว่า $\theta_{K\alpha_1} = 31.440^\circ$

$2\theta_{K\alpha_1} = 62.878^\circ$

และ $\theta_{K\beta_1} = 28.253^\circ$

$2\theta_{K\beta_1} = 56.507^\circ$

1.5) ธาตุเหล็ก(Fe) ระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 6.4 keV
และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 7.1 keV

หาค่าความยาวคลื่น

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

จะได้ว่า

$$\lambda_{K\alpha_1} = 1.937 \text{ \AA}$$

และ

$$\lambda_{K\beta_1} = 1.746 \text{ \AA}$$

จากสมการแบรกก์

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

จะได้ว่า

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

$$\theta_{K\alpha_1} = 28.728^\circ$$

และ

$$2\theta_{K\alpha_1} = 57.455^\circ$$

$$\theta_{K\beta_1} = 25.682^\circ$$

$$2\theta_{K\beta_1} = 51.363^\circ$$

1.6) ธาตุคอปเปอร์(Cu) ระดับพลังงานชั้น K_{α_1} เท่ากับ 8.0 keV
และระดับพลังงานชั้น K_{β_1} เท่ากับ 8.9 keV

พลังงาน 8.047 keV

หาค่าความยาวคลื่น

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

จะได้ว่า

$$\lambda_{K\alpha_1} = 1.541 \text{ \AA}$$

และ

$$\lambda_{K\beta_1} = 1.393 \text{ \AA}$$

จากสมการแบรกก์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

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

$$\theta_{\kappa_{\alpha_1}} = 22.481^\circ$$

$$2\theta_{\kappa_{\alpha_1}} = 44.963^\circ$$

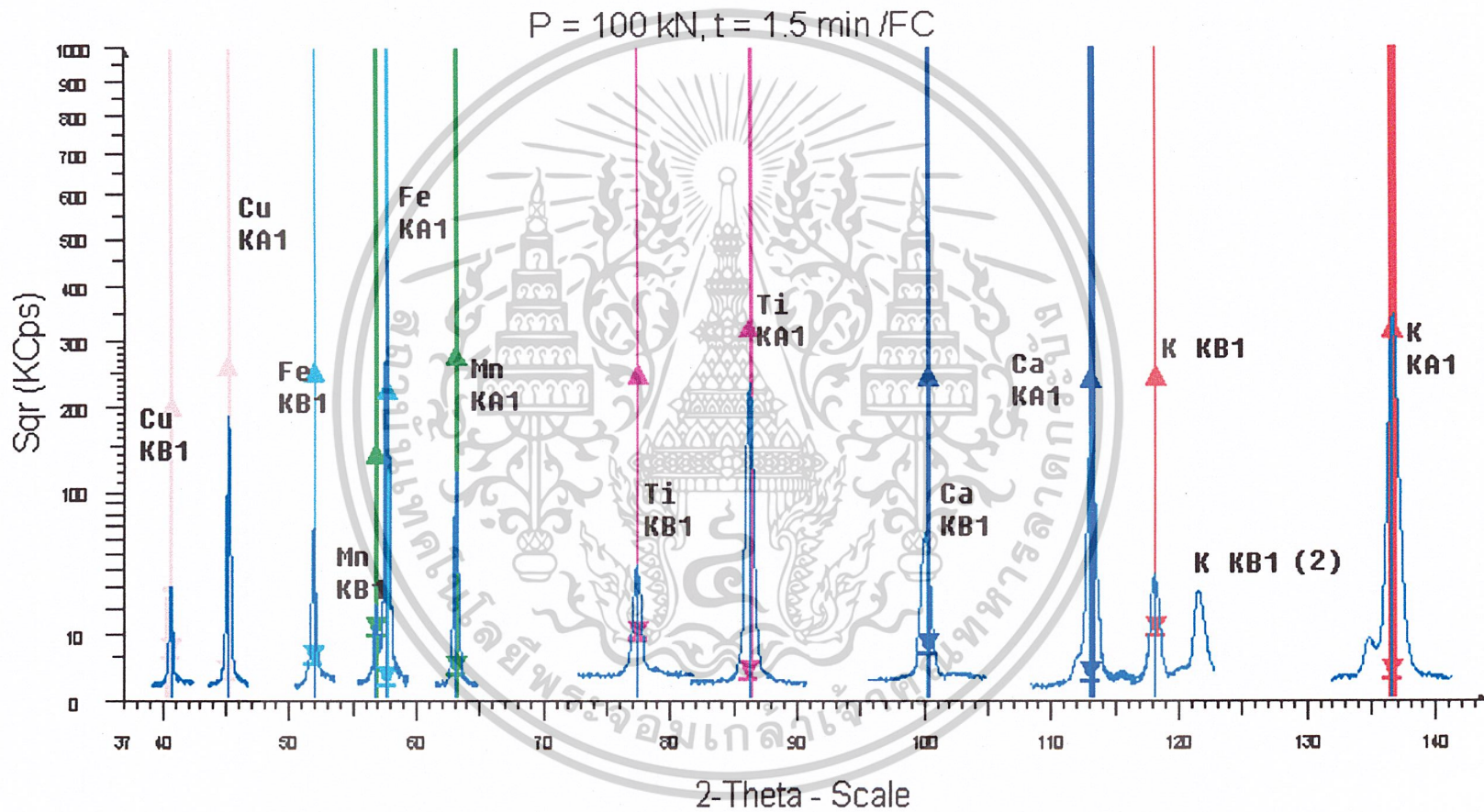
และ

$$\theta_{\kappa_{\beta_1}} = 20.226^\circ$$

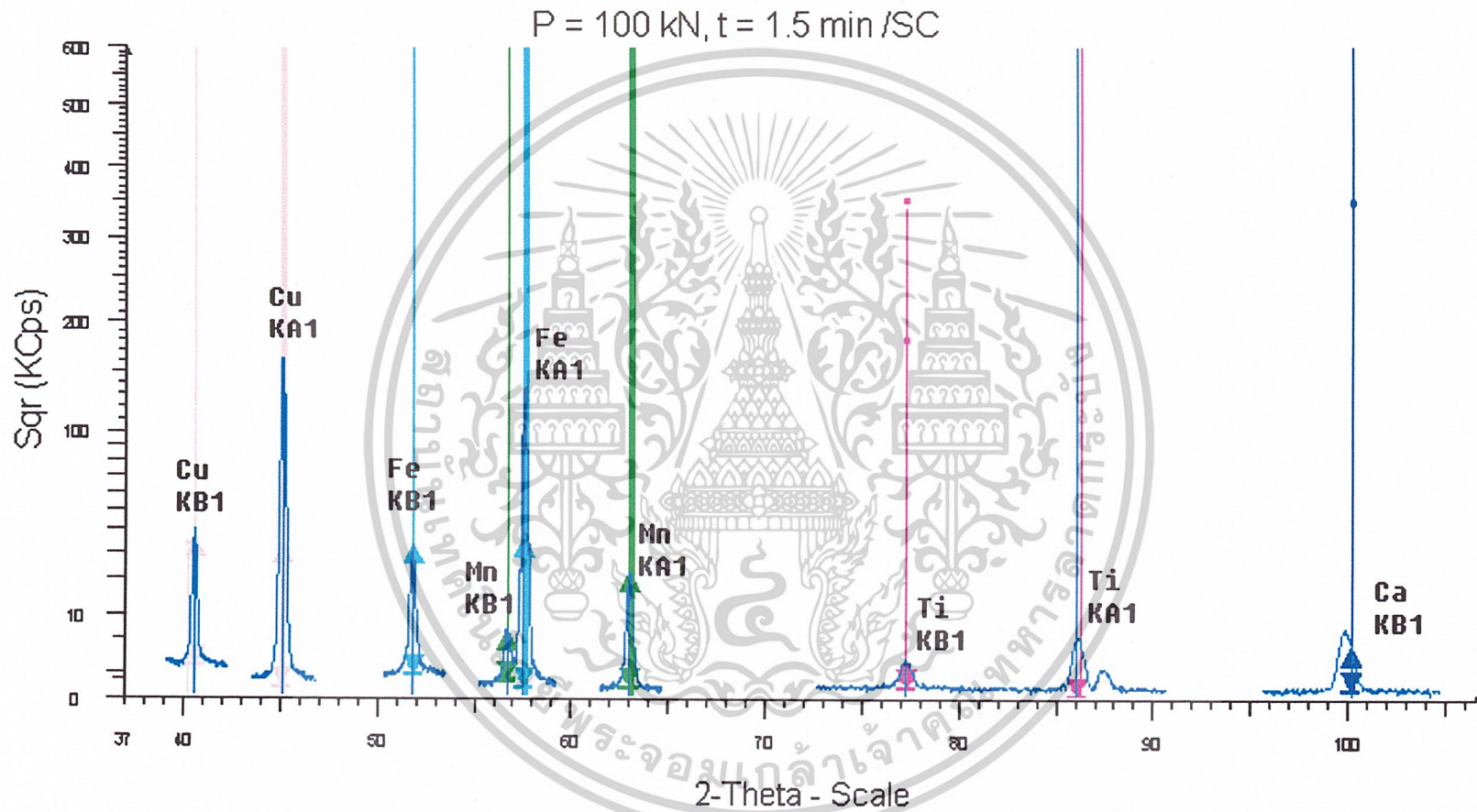
$$2\theta_{\kappa_{\beta_1}} = 40.452^\circ$$



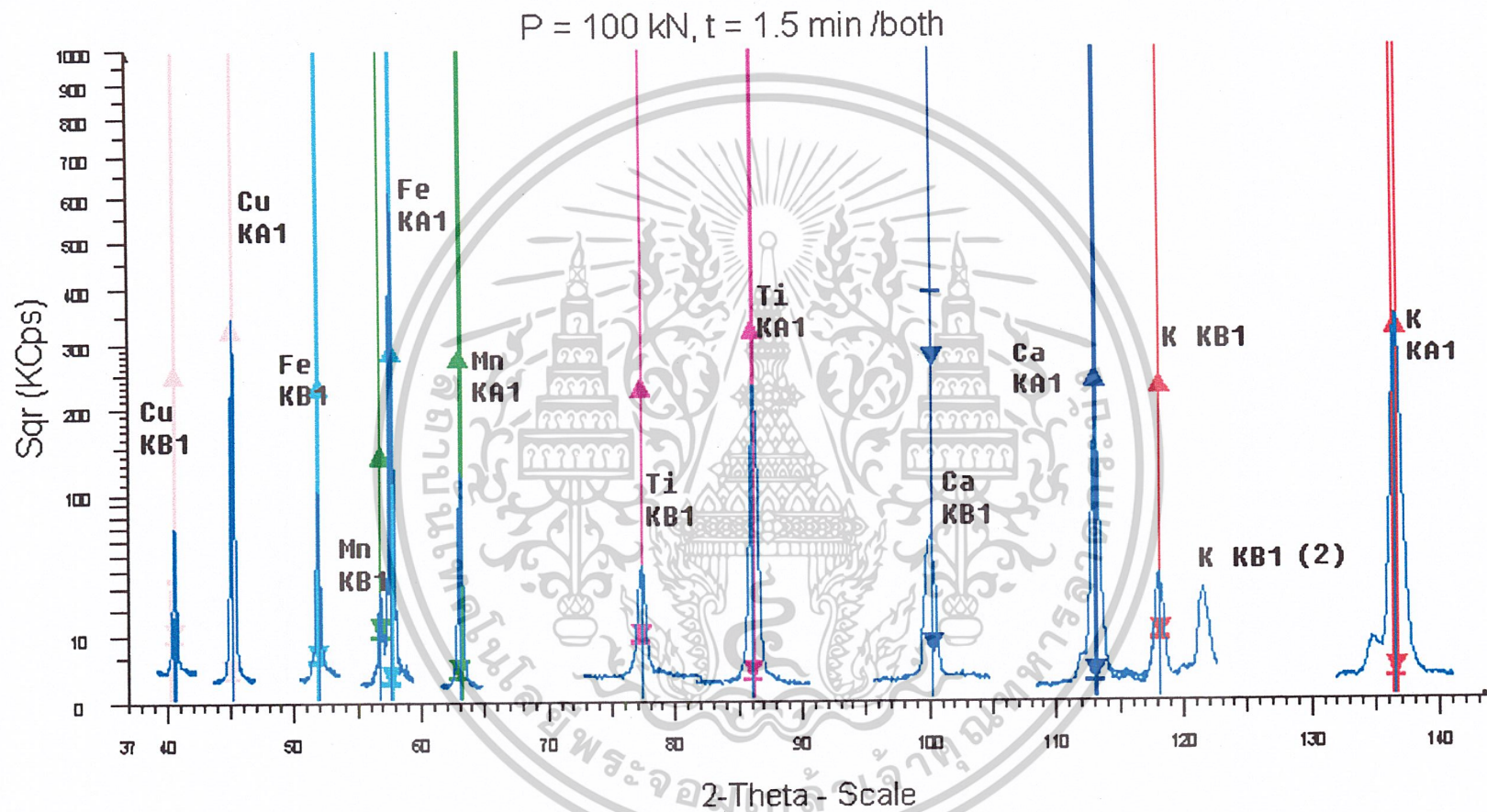
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของสารตัวอย่างมาตรฐานด้วยโปรแกรม HS-min-FC



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของสารตัวอย่างมาตรฐานค้ำยโปรแกรม HS-min-SC



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของสารตัวอย่างมาตรฐานคั่วขโปรแกรมห S-min-BOTH

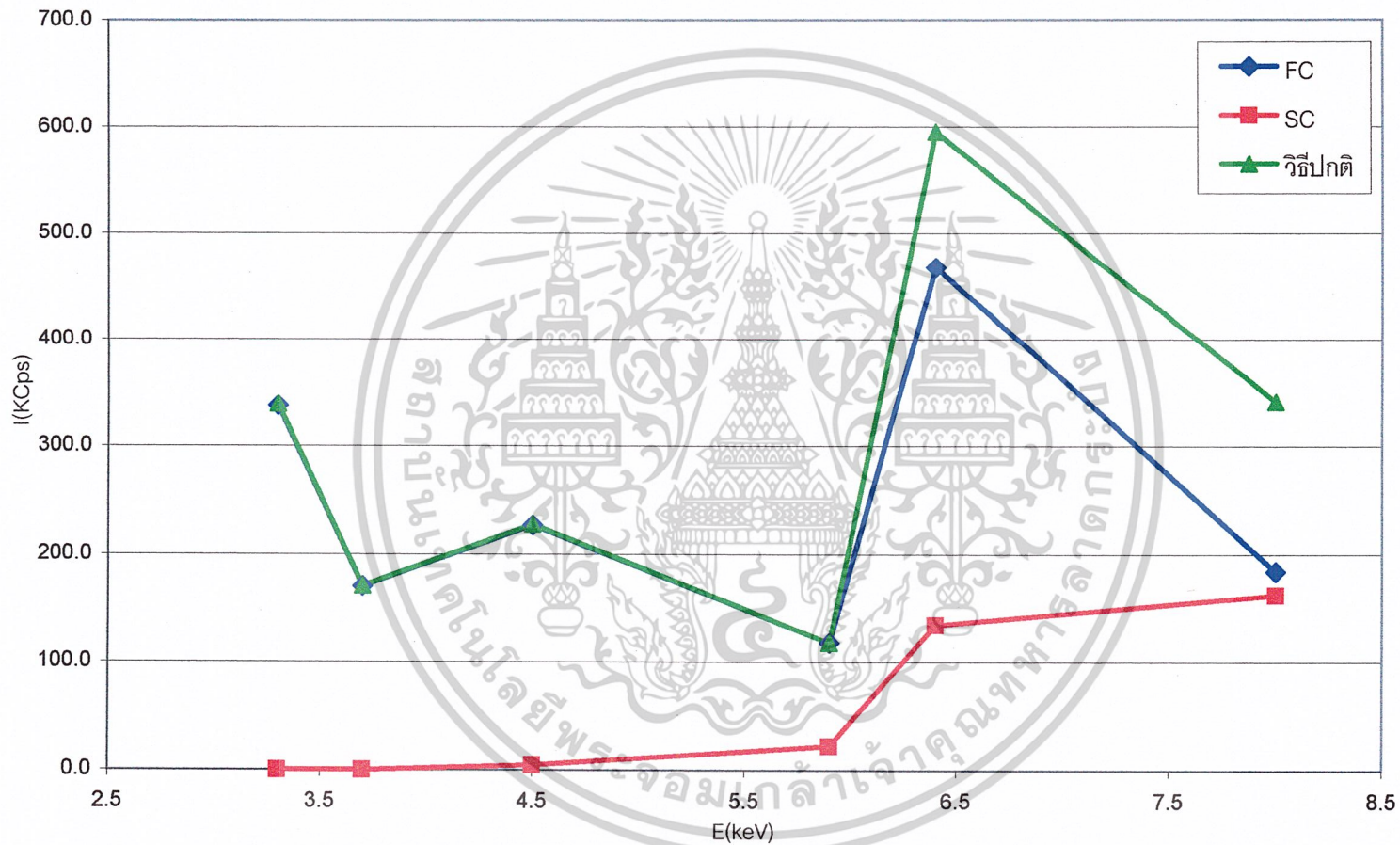
2) ผลการทดสอบเปรียบเทียบความเข้มรังสีของแต่ละธาตุในเชิงคุณภาพ เมื่อเลือกหัววัดรังสี FC และ SC ที่ความดัน 100 kN ใช้เวลาบด 1.5 นาที

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดความเข้มรังสีของแต่ละธาตุเมื่อเลือกหัววัดรังสี FC และ SC

ธาตุระดับชั้น	ความเข้มรังสี I (KCps)		
	FC	SC	วิธีปกติ(BOTH)
KA1			
K	337.933	-	339.000
Ca	170.467	-	170.667
Ti	227.067	4.717	227.600
Mn	117.667	22.203	117.600
Fe	468.333	134.333	595.067
Cu	184.333	162.333	341.470

*หมายเหตุ: วิธีปกติเป็นวิธีการวัดด้วยโปรแกรมอัตโนมัติของระบบ ซึ่งจะเป็นวิธีที่ศูนย์เครื่องมือฯ สจล. ใช้ปฏิบัติงานตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์

I(KCps) เมื่อเลือกหัววัดรังสี FC, SC และการวัดแบบวิธีปกติของระบบ

4.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์เชิงปริมาณของ หัววัดรังสีชนิด FC และ SC และวิธีปกติ

4.3.1 วิธีการทดสอบ

การเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกวัดและวิเคราะห์เชิงปริมาณของหัววัด
รังสีชนิด FC และ SC จะแบ่งการทดสอบด้วยสารมาตรฐานตัวอย่างออกเป็น 2 ตอนด้วยกันคือ

ตอนที่ 1 : การเตรียมสารมาตรฐานเมื่อเวลาบด(t) คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงแรงดันอัด(P)

ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเตรียมสารมาตรฐาน เมื่อเวลาบดคงที่(t) เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด (P)

t(min)	Sample No.	P (kN)	Parameter	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	H ₂ BO ₃
1.5	1	100	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.479	8.479	8.479	8.479	8.479	8.483	-
	2	150	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.489	8.476	8.476	8.472	8.476	8.476	-
	3	200	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.473	8.477	8.473	8.486	8.477	8.482	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 : การเตรียมสารมาตรฐานเมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)
 ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเตรียมสารมาตรฐาน เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่ เปลี่ยนแปลงเวลาบด (t)

P (kN)	Sample No.	t (min)	Parameter	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	H ₂ BO ₃
100	4	1	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.473	8.481	8.481	8.481	8.477	8.481	-
	5	1.5	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.479	8.479	8.479	8.479	8.479	8.483	-
	6	2	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	-	0.200	0.200	0.200	2.975
			Concentration(%)	9.881	9.881	-	9.866	9.881	9.881	-
150	7	1	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.477	8.477	8.481	8.481	8.481	8.473	-
	8	1.5	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.489	8.476	8.476	8.472	8.476	8.476	-
	9	2	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.475	8.479	8.479	8.475	8.479	8.483	-
200	10	1	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	-	0.200	0.200	0.200	2.975
			Concentration(%)	9.870	9.880	-	9.880	9.875	9.880	-
	11	1.5	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	2.641
			Concentration(%)	8.473	8.477	8.473	8.486	8.477	8.482	-
	12	2	น้ำหนักสาร(g)	0.200	0.200	-	0.200	0.200	0.200	2.975
			Concentration(%)	9.871	9.876	-	9.87	9.876	9.880	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) นำตัวอย่างสารมาตรฐานที่เตรียมแล้วไปวัดและวิเคราะห์ที่ระบบ โดยเริ่มตอนที่ 1 วัดและวิเคราะห์ตัวอย่าง No.1 ใช้เวลาการวัด 12 min/ครั้ง โดยเลือกการวัดและวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยหัววัดรังสี FC , SC และวิธีปกติ เก็บข้อมูลวิเคราะห์และประมวลผล ดังตารางที่ 4.6
- 2) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1) แต่เปลี่ยนตัวอย่างเป็น No.2,3 และตอนที่ 2 เริ่มจากตัวอย่าง No.4,5,6,7,8,9,10,11,12 เก็บข้อมูล วิเคราะห์และประมวลผล ดังตารางที่ 4.7-4.17
- 3) นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1) และ 2) ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับการเลือกหัววัดรังสีชนิด FC และ SC และวิธีปกติ พร้อมเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างดังแสดงในรูปที่ 4.5 -4.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

ตอนที่ 1 การเตรียมสารมาตรฐาน เมื่อเวลาบด(t) คงที่เท่ากับ 1.5 นาที เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด(P) คือ 100,150,200 kN

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.1 เมื่อเวลาบด(t) คงที่ = 1.5 นาที แรงดันอัด(P) = 100 kN

No.1	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 8.479%	1	337.300	10.300	-	-	338.500	11.500
	2	338.300	10.300	-	-	339.100	11.500
	3	338.200	10.300	-	-	339.400	11.500
	เฉลี่ย	337.933	10.300	-	-	339.000	11.500
Ca 8.479%	1	170.100	11.500	-	-	170.400	12.100
	2	170.600	11.500	-	-	170.800	12.200
	3	170.700	11.500	-	-	170.800	12.200
	เฉลี่ย	170.467	11.500	-	-	170.667	12.167
Ti 8.479%	1	227.400	11.800	4.720	-	227.000	11.800
	2	226.900	11.800	4.700	-	227.900	11.800
	3	226.900	11.800	4.730	-	227.900	11.800
	เฉลี่ย	227.067	11.800	4.717	-	227.600	11.800
Mn 8.479%	1	117.800	6.080	22.200	-	117.600	6.260
	2	117.800	6.080	22.180	-	117.500	6.260
	3	117.400	6.060	22.230	-	117.700	6.270
	เฉลี่ย	117.667	6.073	22.203	-	117.600	6.263
Fe 8.479%	1	469.000	-	134.000	-	594.000	17.100
	2	467.000	-	134.000	-	595.400	17.200
	3	469.000	-	135.000	-	595.800	17.200
	เฉลี่ย	468.333	-	134.333	-	595.067	17.167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.1	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
Cu 8.483%	1	186.000	-	162.000	-	343.50	10.600
	2	183.000	-	162.000	-	341.20	10.700
	3	184.000	-	163.000	-	339.70	10.700
	เฉลี่ย	184.333	-	162.333	-	341.47	10.667
Sum (%)	1	39.630		0.000		69.400	
	2	39.710		0.000		69.580	
	3	39.680		0.000		69.620	
	เฉลี่ย	39.673		0.000		69.533	
Compton	1	0.890		3.690		0.850	
	2	0.900		3.690		0.860	
	3	0.900		3.700		0.860	
	เฉลี่ย	0.897		3.693		0.857	
Rayleigh	1	0.970		1.310		0.930	
	2	0.970		1.310		0.930	
	3	0.960		1.310		0.930	
	เฉลี่ย	0.967		1.310		0.930	

หมายเหตุ ตัวเลขเฉียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.2 เมื่อเวลาบด(t)คงที่ = 1.5 นาที
แรงดันอัด(P)=150kN

No.2	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 8.489%	1	358.300	9.340	-	-	308.500	10.000
	2	359.000	9.380	-	-	309.500	10.100
	3	359.100	9.380	-	-	310.600	10.100
	เฉลี่ย	358.800	9.367	-	-	309.533	10.067
Ca 8.476%	1	180.200	11.800	-	-	176.800	12.200
	2	180.500	11.800	-	-	176.700	12.200
	3	180.400	11.800	-	-	177.300	12.200
	เฉลี่ย	180.367	11.800	-	-	176.933	12.200
Ti 8.476%	1	230.600	11.900	4.680	-	231.200	11.800
	2	230.700	11.900	4.700	-	230.100	11.800
	3	231.100	11.900	4.660	-	230.000	11.800
	เฉลี่ย	230.800	11.900	4.680	-	230.433	11.800
Mn 8.472%	1	118.500	6.070	22.100	-	118.900	6.2600
	2	118.700	6.090	22.400	-	118.500	6.2400
	3	118.700	6.090	22.200	-	118.400	6.2400
	เฉลี่ย	118.633	6.083	22.233	-	118.600	6.247
Fe 8.476%	1	464.000	-	133.000	-	593.000	16.900
	2	462.000	-	132.000	-	593.400	16.900
	3	464.000	-	133.000	-	594.500	17.000
	เฉลี่ย	463.333	-	132.667	-	593.633	16.933
Cu 8.476%	1	179.000	-	161.000	-	344.700	10.700
	2	181.000	-	162.000	-	340.600	10.500
	3	181.000	-	163.000	-	340.500	10.500
	เฉลี่ย	180.333	-	162.000	-	341.933	10.567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.2	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	39.070	0.000	67.820
	2	39.170	0.000	67.670
	3	39.190	0.000	67.860
	เฉลี่ย	39.143	0.000	67.783
Compton	1	0.820	3.460	0.800
	2	0.820	3.460	0.800
	3	0.820	3.470	0.800
	เฉลี่ย	0.820	3.463	0.800
Rayleigh	1	0.950	1.290	0.920
	2	0.950	1.280	0.930
	3	0.950	1.290	0.920
	เฉลี่ย	0.950	1.287	0.923

หมายเหตุ ตัวเลขเฉียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.3 เวลาบด(t)คงที่ = 1.5 นาที
แรงดันอัด(P)=200kN

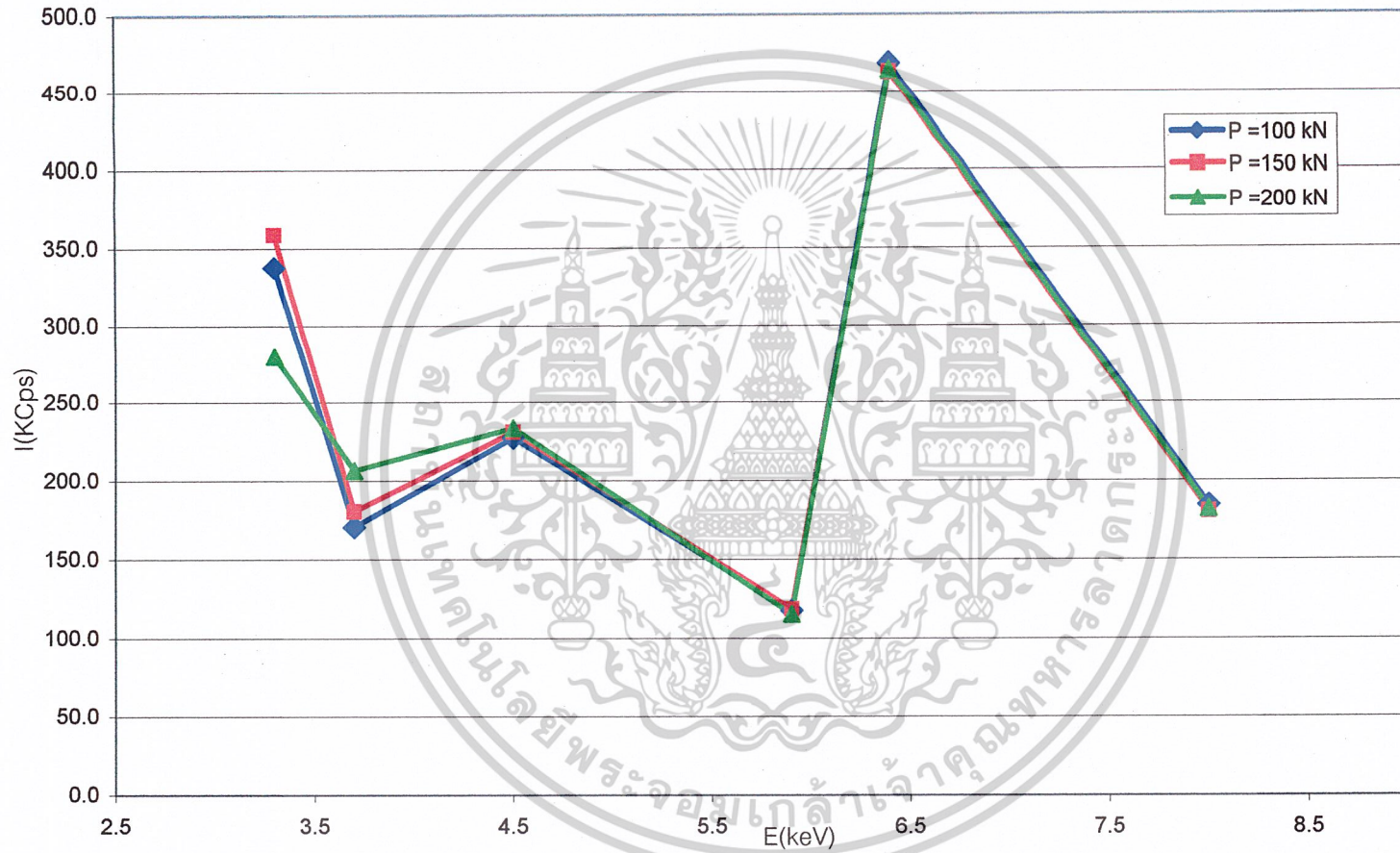
No.3	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 8.473%	1	279.400	8.860	-	-	284.600	9.930
	2	279.600	8.870	-	-	285.100	9.950
	3	280.600	8.920	-	-	286.000	9.990
	เฉลี่ย	279.867	8.883	-	-	285.233	9.957
Ca 8.477%	1	206.100	11.400	-	-	208.100	12.100
	2	206.100	11.400	-	-	208.300	12.100
	3	206.500	11.400	-	-	208.900	12.100
	เฉลี่ย	206.233	11.400	-	-	208.433	12.100
Ti 8.473%	1	233.000	11.600	5.170	-	234.500	11.700
	2	233.600	11.600	5.170	-	234.300	11.700
	3	233.500	11.600	5.180	-	234.200	11.700
	เฉลี่ย	233.367	11.600	5.173	-	234.333	11.700
Mn 8.486%	1	115.100	5.750	21.800	-	115.400	5.970
	2	115.200	5.760	21.900	-	115.200	5.960
	3	115.200	5.770	21.900	-	115.400	5.980
	เฉลี่ย	115.167	5.760	21.867	-	115.333	5.970
Fe 8.477%	1	464.000	-	134.000	-	592.500	16.800
	2	464.000	-	134.000	-	590.200	16.800
	3	467.000	-	135.000	-	592.200	16.800
	เฉลี่ย	465.000	-	134.333	-	591.633	16.800
Cu 8.482%	1	183.000	-	163.000	-	344.500	10.500
	2	181.000	-	163.000	-	345.500	10.500
	3	182.000	-	163.000	-	345.600	10.500
	เฉลี่ย	182.000	-	163.000	-	345.200	10.500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

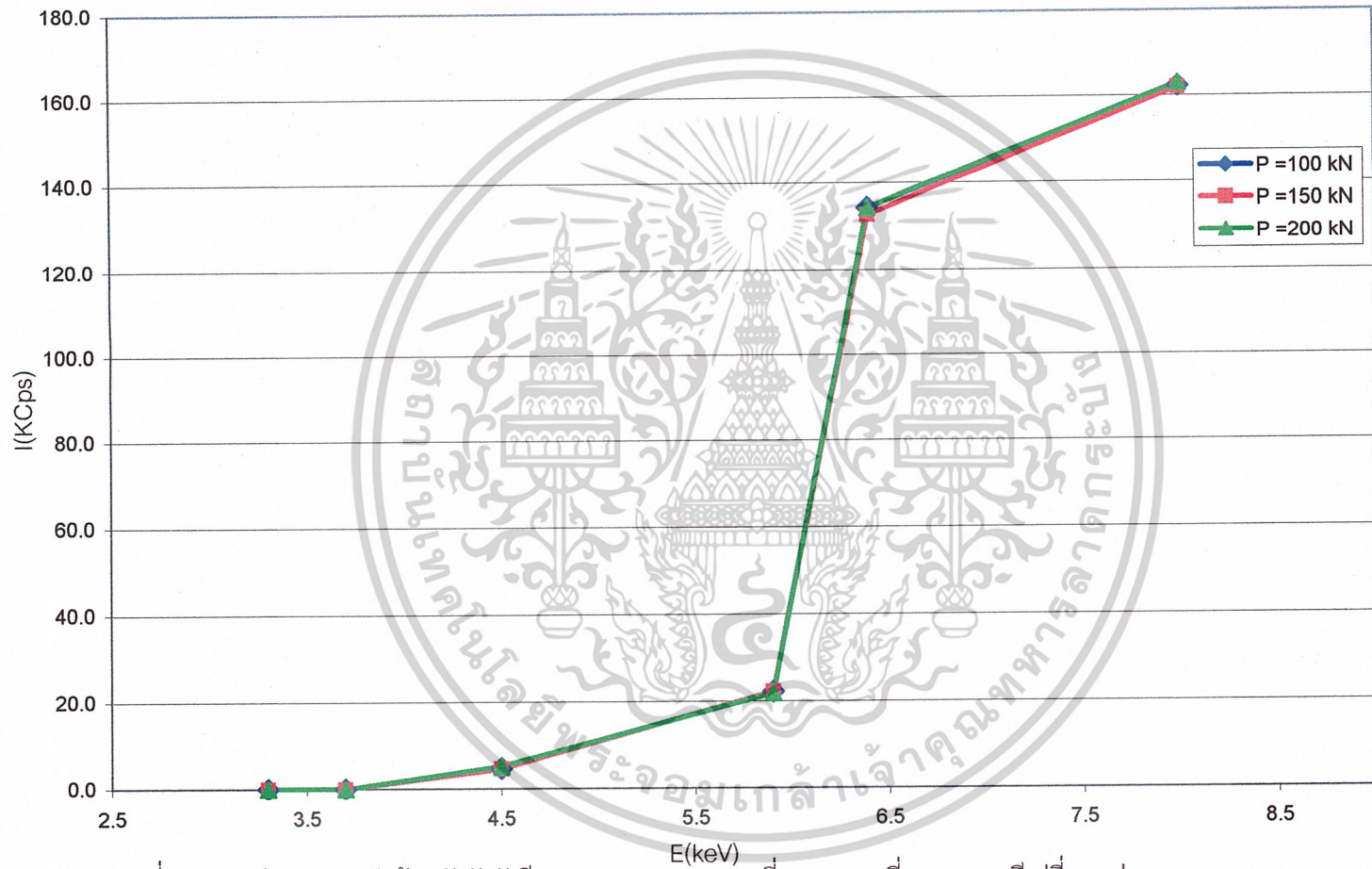
No.3	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	37.600	0.000	67.020
	2	37.650	0.000	66.930
	3	37.740	0.000	67.150
	เฉลี่ย	37.663	0.000	67.033
Compton	1	0.830	3.360	0.790
	2	0.830	3.370	0.790
	3	0.830	3.360	0.790
	เฉลี่ย	0.830	3.363	0.790
Rayleigh	1	0.940	1.290	0.920
	2	0.940	1.280	0.920
	3	0.940	1.290	0.920
	เฉลี่ย	0.940	1.287	0.920

หมายเหตุ ตัวเลขเอียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

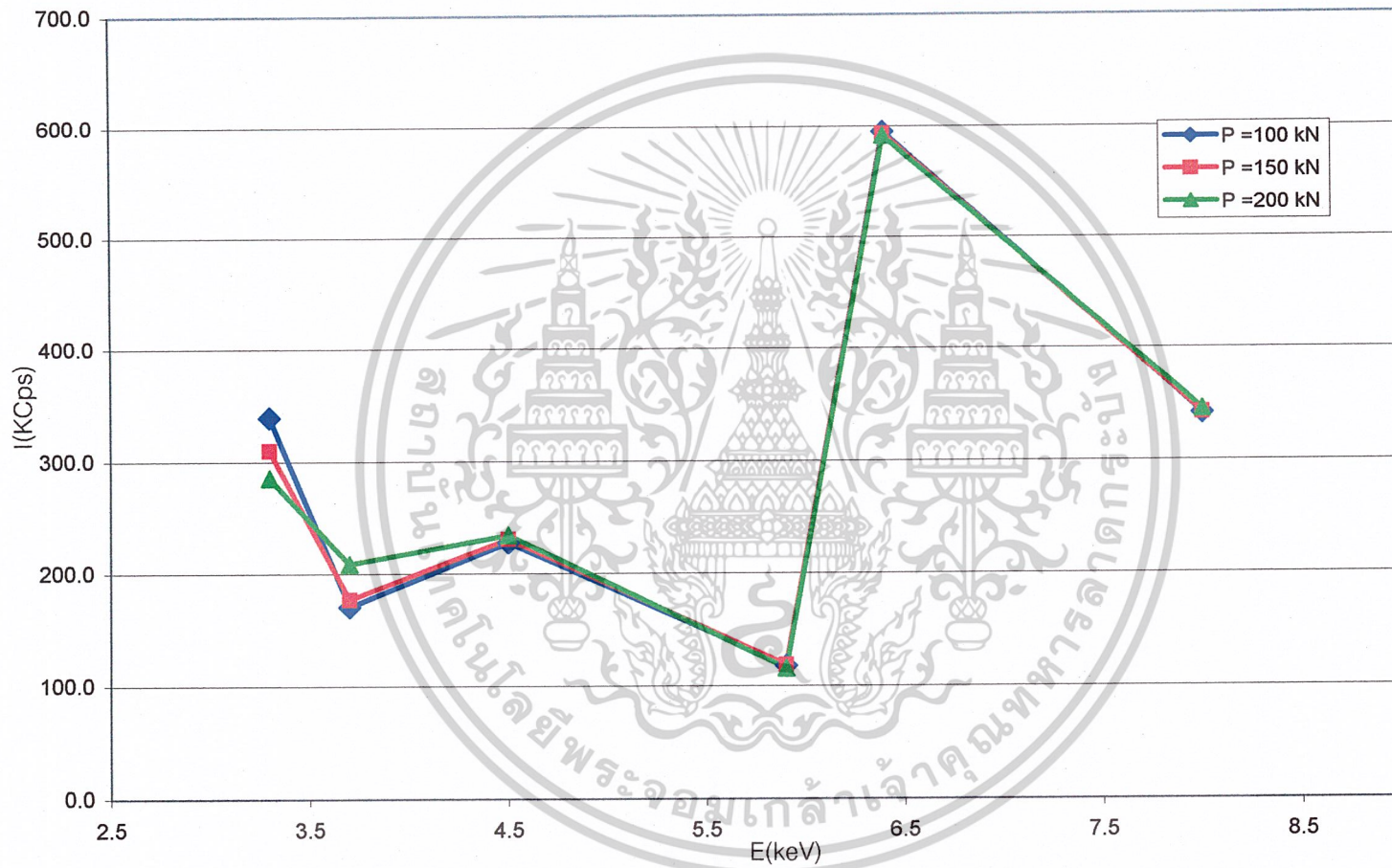
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการวัดด้วยหัววัดรังสี Flow counter ที่เวลาบดคงที่ $t = 1.5$ นาที เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด (P)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการวัดด้วยหัววัดรังสี Scintillation counter ที่เวลาบดคงที่ $t = 1.5$ นาที่เปลี่ยนแปลง
แรงดันอัด(P)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการวัดด้วยวิธีปกติ(BOTH) ที่เวลาบดคงที่ $t = 1.5$ นาที เปลี่ยนแปลงแรงดันอัด(P)

ตอนที่2 การเตรียมสารมาตรฐาน เมื่อแรงดันอัด(P) คงที่เท่ากับ 100 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t) คือ 1, 1.5, 2 นาที

ตารางที่4.9 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐานNo.4 เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ =100kN เวลาบด(t)=1 นาที

No.4	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 8.473%	1	274.100	9.820	-	-	259.200	10.700
	2	275.600	9.870	-	-	260.100	10.700
	3	276.300	9.900	-	-	260.800	10.800
	เฉลี่ย	275.333	9.863	-	-	260.033	10.733
Ca 8.481%	1	218.900	11.900	-	-	212.700	12.300
	2	219.200	11.900	-	-	213.000	12.400
	3	219.200	11.900	-	-	213.000	12.400
	เฉลี่ย	219.100	11.900	-	-	212.900	12.367
Ti 8.481%	1	229.200	12.200	5.050	-	227.400	12.100
	2	229.300	12.200	5.050	-	226.700	12.000
	3	229.200	12.200	5.070	-	224.900	12.100
	เฉลี่ย	229.233	12.200	5.057	-	226.333	12.067
Mn 8.481%	1	106.400	5.580	20.300	-	103.500	5.720
	2	106.400	5.590	20.000	-	103.200	5.700
	3	106.500	5.590	20.100	-	103.100	5.700
	เฉลี่ย	106.433	5.587	20.133	-	103.267	5.707
Fe 8.477%	1	469.000	-	135.000	-	584.400	17.400
	2	466.000	-	135.000	-	580.100	17.300
	3	465.000	-	135.000	-	582.900	17.400
	เฉลี่ย	466.667	-	135.000	-	582.467	17.367

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.4	ครั้งที่	หน่วยวัด F.C		หน่วยวัด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
Cu 8.481%	1	187.000	-	164.000	-	342.100	10.900
	2	187.000	-	164.000	-	338.900	10.800
	3	188.000	-	165.000	-	338.200	10.800
	เฉลี่ย	187.333	-	164.333	-	339.733	10.833
Sum (%)	1	39.460		0.000		69.070	
	2	39.570		0.000		68.860	
	3	39.610		0.000		69.010	
	เฉลี่ย	39.547		0.000		68.980	
Compton	1	0.880		3.620		0.820	
	2	0.880		3.620		0.830	
	3	0.880		3.630		0.830	
	เฉลี่ย	0.880		3.623		0.827	
Rayleigh	1	0.970		1.310		0.930	
	2	0.970		1.310		0.930	
	3	0.970		1.300		0.930	
	เฉลี่ย	0.970		1.307		0.930	

หมายเหตุ ตัวเลขเอียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.5

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ = 100kN เวลาบด(t)=1.5 นาที

No.5	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
8.479%	1	337.300	10.300	-	-	338.500	11.500
	2	338.300	10.300	-	-	339.100	11.500
	3	338.200	10.300	-	-	339.400	11.500
	เฉลี่ย	337.933	10.300	-	-	339.000	11.500
8.479%	1	170.100	11.500	-	-	170.400	12.100
	2	170.600	11.500	-	-	170.800	12.200
	3	170.700	11.500	-	-	170.800	12.200
	เฉลี่ย	170.467	11.500	-	-	170.667	12.167
8.479%	1	227.400	11.800	4.720	-	227.000	11.800
	2	226.900	11.800	4.700	-	227.900	11.800
	3	226.900	11.800	4.730	-	227.900	11.800
	เฉลี่ย	227.067	11.800	4.717	-	227.600	11.800
8.479%	1	117.800	6.080	22.200	-	117.600	6.260
	2	117.800	6.080	22.180	-	117.500	6.260
	3	117.400	6.060	22.230	-	117.700	6.270
	เฉลี่ย	117.667	6.073	22.203	-	117.600	6.263
8.479%	1	469.000	-	134.000	-	594.000	17.100
	2	467.000	-	134.000	-	595.400	17.200
	3	469.000	-	135.000	-	595.800	17.200
	เฉลี่ย	468.333	-	134.333	-	595.067	17.167
8.483%	1	186.000	-	162.000	-	343.50	10.600
	2	183.000	-	162.000	-	341.20	10.700
	3	184.000	-	163.000	-	339.70	10.700
	เฉลี่ย	184.333	-	162.333	-	341.47	10.667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.5	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	39.630	0.000	69.400
	2	39.710	0.000	69.580
	3	39.680	0.000	69.620
	เฉลี่ย	39.673	0.000	69.533
Compton	1	0.890	3.690	0.850
	2	0.900	3.690	0.860
	3	0.900	3.700	0.860
	เฉลี่ย	0.897	3.693	0.857
Rayleigh	1	0.970	1.310	0.930
	2	0.970	1.310	0.930
	3	0.960	1.310	0.930
	เฉลี่ย	0.967	1.310	0.930

หมายเหตุ ตัวเลขเอียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.6

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ = 100 kN เวลาบด(t)=2 นาที

No.6	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 9.881%	1	304.900	10.400	-	-	302.000	11.300
	2	305.700	10.400	-	-	302.300	11.300
	3	306.400	10.500	-	-	303.500	11.400
	เฉลี่ย	305.667	10.433	-	-	302.600	11.333
Ca 9.881%	1	219.400	12.900	-	-	218.200	13.400
	2	219.300	12.900	-	-	218.200	13.400
	3	219.800	13.000	-	-	219.700	13.500
	เฉลี่ย	219.500	12.9333	-	-	218.700	13.433
Ti -	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	-	-	-	-	-	-
Mn 9.866%	1	156.500	6.540	30.000	-	156.400	7.220
	2	156.600	6.540	30.300	-	155.600	7.190
	3	156.600	6.560	30.200	-	155.900	7.210
	เฉลี่ย	156.567	6.547	30.167	-	155.967	7.207
Fe 9.881%	1	468.000	-	164.000	-	726.800	18.200
	2	467.000	-	164.000	-	728.010	18.100
	3	469.000	-	165.000	-	728.080	18.200
	เฉลี่ย	468.000	-	164.333	-	727.630	18.167
Cu 9.881%	1	186.000	-	184.000	-	389.000	11.600
	2	185.000	-	183.000	-	389.000	11.400
	3	184.000	-	184.000	-	388.800	11.400
	เฉลี่ย	185.000	-	183.667	-	388.933	11.467

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.6	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	29.870	0.000	61.670
	2	29.910	0.000	61.480
	3	30.010	0.000	61.650
	เฉลี่ย	29.930	0.000	61.600
Compton	1	0.930	3.310	0.910
	2	0.930	3.310	0.910
	3	0.930	3.310	0.910
	เฉลี่ย	0.930	3.310	0.910
Rayleigh	1	1.020	1.390	0.980
	2	1.020	1.390	0.980
	3	1.030	1.390	0.970
	เฉลี่ย	1.023	1.390	0.977

หมายเหตุ ตัวเลขเอียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.7

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ =150kN เวลาบด(t)=1 นาที

No.7	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
8.477%	K 1	272.200	9.820	-	-	270.800	10.700
	2	272.900	9.840	-	-	271.800	10.700
	3	273.800	9.890	-	-	272.700	10.800
	เฉลี่ย	272.967	9.850	-	-	271.767	10.733
8.477%	Ca 1	218.300	11.800	-	-	217.600	12.200
	2	218.600	11.800	-	-	218.400	12.300
	3	219.000	11.900	-	-	218.900	12.300
	เฉลี่ย	218.633	11.833	-	-	218.300	12.267
8.481%	Ti 1	225.600	12.000	6.010	-	225.200	11.800
	2	225.900	12.000	5.960	-	225.500	11.800
	3	225.900	12.000	6.010	-	225.400	11.900
	เฉลี่ย	225.800	12.000	5.993	-	225.367	11.833
8.481%	Mn 1	114.600	6.010	21.600	-	114.500	6.110
	2	114.100	5.990	21.500	-	114.200	6.130
	3	114.300	6.010	21.600	-	114.100	6.130
	เฉลี่ย	114.333	6.003	21.567	-	114.267	6.123
8.481%	Fe 1	461.000	-	134.000	-	591.300	17.100
	2	461.000	-	135.000	-	587.100	17.200
	3	460.000	-	134.000	-	589.900	17.200
	เฉลี่ย	460.667	-	134.333	-	589.433	17.167
8.473%	Cu 1	184.000	-	162.000	-	343.400	10.600
	2	184.000	-	162.000	-	339.900	10.600
	3	183.000	-	162.000	-	339.200	10.600
	เฉลี่ย	183.667	-	162.000	-	340.833	10.600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.7	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	39.640	0.000	68.530
	2	39.700	0.000	68.780
	3	39.820	0.000	68.910
	เฉลี่ย	39.720	0.000	68.740
Compton	1	0.890	3.620	0.830
	2	0.890	3.630	0.830
	3	0.890	3.630	0.840
	เฉลี่ย	0.890	3.627	0.833
Rayleigh	1	0.960	1.310	0.920
	2	0.950	1.300	0.920
	3	0.960	1.290	0.920
	เฉลี่ย	0.957	1.300	0.920

หมายเหตุ ตัวเลขเฉียงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.8

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ =150 kN เวลาบด(t)=1.5 นาที

No.8	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 8.489%	1	358.300	9.340	-	-	308.500	10.000
	2	359.000	9.380	-	-	309.500	10.100
	3	359.100	9.380	-	-	310.600	10.100
	เฉลี่ย	358.800	9.367	-	-	309.533	10.067
Ca 8.476%	1	180.200	11.800	-	-	176.800	12.200
	2	180.500	11.800	-	-	176.700	12.200
	3	180.400	11.800	-	-	177.300	12.200
	เฉลี่ย	180.367	11.800	-	-	176.933	12.200
Ti 8.476%	1	230.600	11.900	4.680	-	231.200	11.800
	2	230.700	11.900	4.700	-	230.100	11.800
	3	231.100	11.900	4.660	-	230.000	11.800
	เฉลี่ย	230.800	11.900	4.680	-	230.433	11.800
Mn 8.472%	1	118.500	6.070	22.100	-	118.900	6.260
	2	118.700	6.090	22.400	-	118.500	6.240
	3	118.700	6.090	22.200	-	118.400	6.240
	เฉลี่ย	118.633	6.083	22.233	-	118.600	6.247
Fe 8.476%	1	464.000	-	133.000	-	593.000	16.900
	2	462.000	-	132.000	-	593.400	16.900
	3	464.000	-	133.000	-	594.500	17.000
	เฉลี่ย	463.333	-	132.667	-	593.633	16.933
Cu 8.476%	1	179.000	-	161.000	-	344.700	10.500
	2	181.000	-	162.000	-	340.600	10.500
	3	181.000	-	163.000	-	340.500	10.700
	เฉลี่ย	180.333	-	162.000	-	341.933	10.567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.8	ครั้งที่	ห้วงวัดชนิดF.C	ห้วงวัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	39.070	0.000	67.820
	2	39.170	0.000	67.670
	3	39.190	0.000	67.860
	เฉลี่ย	39.143	0.000	67.783
Compton	1	0.820	3.460	0.800
	2	0.820	3.460	0.800
	3	0.820	3.470	0.800
	เฉลี่ย	0.820	3.463	0.800
Rayleigh	1	0.950	1.290	0.920
	2	0.950	1.280	0.930
	3	0.950	1.290	0.920
	เฉลี่ย	0.950	1.287	0.923

หมายเหตุ ตัวเลขเฉลี่ยคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.9

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ = 150 kN เวลาบด(t)=2 นาที

No.9	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 8.475%	1	262.200	9.310	-	-	260.600	10.100
	2	262.700	9.330	-	-	261.600	10.200
	3	263.400	9.360	-	-	262.400	10.200
	เฉลี่ย	262.767	9.333	-	-	261.533	10.167
Ca 8.479%	1	216.200	11.500	-	-	215.200	12.000
	2	216.800	11.600	-	-	215.600	12.000
	3	217.300	11.600	-	-	215.800	12.000
	เฉลี่ย	216.767	11.567	-	-	215.533	12.000
Ti 8.479%	1	223.500	11.600	5.020	-	222.600	11.600
	2	223.900	11.700	5.040	-	222.200	11.600
	3	224.300	11.700	5.010	-	222.300	11.600
	เฉลี่ย	223.900	11.667	5.023	-	222.367	11.600
Mn 8.475%	1	124.300	6.420	23.700	-	124.200	6.610
	2	223.900	6.430	23.600	-	123.700	6.590
	3	224.300	6.450	23.700	-	122.700	6.580
	เฉลี่ย	190.833	6.433	23.667	-	123.533	6.593
Fe 8.479%	1	455.000	-	133.000	-	585.700	16.900
	2	453.000	-	133.000	-	584.200	16.800
	3	455.000	-	133.000	-	584.900	16.900
	เฉลี่ย	454.333	-	133.000	-	584.933	16.867
Cu 8.483%	1	180.000	-	160.000	-	336.500	10.500
	2	181.000	-	159.000	-	333.000	10.400
	3	181.000	-	160.000	-	333.300	10.400
	เฉลี่ย	180.667	-	159.667	-	334.267	10.433

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.9	ครั้งที่	ห้วงวัดชนิดF.C	ห้วงวัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	38.890	0.000	67.710
	2	39.000	0.000	67.580
	3	39.120	0.000	67.700
	เฉลี่ย	39.003	0.000	67.663
Compton	1	0.830	3.420	0.790
	2	0.830	3.430	0.800
	3	0.840	3.440	0.800
	เฉลี่ย	0.833	3.430	0.797
Rayleigh	1	0.940	1.290	0.910
	2	0.940	1.290	0.920
	3	0.950	1.280	0.920
	เฉลี่ย	0.943	1.287	0.917

หมายเหตุ ตัวเลขเฉลี่ยคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.10

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ =200 kN เวลาบด(t)=1 นาที

No.10	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 9.870%	1	255.600	9.740	-	-	254.500	10.700
	2	256.000	9.770	-	-	255.000	10.700
	3	256.500	9.790	-	-	256.600	10.800
	เฉลี่ย	256.033	9.767	-	-	255.367	10.733
Ca 9.880%	1	228.400	12.900	-	-	227.200	13.600
	2	228.600	13.000	-	-	227.000	13.600
	3	229.000	13.000	-	-	228.100	13.600
	เฉลี่ย	228.667	12.967	-	-	227.433	13.600
Ti -	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	-	-	-	-	-	-
Mn 9.880%	1	140.800	5.890	26.800	-	140.900	6.530
	2	140.600	5.880	26.800	-	140.400	6.510
	3	140.700	5.890	26.700	-	140.600	6.520
	เฉลี่ย	140.700	5.887	26.767	-	140.633	6.520
Fe 9.875%	1	572.000	-	166.000	-	732.500	18.200
	2	572.000	-	166.000	-	732.500	18.300
	3	574.000	-	165.000	-	732.500	18.300
	เฉลี่ย	572.667	-	165.667	-	732.500	18.267
Cu 9.880%	1	207.000	-	184.000	-	386.300	11.400
	2	207.000	-	184.000	-	385.100	11.300
	3	206.000	-	184.000	-	384.800	11.300
	เฉลี่ย	206.667	-	184.000	-	385.400	11.333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.10	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	28.580	0.000	60.450
	2	28.630	0.000	60.490
	3	28.690	0.000	60.480
	เฉลี่ย	28.633	0.000	60.473
Compton	1	0.890	3.330	0.880
	2	0.890	3.320	0.880
	3	0.890	3.330	0.880
	เฉลี่ย	0.890	3.327	0.880
Rayleigh	1	1.010	1.390	0.960
	2	0.990	1.390	0.960
	3	1.010	1.390	0.970
	เฉลี่ย	1.003	1.390	0.963

หมายเหตุ ตัวเลขเฉลี่ยคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างมาตรฐาน No.12

เมื่อแรงดันอัด(P)คงที่ =200 kN เวลาบด(t)=2 นาที

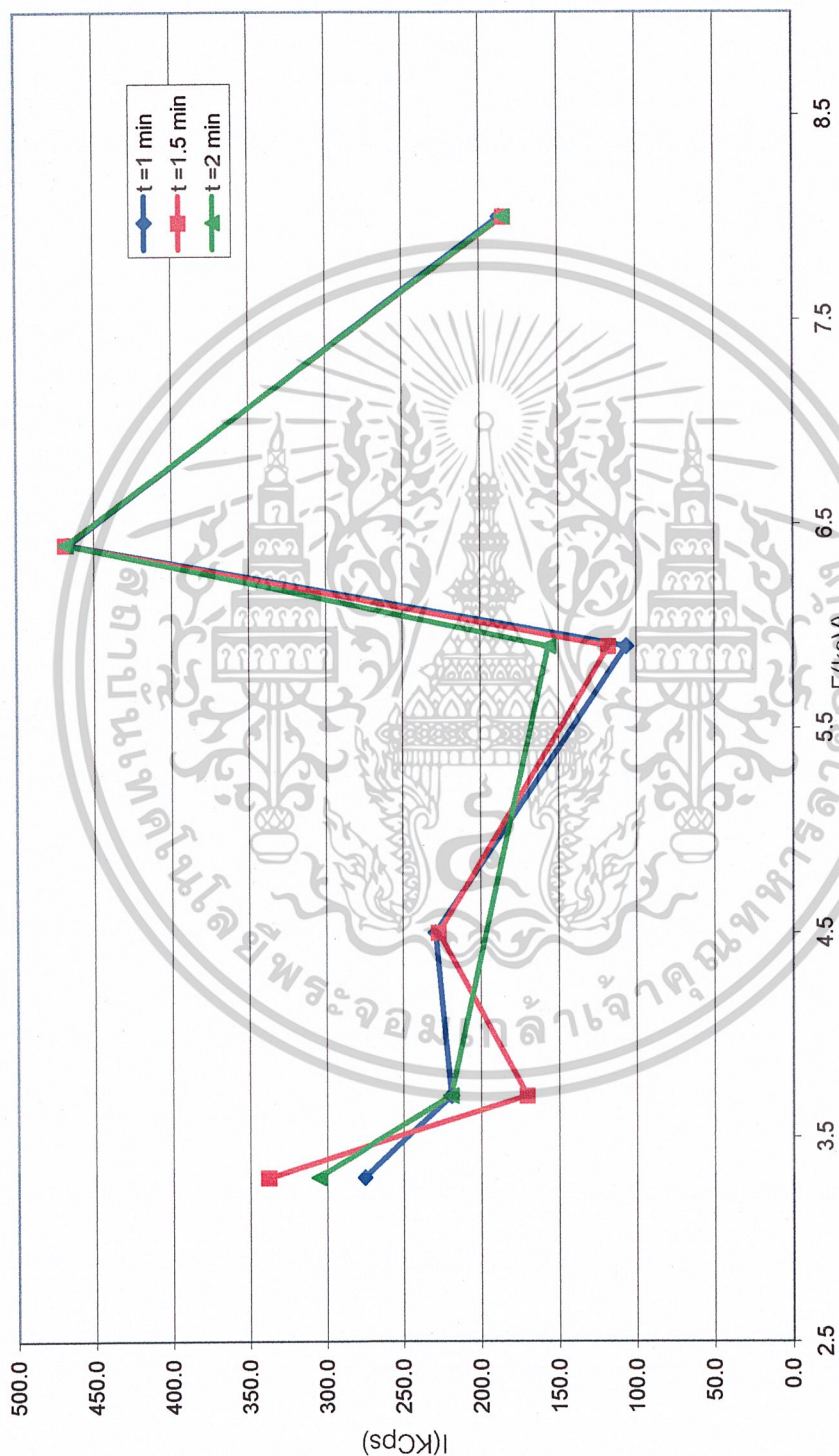
No.12	ครั้งที่	หัววัดชนิด F.C		หัววัดชนิด S.C		วิธีปกติ	
		I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)	I (KCps)	concentration(%)
K 9.871%	1	277.500	10.600	-	-	274.900	11.60
	2	278.100	10.700	-	-	276.300	11.70
	3	279.000	10.700	-	-	277.100	11.70
	เฉลี่ย	278.200	10.667	-	-	276.100	11.67
Ca 9.876%	1	225.600	13.100	-	-	224.400	13.60
	2	226.000	13.200	-	-	225.300	13.70
	3	226.600	13.200	-	-	225.700	13.70
	เฉลี่ย	226.067	13.167	-	-	225.133	13.67
Ti -	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	-	-	-	-	-	-
Mn 9.871%	1	159.400	6.780	30.400	-	159.300	7.400
	2	159.700	6.800	30.300	-	159.400	7.410
	3	159.800	6.820	30.400	-	159.900	7.440
	เฉลี่ย	159.633	6.800	30.367	-	159.533	7.417
Fe 9.876%	1	568.000	-	164.000	-	724.300	18.20
	2	566.000	-	165.000	-	725.000	18.20
	3	571.000	-	164.000	-	725.600	18.30
	เฉลี่ย	568.333	-	164.333	-	724.967	18.23
Cu 9.880%	1	202.000	-	180.000	-	380.300	11.20
	2	201.000	-	181.000	-	380.500	11.20
	3	201.000	-	181.000	-	380.700	11.30
	เฉลี่ย	201.333	-	180.667	-	380.500	11.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.12	ครั้งที่	หัววัดชนิดF.C	หัววัดชนิด S.C	วิธีปกติ
Sum (%)	1	30.560	0.000	61.980
	2	30.650	0.000	62.220
	3	30.760	0.000	62.390
	เฉลี่ย	30.657	0.000	62.197
Compton	1	0.920	3.430	0.900
	2	0.910	3.420	0.900
	3	0.920	3.420	0.890
	เฉลี่ย	0.917	3.423	0.897
Rayleigh	1	1.020	1.393	0.970
	2	1.010	1.400	0.960
	3	1.020	1.400	0.970
	เฉลี่ย	1.017	1.398	0.967

หมายเหตุ ตัวเลขเฉลี่ยคือค่าที่อ่านได้จากกราฟ

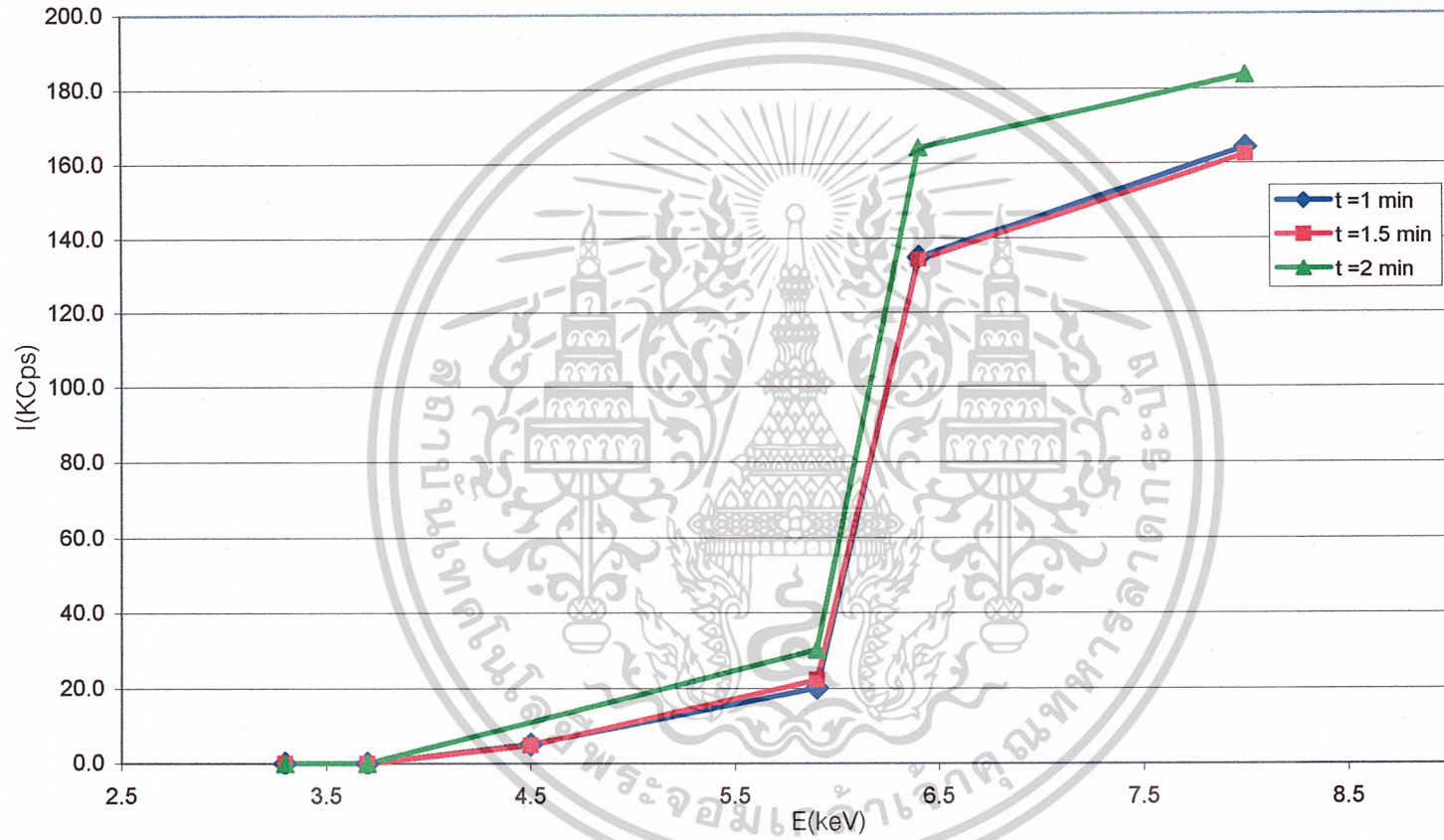
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



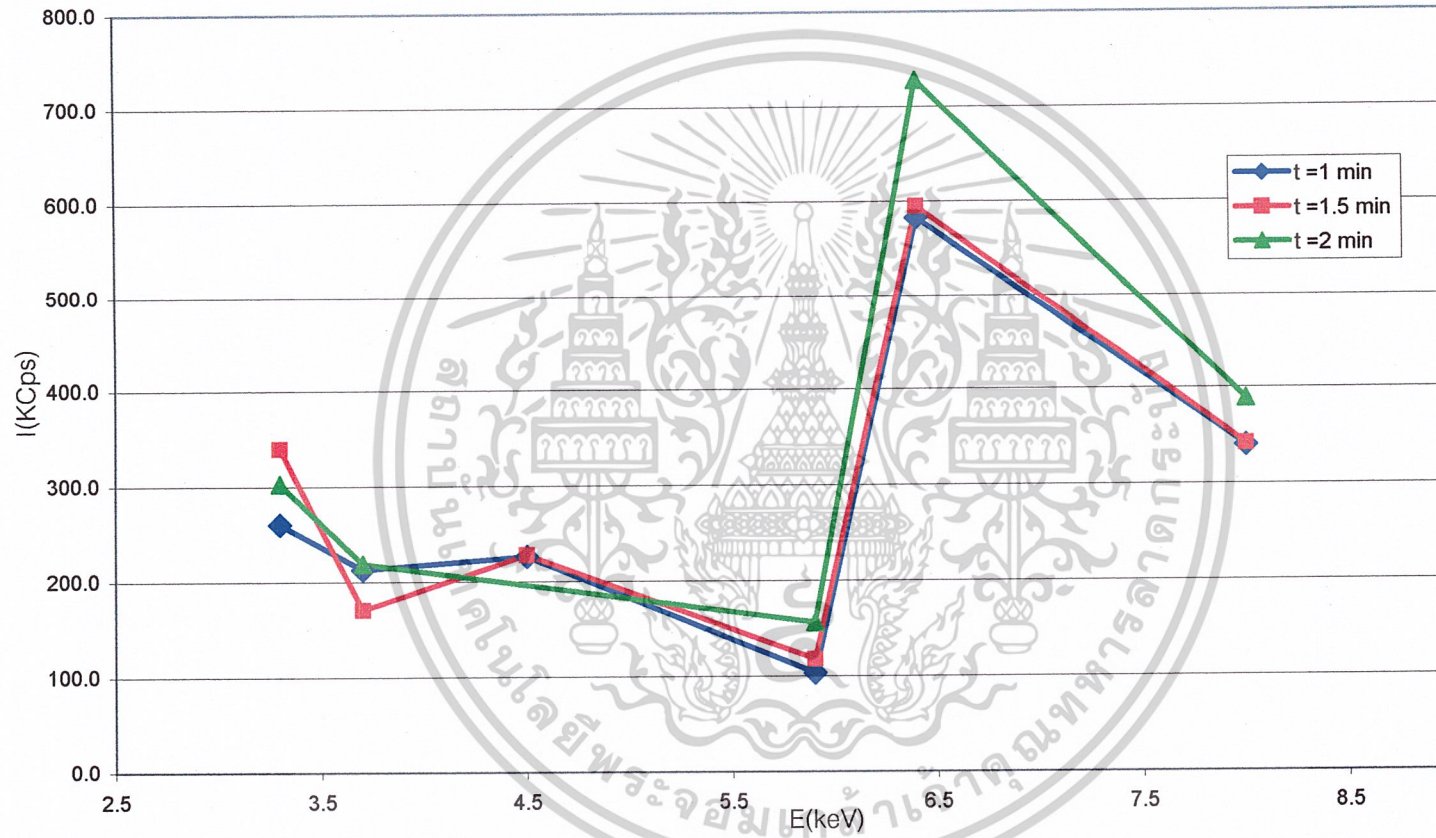
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการวัดด้วยเครื่องวัดรังสี Flow counter

ที่ P = 100 kN เปลี่ยนแปลงเวลา (t)

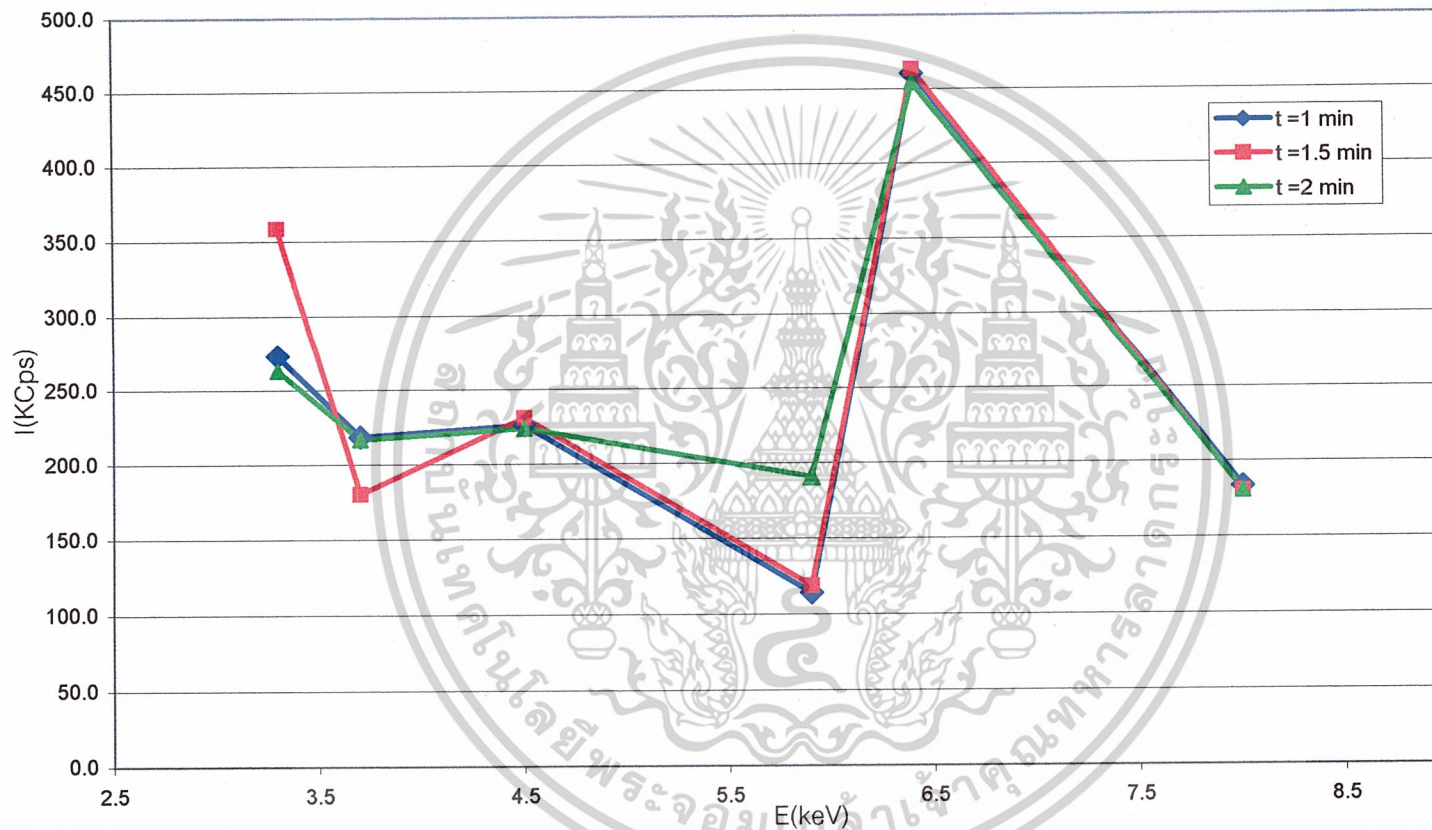
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



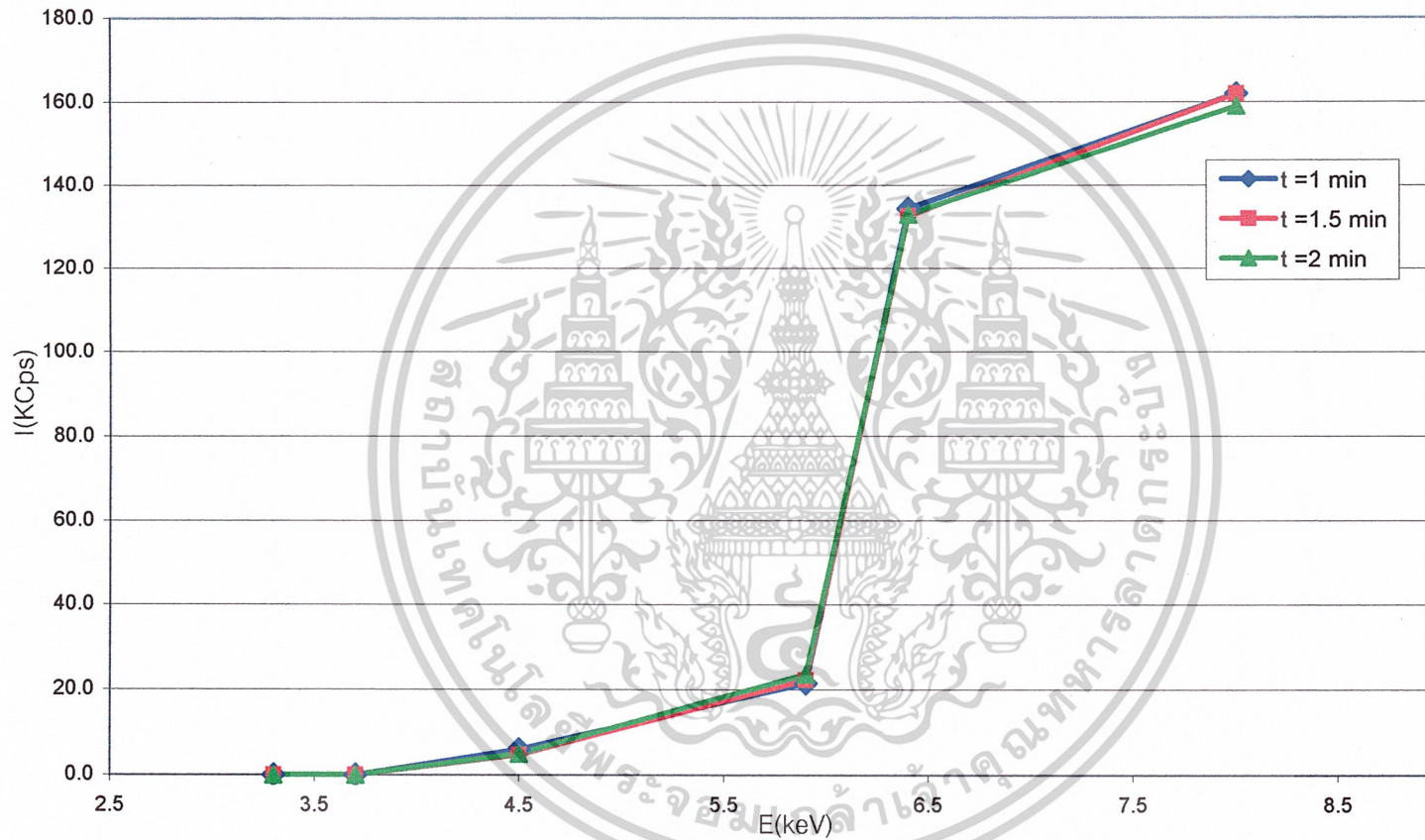
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.4, 5, 6 ด้วยหัววัดรังสี Scintillation counter
ที่ P =100 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



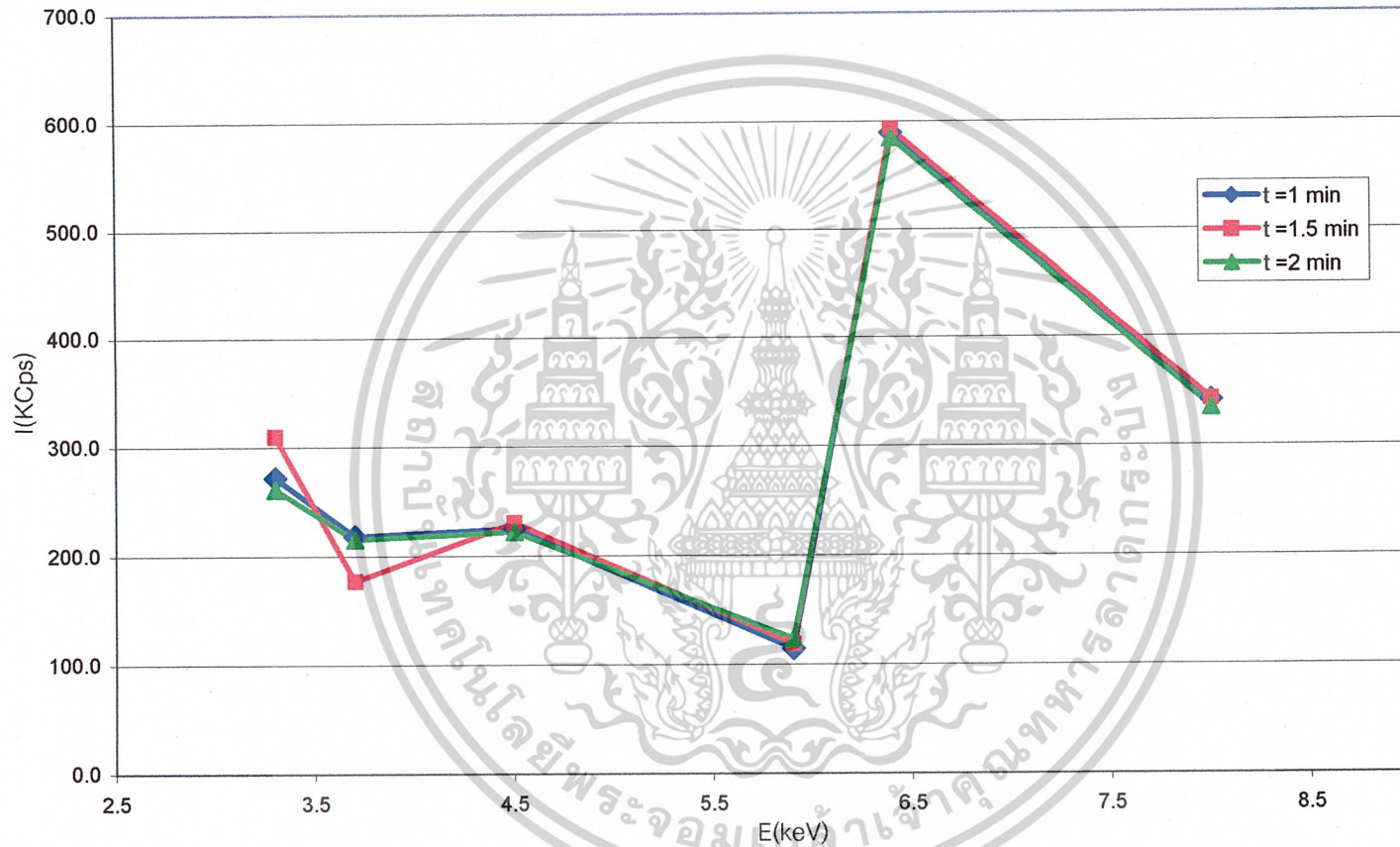
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.4, 5, 6 ด้วยวิธีปกติ(BOTH)
ที่ P =100 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



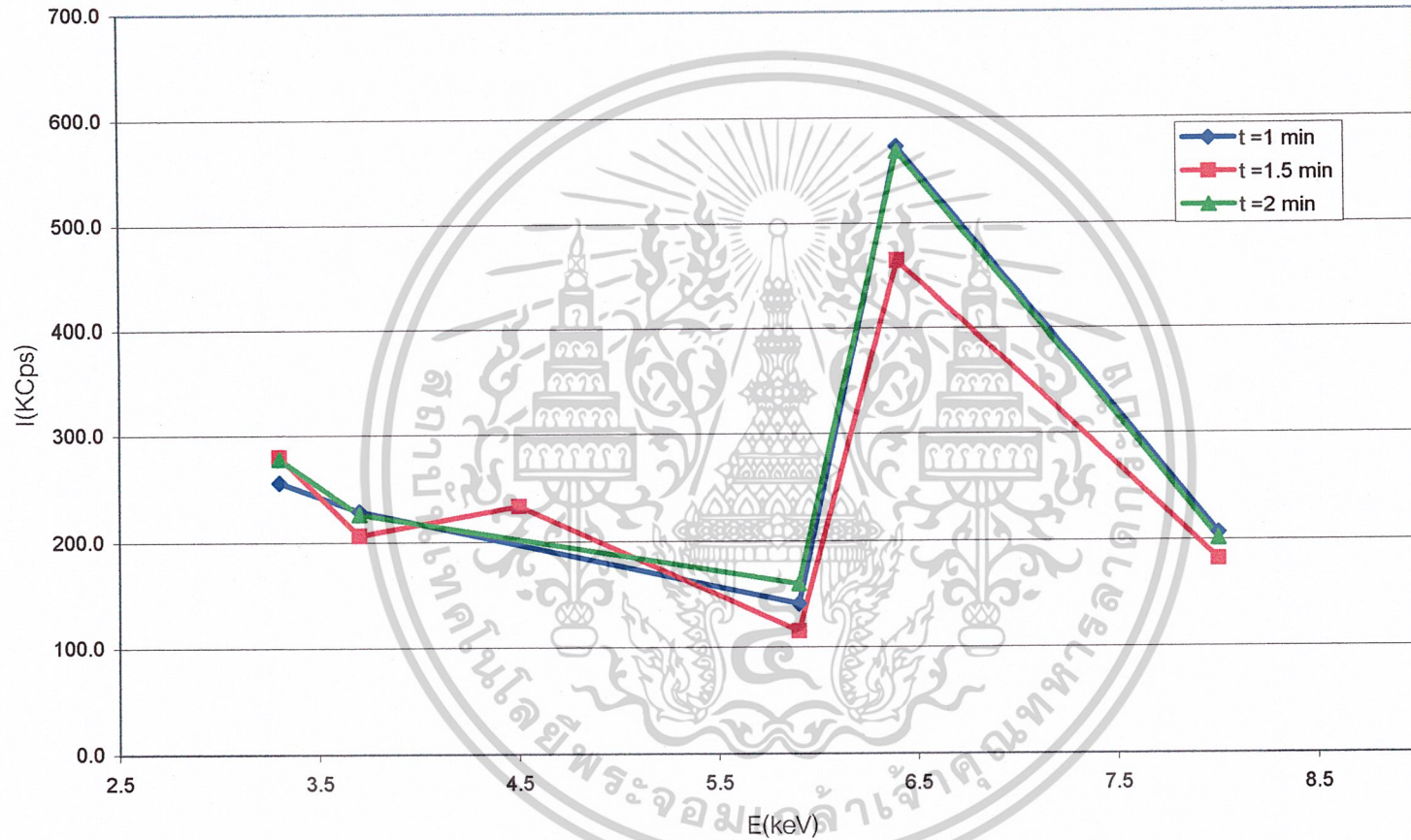
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9 ด้วยหัววัดรังสี Flow counter
ที่ P =150 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



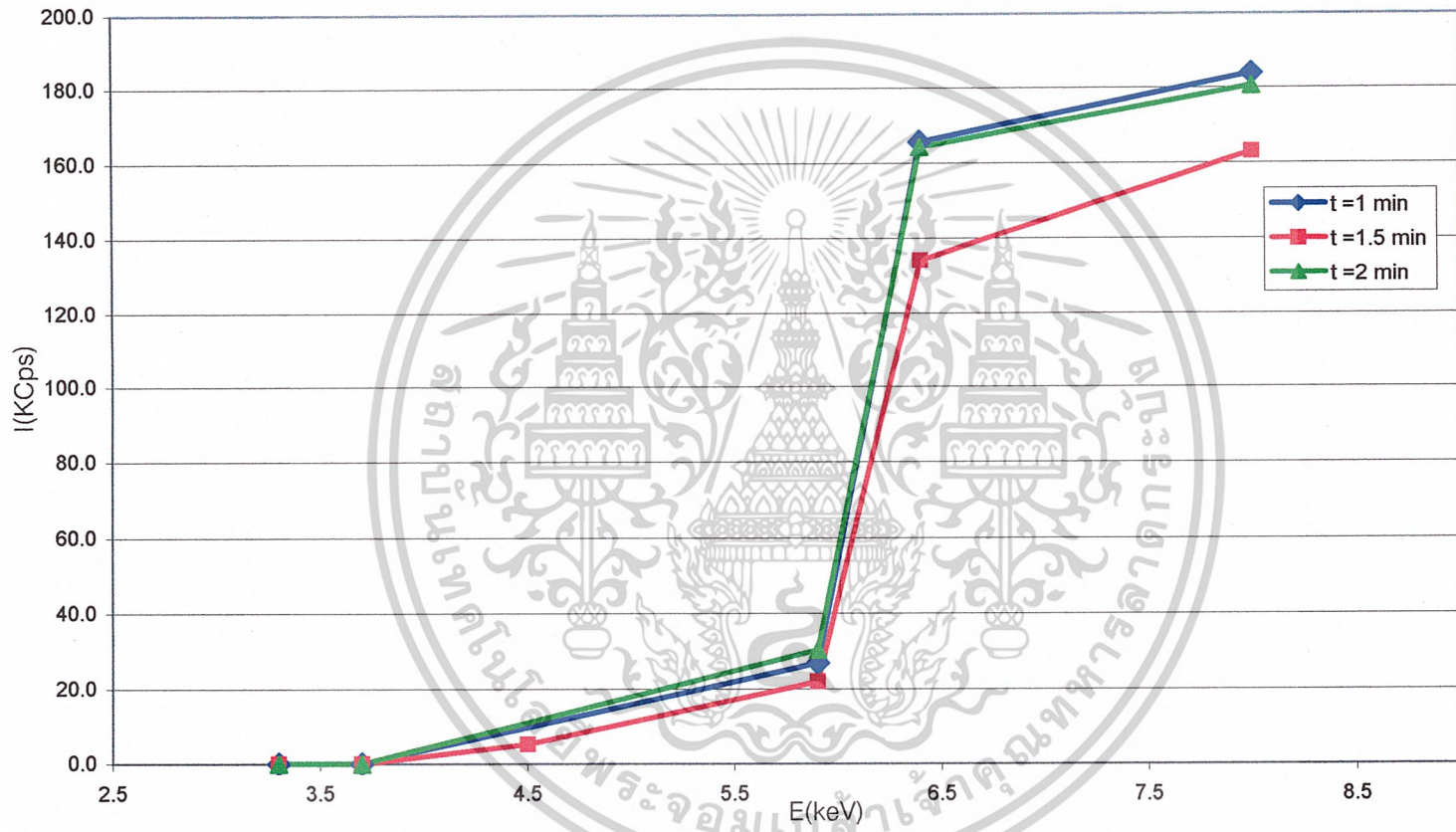
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9 ด้วยหัววัดรังสี Scintillation counter
ที่ P =150 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



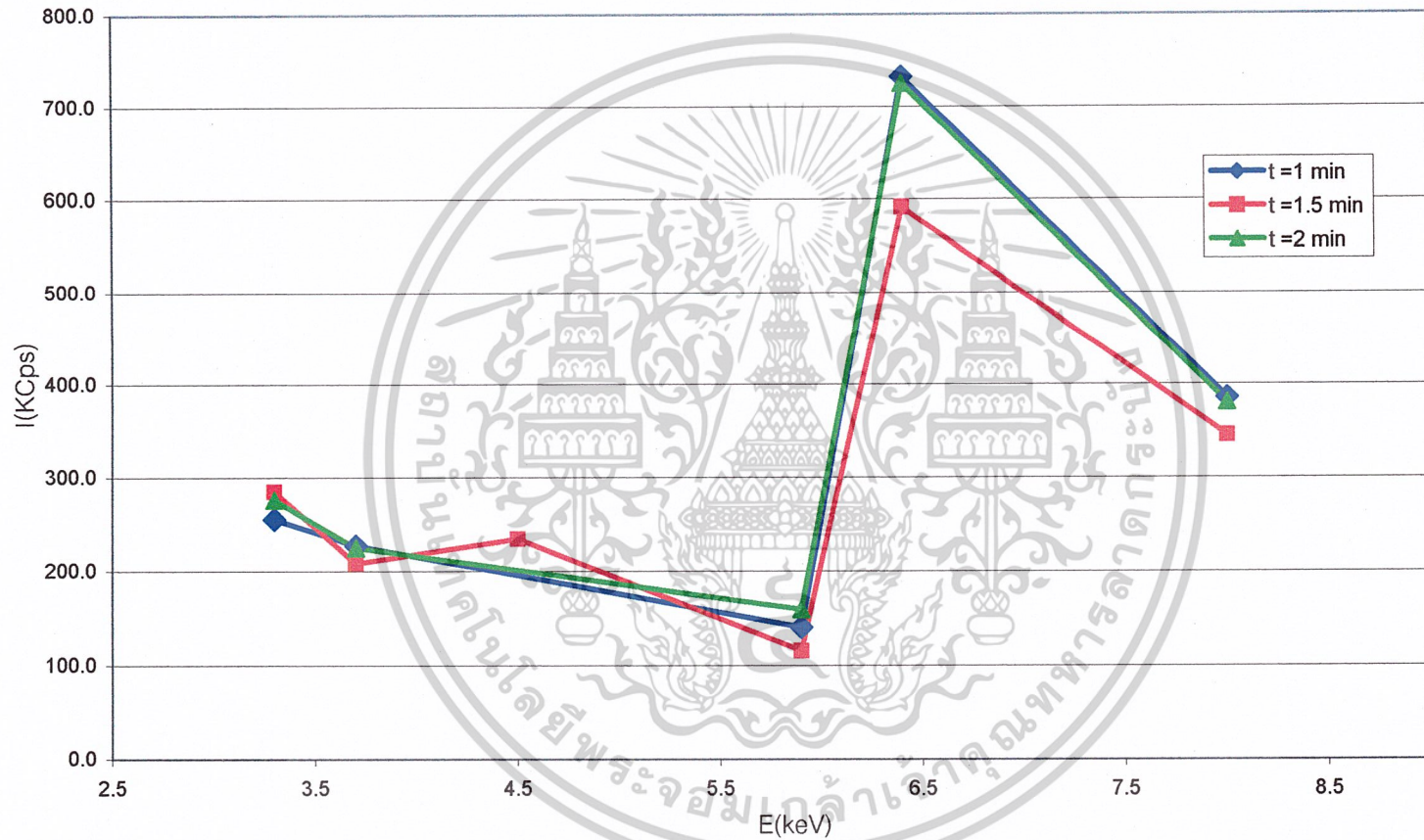
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9 ด้วยวิธีปกติ(BOTH)
ที่ P =150 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



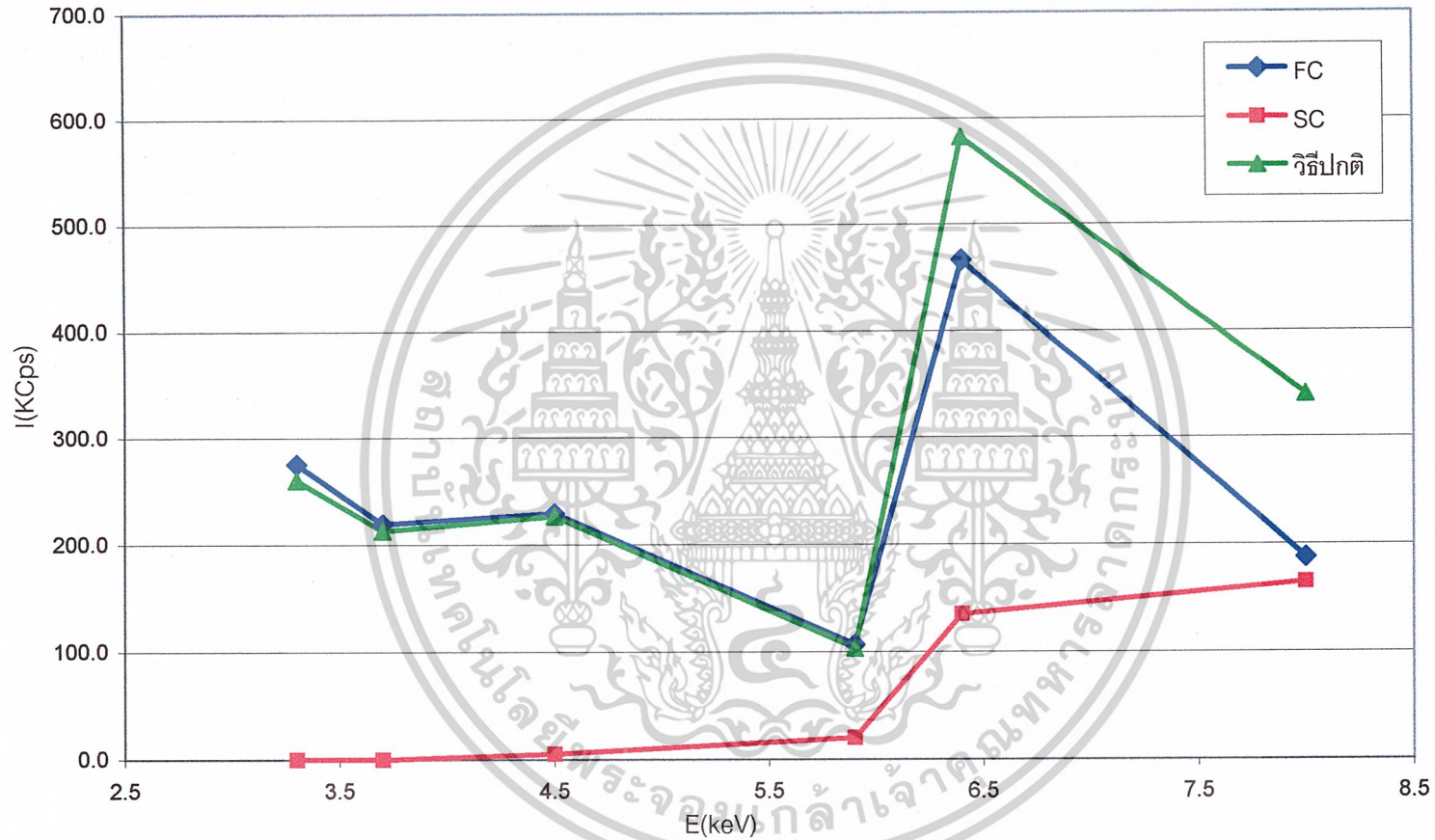
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12 ด้วยหัววัดรังสี Flow counter
ที่ P = 200 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



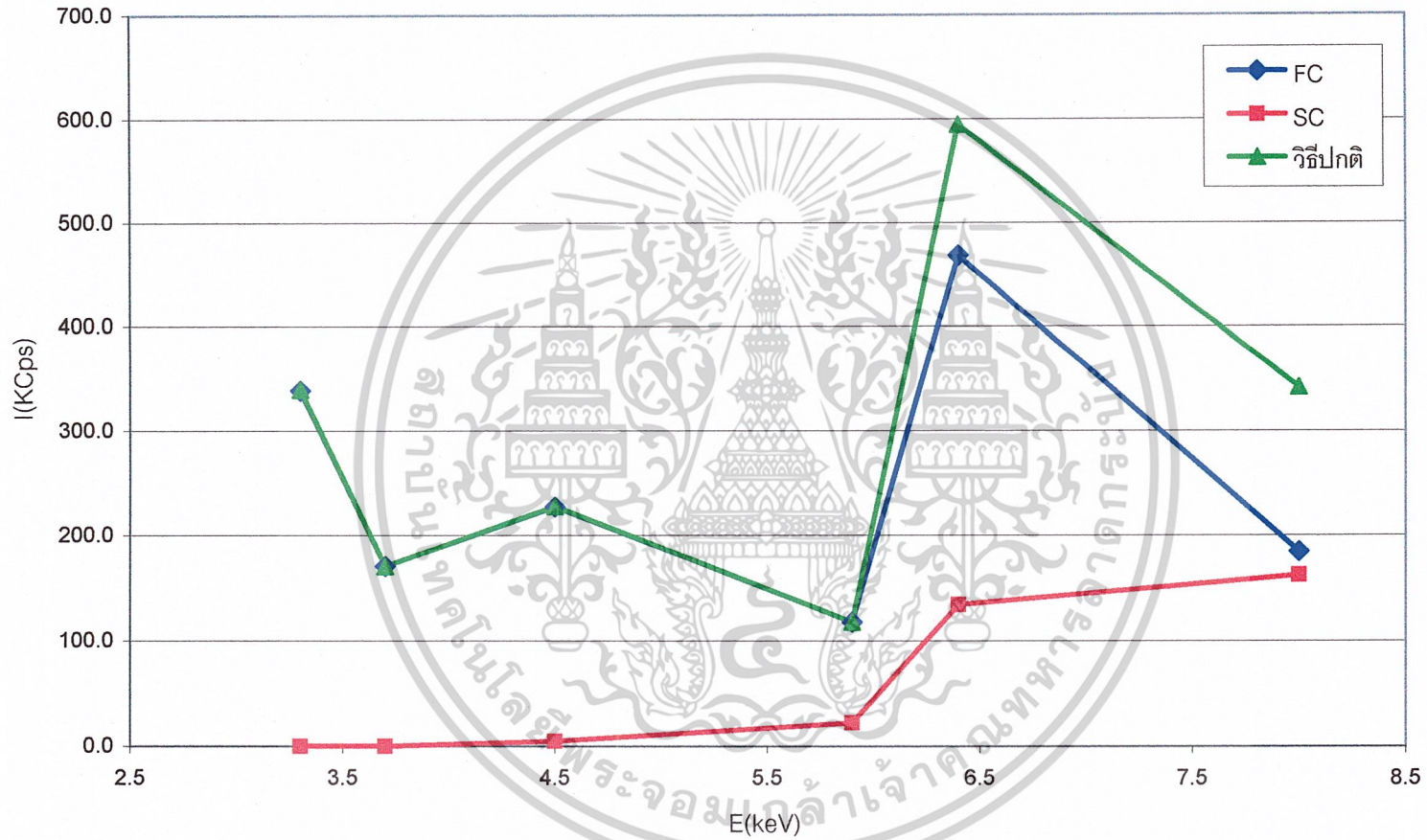
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12 ด้วยหัววัดรังสี Scintillation counter
 ที่ P =200 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



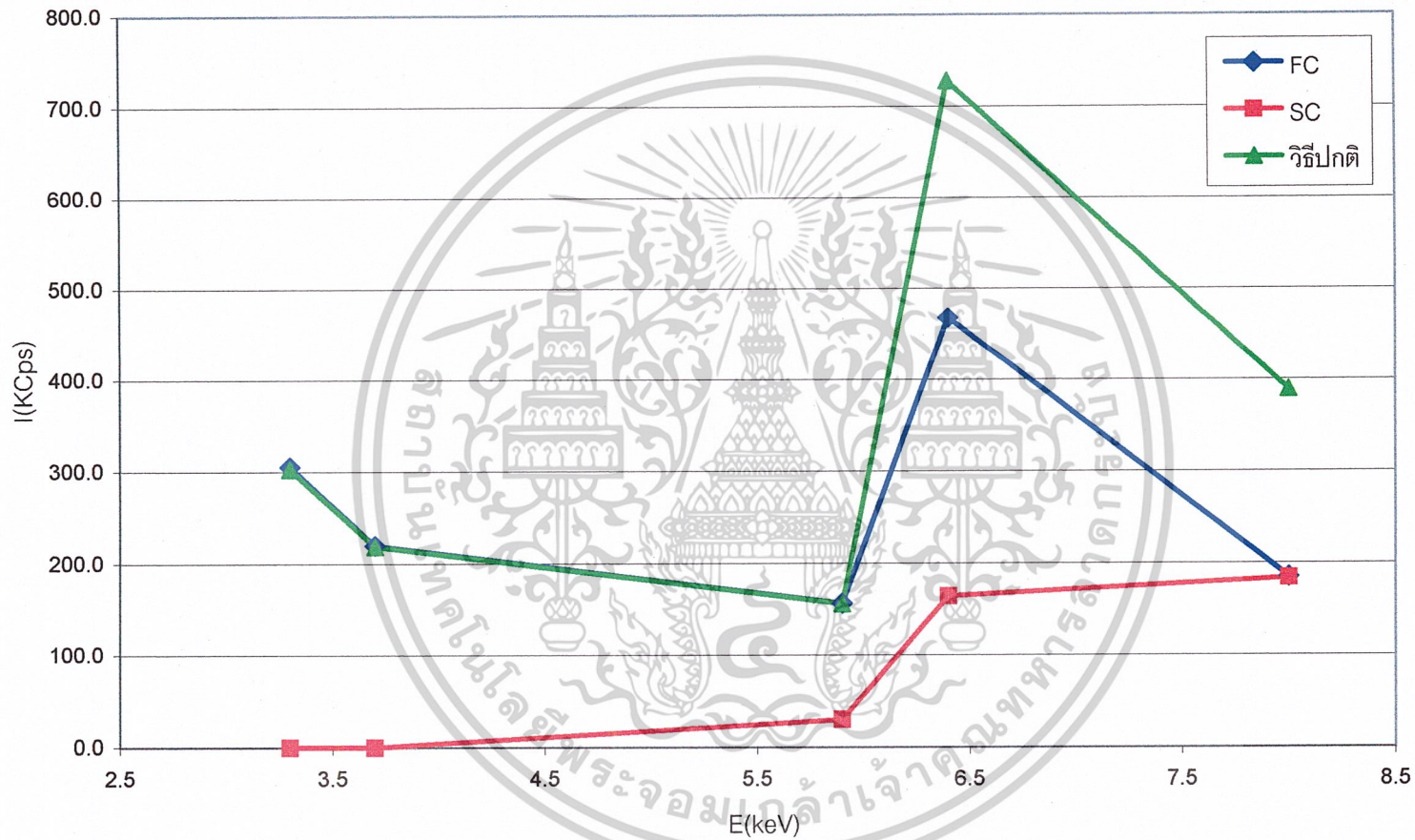
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการวัดตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12 ด้วยวิธีปกติ(BOTH)
ที่ P =200 kN เปลี่ยนแปลงเวลาบด(t)



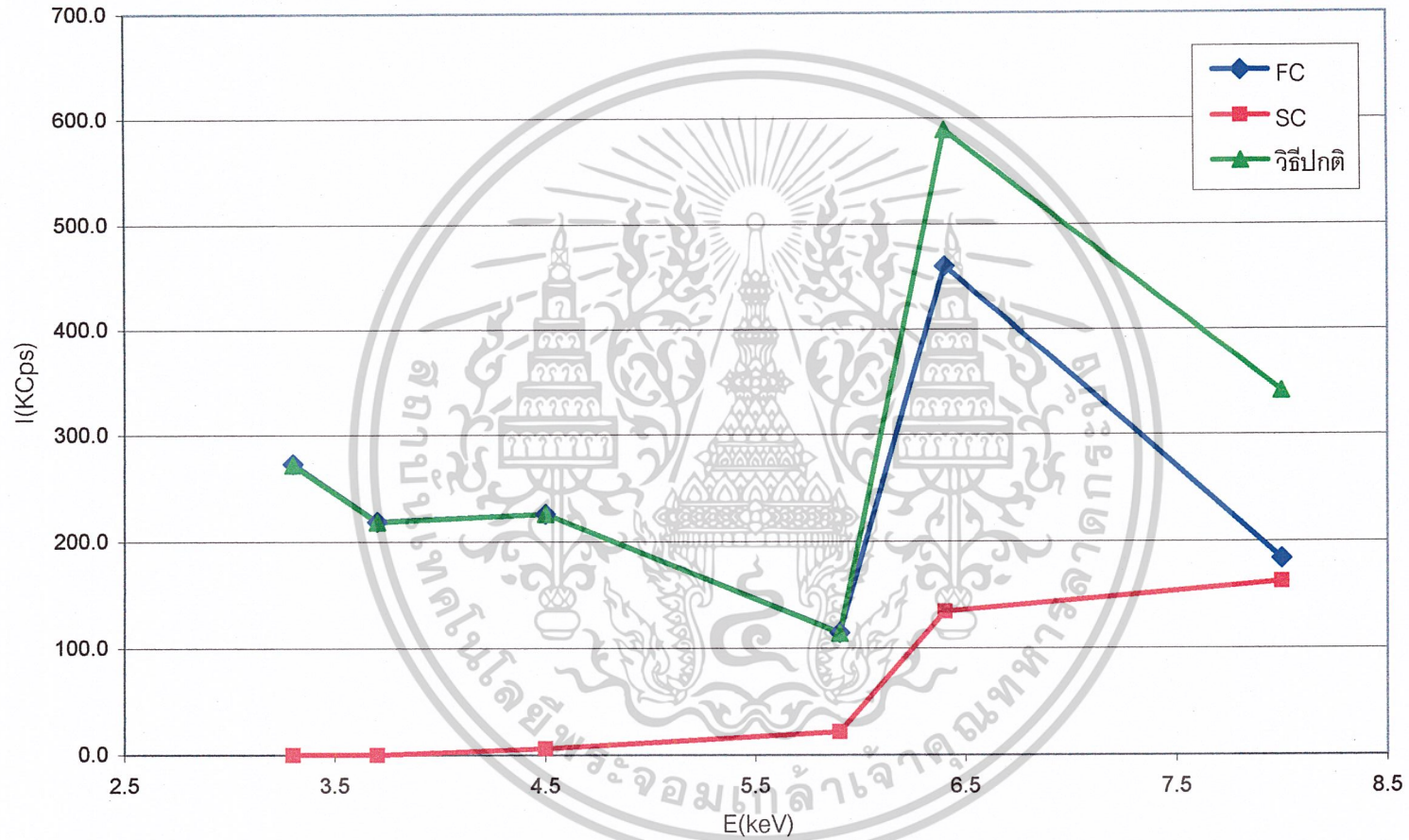
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิธีปกติของระบบที่ t=1นาที่ P=100kN



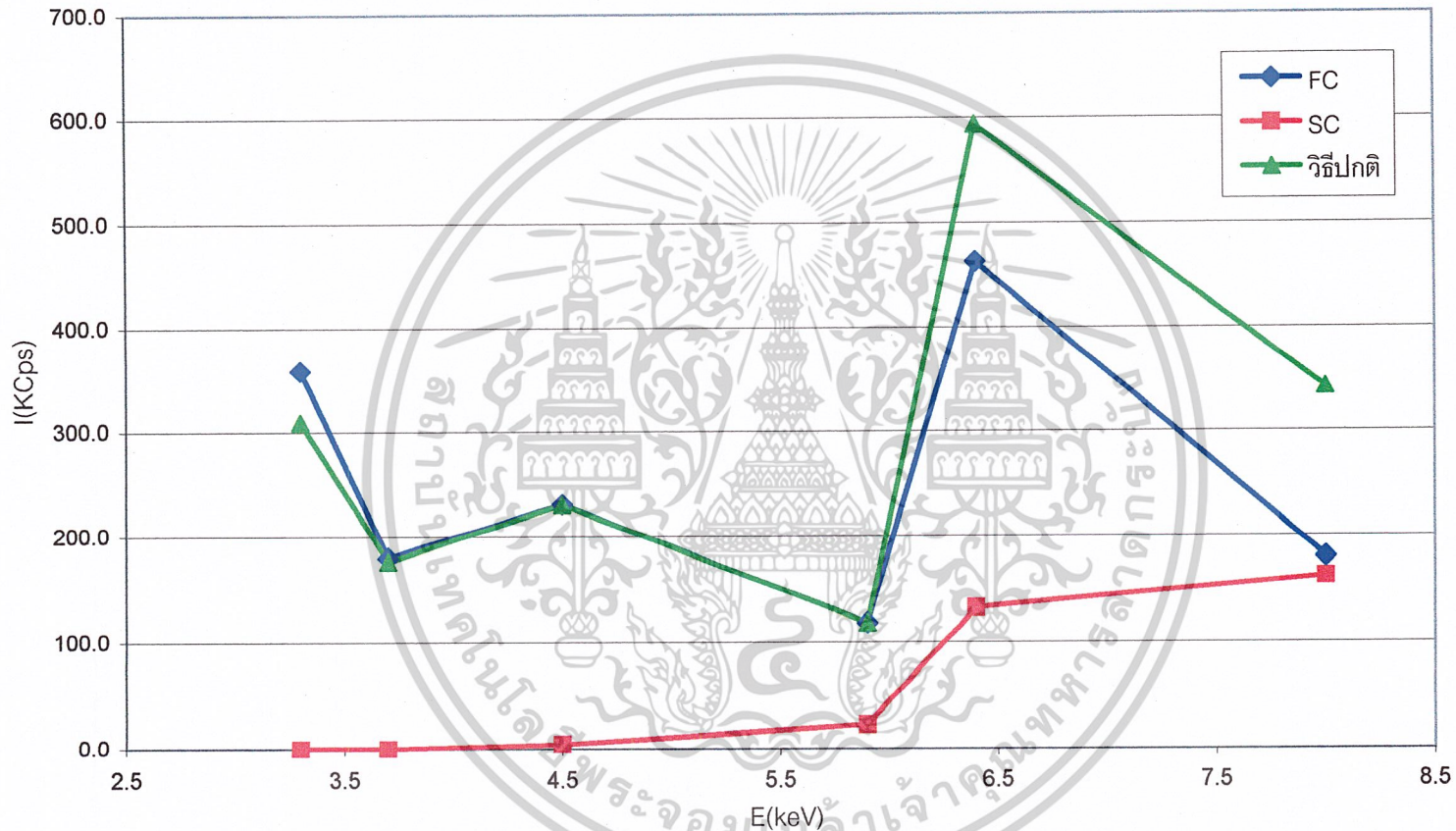
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอกซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิธีปกติของระบบที่ t=1.5นาที่ P=100kN



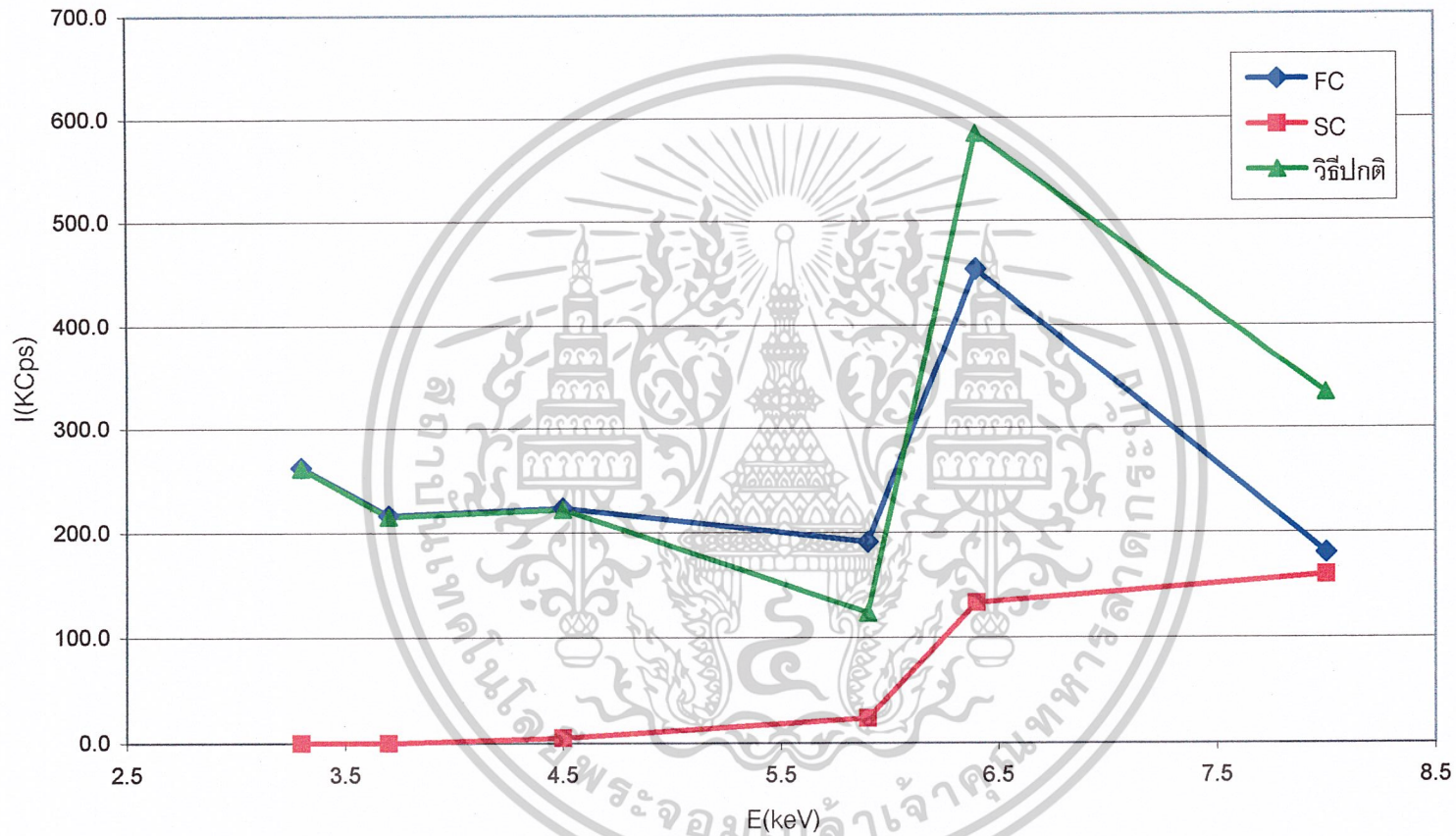
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของกับ ความเข้ม รังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิธีปกติของระบบที่ t = 2 นาที P = 100



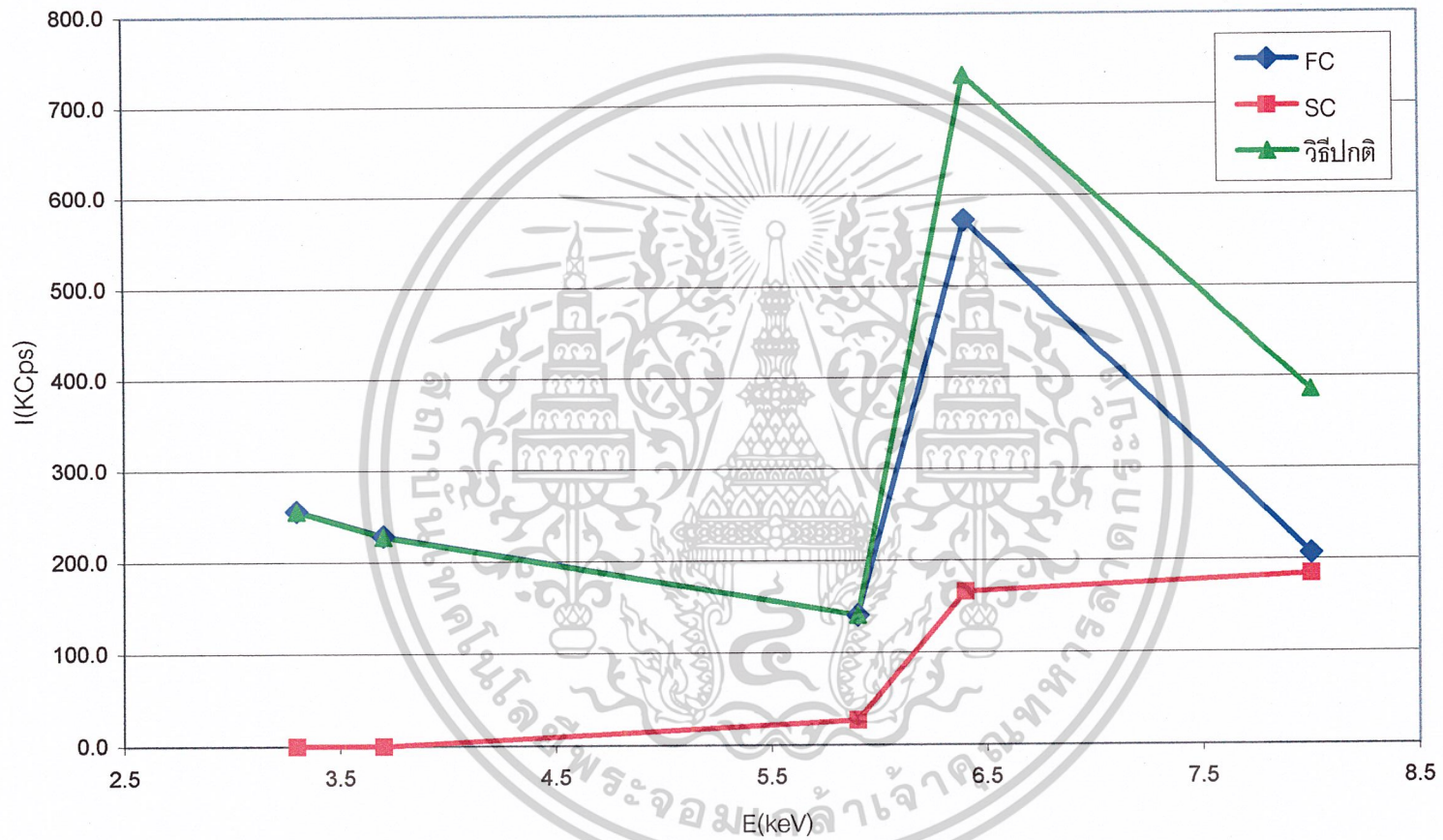
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิถีปกติของระบบ ที่ t=1นาที่ P=150kN



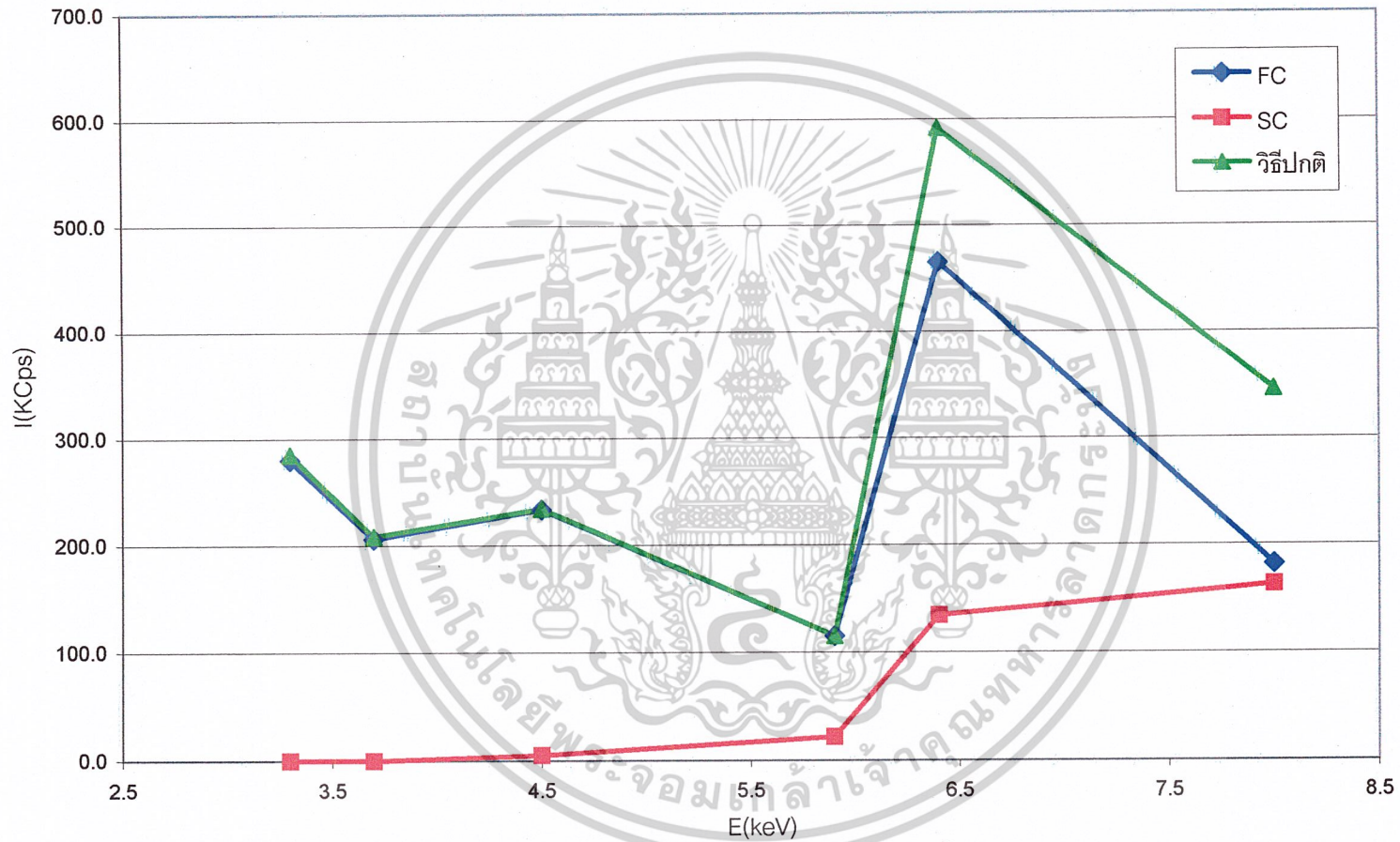
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับ ความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิธีปกติของระบบ ที่ t =1.5 นาที P =150kN



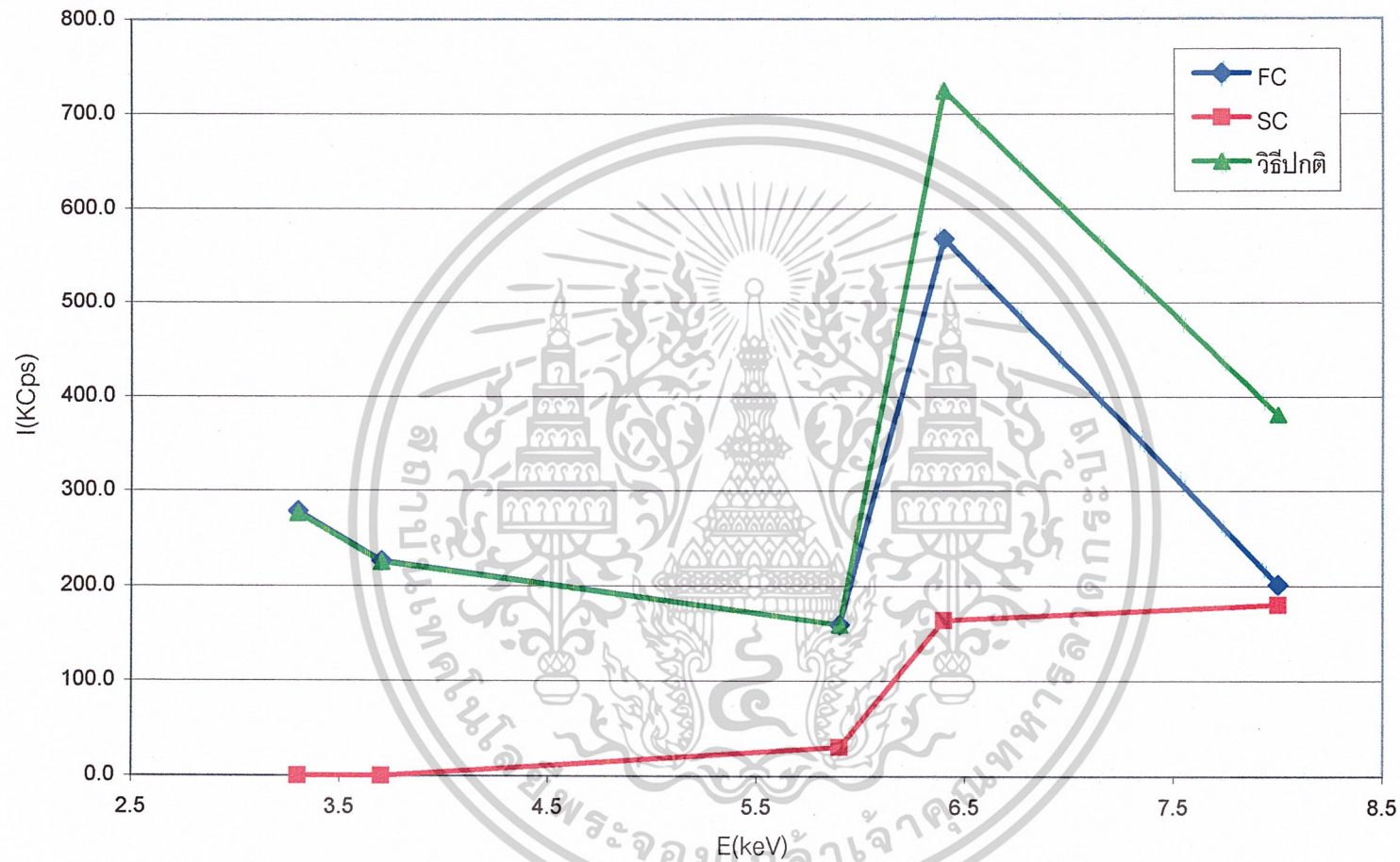
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิธีปกติของระบบ ที่ $t=2$ นาที $P=150$ kN



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวัสดุปกติของระบบ ที่ $t = 1$ นาที $P = 200$ kN



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวัสดุปกติของระบบที่ t=1.5นาที่ P=200kN



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มรังสีระหว่างพลังงานในระดับชั้น E KA1 ของธาตุกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ I(KCps) เมื่อเลือกหัววัด FC, SC และวิถีปกติของระบบ ที่ t=2นาที่ P=200kN

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอนแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบจากการวัดและวิเคราะห์

1) จากการวิเคราะห์โดยวิธีการทดสอบการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดวิเคราะห์ของระบบ โดยใช้สารมาตรฐานที่มากับระบบคือ STG2 – Glass verification Test พบว่า ระบบการทำงานของเครื่องมีค่าความถูกต้องสูง (accuracy)

2) ผลการทดลองวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพของสารตัวอย่างมาตรฐานชนิดผงเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการวัดของหัววัดรังสี FC, SC และวิธีปกติ(BOTH) ดังรูปกราฟที่ 4.4 จะพบว่า FC จะวัดได้ในช่วงธาตุ K-Cu ($3.3 \leq E \leq 8 \text{ keV}$) ส่วน SC วัดได้ตั้งแต่ Cu ขึ้นไป ($E \geq 8 \text{ keV}$)

แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Ti –Cu จะเห็นว่าความเข้มรังสีของการเลือก SC จะต่ำกว่า FC ซึ่งถ้าเลือกวัดแบบวิธีปกติ (BOTH) ตามระบบอัตโนมัติจะพบว่าความเข้มรังสีของธาตุ Fe –Cu ของวิธีปกติ (BOTH) จะสูงกว่าหัววัดรังสี FC และ SC ตามลำดับ

3) ผลการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณของสารตัวอย่างมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการวัดของหัววัดรังสี FC, SC และปกติ (BOTH) ดังกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 4.8 – 4.25

- หัววัดรังสี FC. เมื่อทำการอัดด้วยแรงดันคงที่ $P=100 \text{ kN}$ ปรับเปลี่ยน $t = 1, 1.5$ และ 2 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 จะพบว่าการวัดความเข้มรังสีของของฟีก ในช่วงพลังงานระหว่างธาตุ K-Mn จะมีการเปลี่ยนแปลงมาก โดยที่เวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการบดตัวอย่างคือ $t = 1$ นาที

- หัววัดรังสี SC เมื่อทำการอัดด้วยความดันคงที่ $P=100 \text{ kN}$ ปรับเปลี่ยน $t = 1, 1.5$ และ 2 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 จะพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการบดตัวอย่างคือ $t=2$ นาที ซึ่งจะเห็นว่าการวัดธาตุของหัววัดรังสี SC จะให้ผลความเข้มของรังสีของฟีกในแต่ละธาตุสูงและการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีระหว่างธาตุ K-Mn มีน้อยมาก

- วัดวิธีปกติ มีการอัดด้วยความดันคงที่ $P = 100 \text{ kN}$ ปรับเปลี่ยน $t = 1, 1.5$ และ 2 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 จะพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการบดตัวอย่างคือ $t=2$ นาที ซึ่งจะให้ผลความเข้มรังสีของการวัดฟีกโดยเฉลี่ยสูง

ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 4.8 – 4.10 ถ้าเปรียบเทียบการให้ความดันอัดตัวอย่างมาตรฐานคงที่ $P=100 \text{ kN}$ และปรับเปลี่ยนเวลาในการบดสารตัวอย่าง $t = 1, 1.5$ และ 2 นาที จะเห็นว่า

การวัดและวิเคราะห์ในการเลือกหัววัดรังสี FC, SC และวิธีปกติ (BOTH) ควรจะเลือกใช้หัววัดรังสี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FC หรือวิธีปกติ เพราะเนื่องจากให้ผลการวัดความเข้มรังสีของฟีกในช่วง K-Mn สูงกว่าหิววัด SC ส่วนเวลาที่ใช้ในการบดจะพบว่าในช่วงพลังงาน K-Mn ควรใช้เวลาที่เหมาะสม 2 นาที เนื่องจากธาตุ Ca ที่เตรียมจากสารประกอบออกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ นั้นพบว่า ถ้าทำการบดเวลานานขึ้น ผลของความร้อนจากการบด จะมีผลต่อความเข้มรังสีของธาตุ Ca

ในทำนองเดียวกันถ้าให้ความดันคงที่ที่ $P = 150 \text{ kN}$ และปรับเปลี่ยนเวลาในการบด ตัวอย่าง $t = 1, 1.5$ และ 2 นาที (ตัวอย่างมาตรฐาน No.7, 8, 9) และความดันคงที่ที่ $P = 200 \text{ kN}$ ปรับเปลี่ยนเวลาในการบดตัวอย่าง $t = 1, 1.5$ และ 2 นาที (ตัวอย่างมาตรฐาน No.10, 11, 12) จะเห็นว่าเวลาที่เหมาะสมโดยเฉลี่ยในการบดตัวอย่างคือ 2 นาที และควรจะใช้ความดันในการอัดตัวอย่างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 150 kN พบว่าการวัดของหิววัดรังสี FC และ SC และวิธีปกติ ให้ผลการวัดความเข้มรังสีของฟีกในแต่ละธาตุในช่วง K-Cu เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

4) จากรูปกราฟที่ 4.17-4.25 ซึ่งการเปรียบเทียบการวัดของหิววัดรังสี FC , SC และวิธีปกติ โดยการวัดด้วยแรงดัน P คงที่ และปรับเปลี่ยนเวลาในการบดนั้น จะพบว่าถ้าทำการเปรียบเทียบระหว่าง FC และ SC นั้น จะเห็นว่าในย่านพลังงานตั้งแต่ธาตุ K-Fe จะให้ผลการวัดความเข้มรังสีของฟีกในแต่ละธาตุได้สูงหรือเห็นฟีกที่ชัดเจนกว่าหิววัดรังสี SC แต่ในระดับพลังงานเริ่มตั้งแต่ Cu ซึ่งมีระดับพลังงาน 8.047 keV จะพบว่าหิววัด FC จะให้ผลการวัดความเข้มรังสีของฟีกธาตุ Cu ไม่สูง เมื่อเทียบกับหิววัดรังสี SC ดังนั้นจะสรุปได้ว่า ในการทำงานของหิววัดรังสีของระบบ WDXRFS Model SRS3400 AXS ของ Bruker จะตรงตามทฤษฎีที่ออกแบบมากับระบบคือหิววัดรังสี FC จะวัดในย่าน $0.2 \text{ keV} < E < 8 \text{ keV}$ หรือ $2\theta = 4$ และ 148° (Soft Radiation) ส่วนหิววัดรังสี SC จะวัดในย่าน $E > 4 \text{ keV}$ หรือ $2\theta \geq 40^\circ$ (Hard Radiation) และถ้าเปรียบเทียบกันจากกราฟของผลการทดสอบในการเลือกใช้งาน สำหรับกรณีวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ระหว่าง $4 \text{ keV} \leq E \leq 8 \text{ keV}$ นั้น ควรจะเลือกใช้หิววัดรังสี FC มากกว่าหิววัดรังสี SC เพราะให้ผลการวัดความเข้มรังสีของฟีกในแต่ละธาตุได้สูงกว่าหรือให้ประสิทธิภาพในการวัดได้สูงกว่า

5.2 วิจัยรณผลการทดลอง

1) จากคู่มือของเครื่อง WDXRFS Model SRS3400 AXS ได้บอกว่าหิววัดรังสีชนิด FC และ SC นั้น สามารถวัดธาตุในช่วงพลังงาน 4-8 keV หรือธาตุ Ca – Cu ได้เช่นเดียวกัน แต่ขณะวิเคราะห์พบว่าโปรแกรมที่ใช้งานกำหนดว่าหิววัดรังสี FC สามารถวัดธาตุได้ตั้งแต่ C - Mn ส่วนหิววัดรังสี SC สามารถวัดธาตุได้ตั้งแต่ธาตุที่มีพลังงานมากกว่า Cu ขึ้นไป และธาตุช่วง Fe - Cu นั้นต้องใช้หิววัดรังสี FC และ SC พร้อมกันในการวัด (BOTH) จึงทำให้การวัดธาตุชนิดต่างๆ ต้องใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัววัดรังสีให้ตรงตามที่โปรแกรมกำหนด เพราะถ้าไม่ตรงโปรแกรมจะไม่คำนวณปริมาณธาตุนั้นๆ ออกมาให้

2) การเปรียบเทียบความแตกต่างของหัววัดรังสี FC และ SC นั้นในการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพจะเห็นผลการเปรียบเทียบได้ชัดเจนตามทฤษฎี ส่วนในการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณพบว่าค่อนข้างไม่ชัดเจน เพราะเนื่องจากระบบการทำงานที่ใช้วิเคราะห์อยู่ตามปกติจะเป็นแบบการใช้โปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ(BOTH) ซึ่งถ้าทำการเลือกหัววัดโดยตรงพบว่าหัววัดรังสี FC และ SC นั้นไม่สามารถคำนวณปริมาณของธาตุมาให้ได้ ซึ่งทำให้ผลการเปรียบเทียบในทางปริมาณจึงยังไม่สามารถสรุปการเปรียบเทียบความแตกต่างของหัววัดรังสีได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาโปรแกรมการวิเคราะห์ของระบบในทางปฏิบัติให้มากขึ้น เพราะการใช้งานระบบในปัจจุบันตามปกติ จะให้ระบบทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งในความเป็นจริงการใช้งานของระบบสามารถปรับแต่งฟังก์ชันการทำงานได้หลายรูปแบบ
- 2) เมื่อทำการอัดสารตัวอย่างเรียบร้อยแล้วควรทำการวิเคราะห์ทันที เนื่องจากสารตัวอย่างอาจดูดความชื้นจากอากาศได้
- 3) จากการศึกษาระบบการวัดนี้ พบว่ายังมีแนวทางการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าสูง(HV) และกระแส(mA) ที่ให้กับหลอดรังสีเอกซ์ เพื่อหาความเหมาะสมของการวัดปริมาณธาตุแต่ละตัว

เอกสารอ้างอิง

สาหร่าย คุณีพงษ์. 2538. Sequential X-Ray Fluorescence Spectrometer. ชลบุรี :

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย. 2547. เครื่องมือวิเคราะห์ 1.กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Pol De Pape. 2004. Bruker XRF Workshop. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่องการวัดและ

วิเคราะห์ธาตุในระบบการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบแจกแจงความยาวคลื่น. สยามซิตีไฮเต็ล,

5 กันยายน

Knoll Glenn F. 1989. Radiation detection and Measurement. 2nd edition.

Wiley and Sons



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X-RAY WAVELENGTHS AND TWO-THETA TABLES

CRYSTAL LIF200

SPACING 2D =

4.02670

	2θ	Z	EL	LINE	N	LAMBDA	ENERGY
*	50.80	62	SM	LY1	1	1.7272	7.14
	50.84	59	PK	KA	5	.3457	35.70
*	50.84	73	TA	LL	1	1.7284	7.14
	50.91	55	CS	KB2	5	.3461	35.65
	50.99	82	PB	LY5	2	.8665	14.24
	50.99	53	I	KA1	4	.4333	28.48
	51.02	79	AL	LY4	2	.8670	14.23
	51.05	81	TL	LY1	2	.8675	14.22
*	51.14	69	TM	LA2	1	1.7381	7.10
	51.15	80	HG	LY3	2	.8691	14.20
	51.18	53	I	KA	4	.4348	28.38
	51.23	50	SN	KB1	4	.4352	28.35
	51.26	88	KA	LB6	2	.8709	14.17
*	51.27	65	TB	LB6	1	1.7422	7.08
	51.32	59	PK	KA2	5	.3467	35.38
*	51.35	60	ND	LY4	1	1.7445	7.07
*	51.38	64	GD	LB2	1	1.7455	7.07
*	51.43	65	TB	LB3	1	1.7472	7.06
	51.55	80	HG	LY2	2	.8754	14.10
	51.56	53	I	KA2	4	.4376	28.18
	51.62	38	SK	KA	2	.8766	14.08
	51.72	46	PD	KA1	3	.5854	21.08
*	51.73	68	EK	LN	1	1.7566	7.02
*	51.73	26	FE	KB	1	1.7566	7.02
	51.83	80	HG	LY6	2	.8799	14.02
	51.86	46	PD	KA	3	.5869	21.03
	51.92	85	AT	LB3	2	.8813	14.00
	52.14	46	PD	KA2	3	.5898	20.92
	52.21	55	CS	KB1	5	.3544	34.82
*	52.37	65	TB	LB1	1	1.7768	6.95
*	52.45	62	SM	LY5	1	1.7793	6.94
	52.47	49	IN	KB2	4	.4450	27.73
	52.50	91	PA	LY4	3	.5937	20.76
*	52.52	72	HF	LL	1	1.7814	6.93
*	52.60	68	EK	LAI	1	1.7842	6.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PET 20 = 8.750n

ELEMENT	LAMBDA	ORNER	1	2	3	4	5	6	7	8
13 AL	7.95113	K.	ABS	130.65						
13 AL	7.98109	KB 1		131.60						
13 AL	8.33669	KA 1		144.64						
13 AL	8.33751	KA 1		144.67						
13 AL	8.33916	KA 2		144.75						
14 SI	6.74460	K	ABS	100.85						
14 SI	6.76814	KB 1		101.34						
14 SI	7.12528	KA 1		109.04						
14 SI	7.12610	KA 1		109.06						
14 SI	7.12773	KA 2		109.10						
15 P	5.78657	K	ABS	82.80						
15 P	5.80380	KB 1		83.10						
15 P	6.15491	KA 1		89.40						
16 S	5.01822	K	ABS	69.90						
16 S	5.03109	KB 1		70.21						
16 S	5.37196	KA 1		75.75						
16 S	5.37288	KA 1		75.76						
16 S	5.37472	KA 2		75.80						
17 CL	4.39666	K	ABS	60.33						
17 CL	4.40308	KB 1		60.43						
17 CL	4.72760	KA 1		65.41						
17 CL	4.72857	KA 1		65.42						
17 CL	4.73050	KA 2		65.45						
18 A	3.87068	K	ABS	52.51						
18 A	4.19162	KA 1		57.25	146.70					
18 A	4.19260	KA 1		57.26	146.79					
18 A	4.19456	KA 2		57.29	146.97					
19 K	3.43645	K	ABS	46.25						
19 K	3.44144	KB 5		46.32	103.74					
19 K	3.45376	KB 1		46.50	104.26					
19 K	3.74122	KA 1		50.63	117.55					
19 K	3.74235	KA 1		50.64	117.61					
19 K	3.74402	KA 2		50.68	117.72					
20 CA	3.07016	K	ABS	41.08						
20 CA	3.07420	KB 5		41.14	89.28					
20 CA	3.08903	KB 1		41.35	89.45					
20 CA	3.35825	KA 1		45.14	100.28					
20 CA	3.35936	KA 1		45.15	100.32					
20 CA	3.36159	KA 2		45.19	100.41					
21 SC	2.75726	K	ABS	36.74						
21 SC	2.76357	KB 5		36.82	78.35	142.71				
21 SC	2.77950	KB 1		37.04	78.89	144.72				
21 SC	3.03114	KA 1		40.54	87.71					
21 SC	3.03227	KA 1		40.55	87.75					
21 SC	3.03452	KA 2		40.58	87.83					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PET 2D = 0.7500

ELEMENT	LAMBDA	ORDER	1	2	3	4	5	6	7	8
22	TI	2.49750	K	ABS	33.17					
22	TI	2.49804	KB 5	33.18	69.64	117.84				
22	TI	2.51381	KB 1	33.39	70.14	119.06				
22	TI	2.74841	KA 1	36.61	77.84	140.89				
22	TI	2.74963	KA	36.63	77.88	141.03				
22	TI	2.75207	KA 2	36.66	77.95	141.32				
23	V	2.26902	K	ABS	30.06					
23	V	2.26943	KB 5	30.06	62.49	102.17				
23	V	2.28434	KB 1	30.27	62.95	103.11				
23	V	2.50348	KA 1	33.25	69.81	118.26				
23	V	2.50475	KA	33.27	69.85	118.36				
23	V	2.50750	KA 2	33.30	69.93	118.55				
24	CR	2.07012	K	ABS	27.37					
24	CR	2.07070	KB 5	27.38	56.50	90.46	142.39			
24	CR	2.08460	KB 1	27.57	56.92	91.25	144.75			
24	CR	2.28962	KA 1	30.34	63.11	103.44				
24	CR	2.29092	KA	30.36	63.15	103.53				
24	CR	2.29351	KA 2	30.39	63.23	103.69				
25	MN	1.89656	K	ABS	25.03					
25	MN	1.89698	KB 5	25.04	51.39	81.14	120.27			
25	MN	1.91015	KB 1	25.22	51.78	81.83	121.67			
25	MN	2.10175	KA 1	27.80	57.42	92.21	147.81			
25	MN	2.10306	KA	27.81	57.46	92.28	148.06			
25	MN	2.10568	KA 2	27.85	57.54	92.43	148.56			
26	FE	1.74334	K	ABS	22.98					
26	FE	1.74406	KB 5	22.99	44.99	73.45	105.74	170.55		
26	FE	1.75653	KB 1	23.16	47.34	74.06	106.83			
26	FE	1.93597	KA 1	25.57	52.53	83.17	124.51			
26	FE	1.93729	KA	25.56	52.57	83.24	124.65			
26	FE	1.93991	KA 2	25.62	52.64	83.38	124.95			
27	CO	1.60811	K	ABS	21.18					
27	CO	1.60882	KB 5	21.19	43.15	66.95	94.69	133.66		
27	CO	1.62075	KB 1	21.35	43.49	67.52	95.62	135.68		
27	CO	1.78892	KA 1	23.59	48.27	75.66	109.73			
27	CO	1.79021	KA	23.61	48.31	75.73	109.85			
27	CO	1.79278	KA 2	23.65	48.38	75.86	110.38			
28	NI	1.48802	K	ABS	19.58					
28	NI	1.48853	KB 5	19.59	39.78	61.37	85.76	116.55		
28	NI	1.48861	KB 2	19.59	39.78	61.38	85.77	116.56		
28	NI	1.50010	KB 1	19.74	40.10	61.90	86.59	118.01		
28	NI	1.65784	KA 1	21.84	44.54	69.28	98.55	142.65		
28	NI	1.65913	KA	21.86	44.57	69.34	98.66	142.91		
28	NI	1.66169	KA 2	21.89	44.64	69.46	98.86	143.44		
29	CU	1.38043	K	ABS	18.15					
29	CU	1.38102	KB 2	18.16	36.80	56.52	78.30	104.21	142.52	
29	CU	1.38146	KB 5	18.17	36.81	56.54	78.33	104.26	142.63	
29	CU	1.39217	KB 1	18.31	37.11	57.02	79.05	105.41	145.55	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N=LAMBDA	LAMBDA	N	ELEMENT	Q 6.68	RI	NAOL	LIF	Q 2.75	TOPAZ
0.98409	0.49204	2	50 SN KA	16.93	1A.06	20.09	28.29	41.95	42.55
	0.98428	1	34 SE KB 5	16.93	1A.06	20.10	28.30	41.96	42.56
0.98444	0.19689	5	71 LU KB 2	16.93	1A.06	20.10	28.30	41.97	42.57
0.98599	0.32866	3	57 LA KB 3	16.96	1A.09	20.13	28.35	42.04	42.64
0.98600	0.49300	2	47 AQ KB 5	16.96	1A.09	20.13	28.35	42.04	42.64
	0.98619	1	80 HQ LB 9	16.96	1A.10	20.14	28.35	42.05	42.65
0.98693	0.16449	6	78 PT KB 3	16.98	1A.11	20.15	28.38	42.08	42.68
0.98715	0.24679	4	65 TB KB 3	16.98	1A.11	20.16	28.38	42.09	42.69
	0.98769	1	78 PT LY 5	16.99	1A.12	20.17	28.40	42.11	42.72
	0.98891	1	81 TL LBP7	17.01	1A.15	20.19	28.43	42.17	42.77
	0.98905	1	83 BI LB17	17.01	1A.15	20.20	28.44	42.17	42.78
	0.98951	ABS	75 RE L 1	17.02	1A.16	20.21	28.45	42.19	42.80
0.99004	0.49502	2	50 SN KA 2	17.03	1A.17	20.22	28.47	42.22	42.82
	0.99020	1	81 TL LB 7	17.03	1A.17	20.22	28.47	42.23	42.83
0.99081	0.14155	7	82 PB KB 4	17.04	1A.18	20.23	28.49	42.25	42.86
	0.99091	1	77 IR LY 1	17.05	1A.18	20.23	28.49	42.26	42.86
	0.99181	1	76 OS LY 3	17.06	1A.20	20.25	28.52	42.30	42.90
0.99199	0.19840	5	76 OS KA	17.06	1A.20	20.26	28.52	42.31	42.91
	0.99212	1	34 SE KB 1	17.07	1A.21	20.26	28.53	42.31	42.92
0.99218	0.16536	6	82 PB KA 1	17.07	1A.21	20.26	28.53	42.31	42.92
	0.99245	1	75 RE LY 4	17.07	1A.21	20.27	28.54	42.33	42.93
0.99248	0.24812	4	64 GD KB 2	17.07	1A.21	20.27	28.54	42.33	42.93
	0.99262	1	34 SE KB 3	17.08	1A.22	20.27	28.54	42.33	42.94
	0.99330	1	83 BI LB 6	17.09	1A.23	20.28	28.56	42.36	42.97
	0.99330	1	75 RE LYP4	17.09	1A.23	20.28	28.56	42.36	42.97
0.99334	0.14191	7	82 PB KB 2	17.09	1A.23	20.28	28.56	42.37	42.97
0.99359	0.14194	7	83 BI KB 1	17.09	1A.23	20.29	28.57	42.38	42.98
0.99402	0.49701	2	47 AG KB 1	17.10	1A.24	20.30	28.58	42.40	43.00
0.99422	0.16570	6	83 BI KA 2	17.10	1A.25	20.30	28.59	42.41	43.01
0.99531	0.49765	2	47 AG KB 3	17.12	1A.27	20.33	28.62	42.45	43.06
0.99547	0.33152	3	60 ND KA 1	17.12	1A.27	20.33	28.63	42.46	43.07
	0.99561	1	80 HQ LB10	17.13	1A.27	20.33	28.63	42.47	43.08
0.99645	0.24911	4	69 TH KA 2	17.14	1A.29	20.35	28.65	42.50	43.11
	0.99799	1	76 OS LY 2	17.17	1A.32	20.38	28.70	42.57	43.18
0.99824	0.33275	3	56 BA KB 2	17.17	1A.32	20.39	28.71	42.58	43.19
0.99940	0.14277	7	83 BI KB 3	17.19	1A.34	20.41	28.74	42.64	43.25
	1.00065	1	81 TL LB 3	17.21	1A.36	20.44	28.78	42.69	43.30
	1.00104	ABS	76 OS L 11	17.22	1A.37	20.44	28.79	42.71	43.32
	1.00114	1	76 OS LY 6	17.22	1A.37	20.45	28.79	42.71	43.33
1.00203	0.16700	6	82 PB KA	17.24	1A.39	20.46	28.82	42.75	43.37
1.00416	0.16736	6	77 IR KB 5	17.28	1A.43	20.51	28.88	42.85	43.46
	1.00468	1	88 RA LA 1	17.28	1A.44	20.52	28.90	42.87	43.49
	1.00483	1	76 OS LY 8	17.29	1A.44	20.52	28.90	42.88	43.49
	1.00493	1	76 OS LYP8	17.29	1A.44	20.52	28.90	42.88	43.49
	1.00741	1	82 PB LB 4	17.33	1A.49	20.57	28.98	43.00	43.61
1.00752	0.12594	8	92 U KA 1	17.33	1A.49	20.58	28.98	43.00	43.62
1.00813	0.20163	5	76 OS KA 2	17.34	1A.50	20.59	29.00	43.03	43.64
1.00934	0.33645	3	60 ND KA	17.36	1A.53	20.61	29.03	43.08	43.70
	1.00983	1	80 HQ LB 5	17.37	1A.53	20.62	29.05	43.10	43.72
1.00992	0.25248	4	68 ER KA 1	17.37	1A.54	20.63	29.05	43.11	43.73
	1.01033	1	81 TL LB 2	17.38	1A.54	20.64	29.06	43.13	43.74
1.01059	0.20212	5	71 LU KB 1	17.39	1A.55	20.64	29.07	43.14	43.76
	1.01074	1	75 RE LY11	17.39	1A.55	20.64	29.07	43.14	43.76
1.01120	0.16853	6	77 IR KB 1	17.40	1A.56	20.65	29.09	43.17	43.78
	1.01134	1	90 TH LS	17.40	1A.56	20.66	29.09	43.17	43.79
	1.01201	1	81 TL LB15	17.41	1A.58	20.67	29.11	43.20	43.82
1.01339	0.16890	6	76 OS KB 2	17.44	1A.60	20.70	29.15	43.26	43.88
1.01389	0.20278	5	75 RE KA 1	17.44	1A.61	20.71	29.17	43.29	43.91
1.01437	0.33812	3	56 BA KB 5	17.45	1A.62	20.72	29.18	43.31	43.93
1.01459	0.14494	7	82 PB KB 5	17.46	1A.62	20.72	29.19	43.32	43.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้