

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์

นาย บัณฑิต สะเดา

รฟ.
๙๒๒๗๐
๒๕๓๓-๒๕๓๔

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

61๒๕๔๘๗๙๐

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๓๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X-RAY DIFFRACTOMETER

Mr. BORISUT SADAO



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

1990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

เอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์

โดย

นาย บริสุทธิ์ สะเดา

ภาควิชา

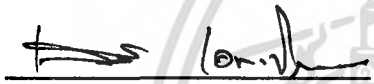
ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

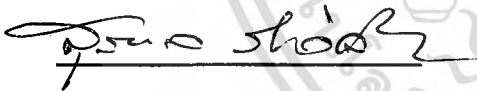
อนุมัติให้หัวข้อโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต)

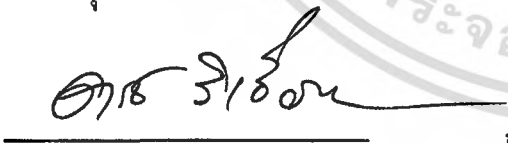
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



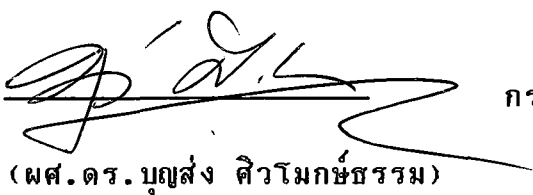
(รศ. สุรพล รักวิจิตร)

ประธานกรรมการ



กรรมการ

(ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย)



กรรมการ

(ผศ. ดร. บุญส่ง ติวโมกษ์ธรรม)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

นักศึกษา นาย บวิสุทธิ สะเดา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2533

บทคัดย่อ

เป็นการศึกษาพัฒนา และตรวจซ่อม ระบบการทำงานของ X-RAY
DIFFRACTOMETER และได้สร้างส่วนที่ขาดหายไปเช่น TUBE CURRENT
STABILIZER , GONIOMETER COOLING SYSTEM , SAMPLE HOLDER และ
RATEMETER และได้ประกอบขึ้นเป็นเครื่องที่สามารถใช้งานได้

Special Project Title X-ray Diffractometer

Name Mr. Borisut sadao

Special Project Advisor Asst.Prof.Dr. Aree Wichainchai

Department Applied Physics

Academic Year 1990

Abstract

This is intended to study X-ray diffractometer system development included maintenance and construct some part such as Tube Current Stabilizer ,Goniometer ,Cooling System , Sample Holder and Ratemeter and provide system to be useable.

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ พ.ศ. ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่คอยให้คำปรึกษามาโดยตลอด
ขอขอบคุณ พี่เชนต์ (ไพบูลย์) ผู้ที่ทำให้งานดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ขอขอบคุณน้องๆ
ที่ให้ความช่วยเหลือนอกเหนือจากเรื่องงาน ขอขอบคุณทุกคนที่คอยให้กำลังใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษไทย	ก.
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข.
กิตติกรรมประกาศ	ค.
สารบัญ	ง.
สารบัญตาราง	จ.
สารบัญรูปภาพ	ฉ.
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
บทที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์	17
บทที่ 4 การทดลอง	60
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิจารณ์	79
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก ก.	82
ภาคผนวก ข.	88
ภาคผนวก ค.	93
ประวัติผู้เขียน	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้าที่
2.1	แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดี่ยว โคธใช้ ตัวกรองชนิดต่างๆ ที่เหมาะสมกับเป้าโลหะ	8
3.1	แสดงค่า First Ionization Potentials	37
5.1	ผลการตรวจสอบการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRD	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	ชื่อรูป	หน้าที่
2.1	แสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ความยาวคลื่นและแรงดันต่างๆ	3
2.2	แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานค่าต่างๆ	5
2.3	พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป้าโลหะชนิด Mo	6
2.4	การใช้ตัวกรองชนิด Zr กรองรังสีเอกซ์ช่วง K ออกจากเป้าโลหะ Mo	7
2.5	แสดงการเกิดการหักเหระเจิง (diffraction)	10
2.6	แสดงการพิจารณาการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์	11
2.7	โครงสร้างพื้นฐานของหลอดรังสีเอกซ์	13
2.8	โครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์ในปัจจุบัน	15
3.1	แผนภาพแสดงวงจรวัดของเครื่อง XRD	18
3.2	แสดงตัวอย่างของผลที่ได้จาก recorder (สารตัวอย่างคือ NaCl)	19
3.3	แสดงกล้อง Debye-Scherrer พร้อมฝาปิด	23
3.4	โครงสร้างการหาค่าด้วยวิธีของ Debye-Scherrer	23
3.5	แสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี pinhole photogaph	24
3.6	แสดงลักษณะของกล้องที่ใช้วิธี focusing	26
3.7	แสดงลักษณะของกล้องที่ใช้วิธี focusing ของ Seemann-Bohlin	27
3.8	แสดงลักษณะของกล้องที่ใช้วิธี focusing แบบ back-reflection	28
3.9	แสดงผลของฟิล์มที่ได้จากการหักเหระเจิงของสารตัวอย่างชนิดต่างๆ	31
3.10	แสดงแผนผังส่วนประกอบของเครื่อง XRD	32
3.11	แสดงถึงผลกระทบของอัตราความนับจาก counting losses	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง-ณ.1-และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	ชื่อรูป	หน้าที่
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E_{\alpha\alpha}$ (เป็นเปอร์เซ็นต์) กับความยาวคลื่น	35
3.13	แสดงการกระจายของแอมพลิจูดของพัลส์	36
3.14	แสดงการ plot จำนวน(N) คู่ของอิออนที่เกิดขึ้น กับความต่างศักย์ที่ให้ตัวนับ	39
3.15	แสดงโครงสร้างของตัวนับชนิดที่บรรจุก๊าซรวมทั้งวงจรพื้นฐานของรังสีเอกซ์สำหรับตัวนับชนิดต่างๆ	41
3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วกับค่า gas amplification	42
3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วกับค่าอัตรานับ	43
3.18	แสดงความแตกต่างของการเกิดไอออนระหว่างตัวนับชนิด proportional กับตัวนับชนิด geiger	44
3.19	แสดงโครงสร้างภายในตัวนับ (A) เป็นแบบ Geiger (B) เป็นแบบ proportional	46
3.20	โครงสร้างของตัวนับชนิด scintillation	47
3.21	แสดงถึงการกระจายของขนาดความสูงของพัลส์สำหรับตัวนับชนิดต่างๆ	48
3.22	โครงสร้างของตัวนับชนิดสารกึ่งตัวนำ	49
3.23	ตัวอย่างการใช้ pulse-height analyser กับพัลส์ขนาดต่างๆ	51
3.24	(a) วงจรพื้นฐานของ ratemeter (b) ผลตอบสนองของวงจร	53
3.25	วงจรของ ratemeter ที่ใช้ในการวัด	54
3.26	ผลของค่าคงที่เวลากับการกะเพื่อมของอัตราภาวนับเมื่อ (T.C) < (T.C) < (T.C)	55

รูปที่	ชื่อรูป	หน้าที่
4.1	เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์ของ SIEMEN ได้รับจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย สภาพส่วนต่างๆ ของเครื่องทั้งหมดทำงานไม่ได้	61
4.2	เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์ของ PHILIPS ได้มาจาก กรมชลประทาน สภาพชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องเกือบครบสมบูรณ์ และมีบางส่วนที่ขาดหายไปซึ่งพอที่จะสร้างขึ้นมาใหม่ได้	62
4.3	ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงสำหรับหลอดรังสีเอกซ์	63
4.4	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับหลอดรังสีเอกซ์	64
4.5	ลักษณะของส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่	65
4.6	การทดสอบการทำงานของส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่	65
4.7	ลักษณะของส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่	66
4.8	การทดสอบการทำงานของส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่	66
4.9	ลักษณะของส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่	67
4.10	การทดสอบการทำงานของส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่	67
4.11	ลักษณะของส่วนควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า	68
4.12	การทดสอบการทำงานของส่วนควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า	68
4.13	ลักษณะของส่วนขยายกำลัง	69
4.14	การทดสอบการทำงานของส่วนขยายกำลัง	69
4.15	ลักษณะของส่วนแปลงแรงดันไฟฟ้า	70
4.16	การทดสอบการทำงานของส่วนแปลงศักดาไฟฟ้า	70
4.17	ลักษณะของส่วนตั้งเวลา	71
4.18	ลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและตัวควบคุม Goniometer	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - 3 -
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	ที่อธิบาย	หน้าที่
4.19	ลักษณะของหัววัดรังสีเอกซ์	72
4.20	Source มาตรฐาน S1780	72
4.21	หลอดรังสีเอกซ์ชนิด Cu-tube	73
4.22	Goniometer ของเครื่อง XRD	74
4.23	ระบบหล่อเย็นที่สร้างขึ้น	75
4.24	แผนผังของระบบหล่อเย็น	76
4.25	แผนผังการทำงานของส่วนกำเนิดรังสีเอกซ์	78
4.26	แผนผังการทำงานของหัววัดรังสีเอกซ์	78
4.27	แผนผังการทำงานของ Goniometer และส่วนควบคุม	78
ก.1	ระบบทำความเย็นที่ได้ออกแบบและสร้างเพื่อทำให้น้ำที่ใช้หล่อเย็น มีอุณหภูมิ 18-20 c	83
ก.2	การติดตั้งระบบทำความเย็นที่บริเวณภายนอกอาคาร เพื่อให้สะดวกในการระบายความร้อน	84
ก.3	ปั้มน้ำสำหรับใช้ในการหล่อเย็นเครื่อง XRD โดยเป็นระบบน้ำหมุนเวียน	85
ก.4	การติดตั้งและระบบที่สมบูรณ์ของระบบหล่อเย็นสำหรับเครื่อง XRD	86
ก.5	การติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้ากับเครื่อง XRD	87
ข.1	การสำรวจส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ภายในเครื่อง XRD ที่ได้รับมา	89
ข.2	การตรวจสอบและแก้ไขส่วนต่างๆ ของเครื่อง XRD ให้ทำงานได้เป็นปกติ	90
ข.3	การติดตั้งและรูปแสดงลักษณะของหลอดรังสีเอกซ์	91
ข.4	เครื่อง XRD หลังจากการตรวจสอบและประกอบสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและบทบาทของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

การนำรังสีเอกซ์มาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์นั้นเป็นที่รู้จักกันดี ส่วนการใช้รังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารนั้น ก็ได้เริ่มใช้กันมานานแล้วเช่นกัน นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1919 HULL ได้ศึกษาสารต่างๆ ในลักษณะผงผลึก โดยใช้หลักการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-RAY DIFFRACTION) ต่อมาในปี ค.ศ. 1938 HANAWALT ET. AL. แห่ง DOWN CHEMICAL CO., (MICHIGAN) ได้ทำการศึกษา และเก็บ PATTERN ของแร่ชนิดต่างๆ ไว้ ซึ่งผลงานเหล่านี้ในเวลาต่อมาได้รับการรับรองจาก ASTM (AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS) และพิมพ์เผยแพร่เป็นมาตรฐานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1942 ซึ่งตีพิมพ์โดย BRITISH INSTITUTE OF PHYSICS ในปี ค.ศ. 1950 ได้เก็บ PATTERN เพิ่มมากขึ้นจนมีจำนวนถึง 4,000 ตัว จากนั้นได้รับการปรับปรุงเรื่อยมา จนในปี ค.ศ. 1971 ได้ใช้เป็นมาตรฐานใน JCPDS (JOINT COMMITTION POWDER DIFFRACTION STANDARD) ซึ่งมี PATTERN ที่เป็นข้อมูลมาตรฐาน เป็นจำนวนถึง 21,500 ตัว โดยมีทั้งที่เป็นสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์

เครื่อง XRD จึงเป็นเครื่องมือวิเคราะห์สารทั้งชนิดใหม่ และชนิดเก่า โดยอาศัยใช้หลักการพิจารณาจาก PATTERN ของสารที่ได้จากการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ จึงมีความสำคัญ และมีประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรม เช่น

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น นอก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้เครื่อง XRD ยังมีความสำคัญมากในงานวิจัยทดลองเพื่อศึกษาส่วนประกอบของสาร และโครงสร้างผลึก ในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำรังสีเอกซ์มาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกด้วย เช่น การหาขนาด และพื้นที่ผิวของสารที่มีขนาดเล็กหรือเป็นผง และการวัดความเค้นในโลหะ เป็นต้น ข้อดีของเครื่อง XRD นั้นก็คือสามารถวิเคราะห์สารประกอบ ได้รวดเร็วกว่า การวิเคราะห์แบบของเหลว (wet analysis) และสามารถแยกชนิดของสารประกอบในของผสมได้ง่ายกว่าวิธีอื่นๆ เช่น X-RAY FLUORESCENCE SPECTROMETER ELECTRON MICROPROBES เป็นต้น ที่สามารถวิเคราะห์ได้ธาตุต่างๆ ได้แต่ไม่สามารถบอกชนิดของสารประกอบได้

1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ

สืบเนื่องจากโครงการวิจัยของสภาวิจัยแห่งชาติ เรื่อง การสร้างและพัฒนาเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์แบบกึ่งอัตโนมัติ โดยภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ จึงได้มีการเสนอให้มีโครงการพิเศษเพื่อสนับสนุนการวิจัยดังกล่าว โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการเบื้องต้นทางฟิสิกส์ ที่เกี่ยวกับเครื่อง XRD นี้ โดยเป้าหมายของโครงการจะเป็นการศึกษา และปรับปรุงแก้ไขเครื่อง XRD และส่วน DETECTOR ที่มีอยู่ให้สามารถใช้งานได้ โดยแยกส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องออกมาศึกษา และทดสอบการทำงานเป็นส่วนตัว ไป

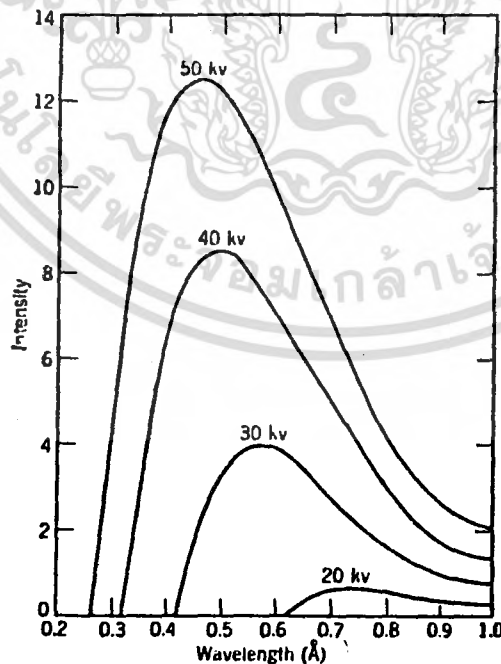
2.1 หลักการเบื้องต้นของรังสีเอกซ์

2.1.1 การเกิดรังสีแบบต่อเนื่อง (continuous radiation)

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 1 - 1000 Å ซึ่ง
เป็นช่วงที่ตาไม่สามารถมองเห็น และมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง

รังสีเอกซ์ถูกค้นพบโดย ROENTGEN ในปี ค.ศ. 1895 รังสีเอกซ์เกิดจาก
อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งชนเป้าโลหะ (metal target) จนสามารถทำให้
อิเล็กตรอนในชั้นของวงโคจรที่มีพลังงานต่ำๆ หลุดออกมาจากอะตอม และอิเล็กตรอน
จากวงโคจรที่มีพลังงานสูงก็จะเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป พร้อมทั้งจะ
คายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์

ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า V นั้นมีได้หลายค่า



รูปที่ 2.1 แสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ความยาวคลื่นและแรงดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น โดยค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่สั้นที่สุด (พลังงานสูงสุด) มีค่า ดังสมการที่ (2.1)

$$\lambda_{\min} = hc/eV = 1240/V \quad (2.1)$$

โดยที่ h = ค่าคงที่ของพลังค์

c = ความเร็วแสง

e = ประจุไฟฟ้า

V = แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนจากไส้หลอดรังสีเอกซ์
มาชนที่เป้าโลหะ

แม้ว่าความเข้มของรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามรูปที่ 2.1 เมื่อเพิ่ม กระแส (i) และแรงดันไฟฟ้า (V) แต่ความเข้มของรังสีเอกซ์ยังขึ้นกับจำนวน อะตอม (atomic number) (Z) ของเป้าโลหะด้วย ซึ่ง KRAMERS ได้อธิบายการ เกิด distribution ของรังสีแบบต่อเนื่อง นั้นเป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$I \lambda \cdot d\lambda = K \cdot i \cdot Z^2 \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - 1 \right) \frac{1}{\lambda^2} d\lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ I = ความเข้มของรังสีเอกซ์

Z = จำนวนอะตอมของเป้าโลหะที่หนาเป็น infinite

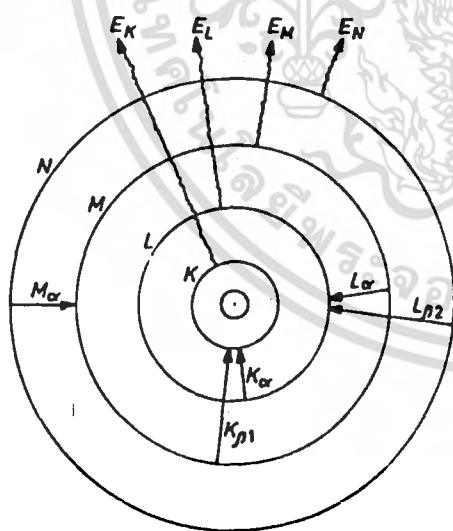
λ = ความยาวคลื่น

i = กระแสสูงสุดที่ λ_{\min}

K = ค่าคงที่

2.1.2 คุณสมบัติเฉพาะของรังสีเอกซ์

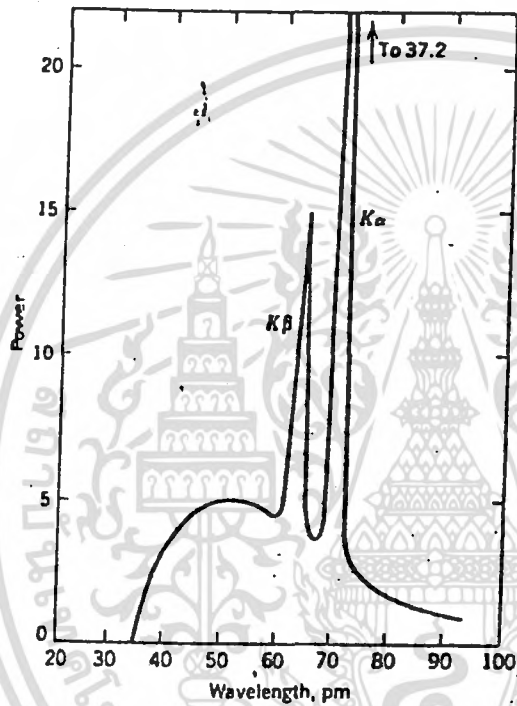
ลักษณะการย้ายที่ (transition) ของอิเล็กตรอนจากชั้นของวงโคจรต่างๆ เป็นไปได้หลายแบบ เนื่องจากค่าพลังไอออไนเซชันของอิเล็กตรอนจะลดลงตามวงโคจรตามลำดับคือ $K' > L' > M' > N'$ รังสีที่เกิดขึ้นจะมีค่าพลังงานตามความแตกต่างของพลังงานระหว่างชั้นที่ย้ายไป เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L ไปแทนที่ในชั้น K จะได้รังสี K และมีพลังงานเท่ากับ $(E_K - E_L)$ ถ้าเป็นอิเล็กตรอนจากชั้นอื่นๆ ก็จะได้รังสีที่มีพลังงานต่างกันตามรูปที่ 2.2 เป็นต้น แต่สำหรับการใช้งานสำหรับการเกิดการหักเหกระจาย (diffraction) จะอยู่ในช่วง $0.2 - 2.5 \text{ \AA}$ ทั้งนี้เพราะสามารถทะลุทะลวงสารตัวอย่างที่เป็นผง (powder) โดยที่ไม่ทำลายสาร และยังมีควมยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึกอีกด้วย



Transitions giving X-radiation.
 $(E)_{K_{\alpha}} = E_K - E_L$
 $(E)_{K_{\beta 1}} = E_K - E_M$
 $(E)_{L_{\alpha}} = E_L - E_M$
 $(E)_{L_{\beta}} = E_L - E_N$
 $(E)_{M_{\alpha}} = E_M - E_N$

รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานค่าต่างๆ

โดยทั่วไป รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่นที่เด่นเพียงสองค่าเท่านั้น เช่น ถ้าเป้าที่ใช้เป็น Mo ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์สำหรับค่า K_{α} มีค่า 70.9 pm. และ K_{β} มีค่า 63.2 pm. เมื่อให้พลังงาน 35 KV กับขั้วทั้งสองของหลอดรังสีเอกซ์ จากสมการที่ (2.1) จะได้ $\lambda_{min} = 35.4 \text{ pm}$. ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป้าโลหะชนิด Mo

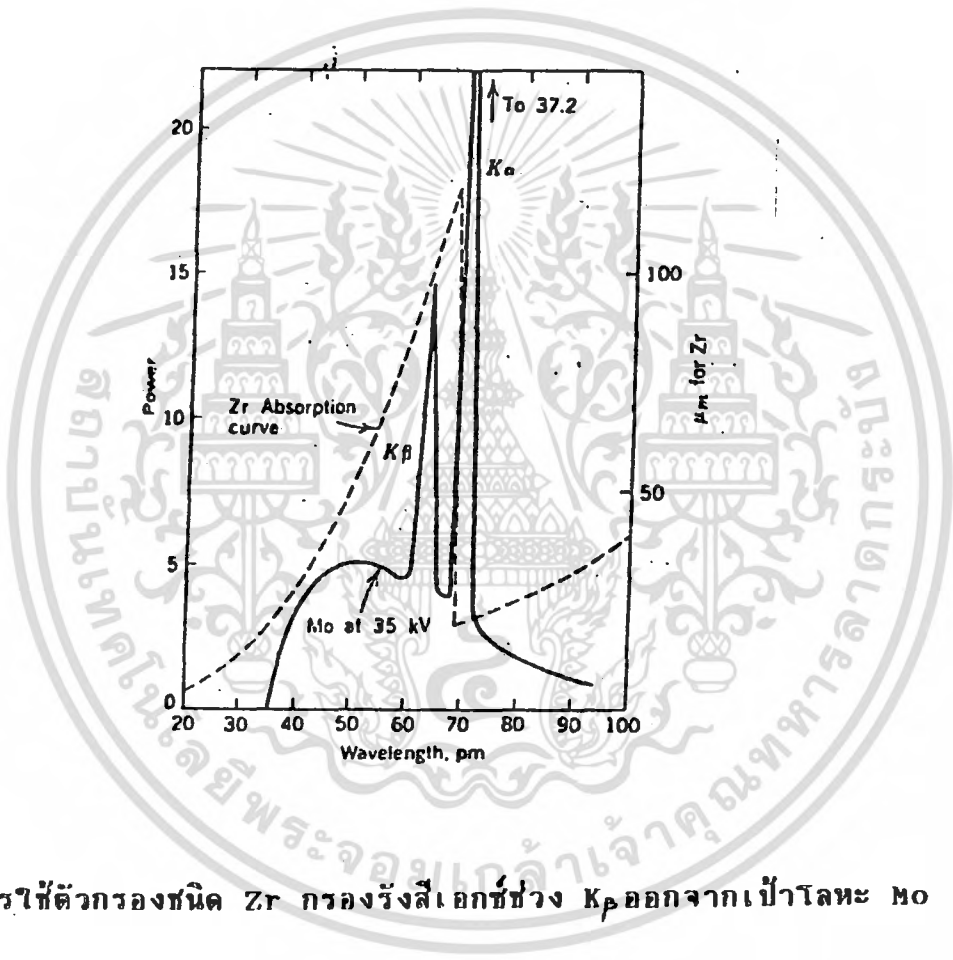
อย่างไรก็ตาม การนำรังสีเอกซ์มาใช้ในการวิเคราะห์จะต้องพยายามทำให้รังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic x-ray) ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวกรอง (filter) เพื่อที่จะดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไป เพื่อให้เหลือความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว เช่น กรณีของเป้า Mo (ดังรูปที่ 2.4) จะใช้ Zr เป็นตัวกรอง ซึ่ง Zr จะดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่น

$K_{\beta} - 63.2 \text{ pm}$. อดหายไป คงเหลือไว้สำหรับส่วนของรังสีเอกซ์ที่เป็น K_{α} ซึ่งมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานมากที่สุด

ถ้าต้องการรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะต้องเลือกวัสดุที่ใช้เป็นเป้าตามสมการ (2.2) และตัวกรองที่เหมาะสม ในตารางที่ 2.1 จะแสดงการเลือกใช้ชนิด และความหนาของตัวกรองให้เหมาะสมกับเป้าโลหะชนิดต่างๆ ในหลอดรังสีเอกซ์ เพื่อทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดกลืน $K\beta$ มีค่ามากที่สุด (ประมาณ 95% ขึ้นไป) เพื่อที่จะให้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว



รูปที่ 2.4 การใช้ตัวกรองชนิด Zr กรองรังสีเอกซ์ช่วง $K\beta$ ออกจากเป้าโลหะ Mo

ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว โดยใช้ตัวกรองชนิดต่าง ๆ ที่
เหมาะสมกับเป้าโลหะ (4)

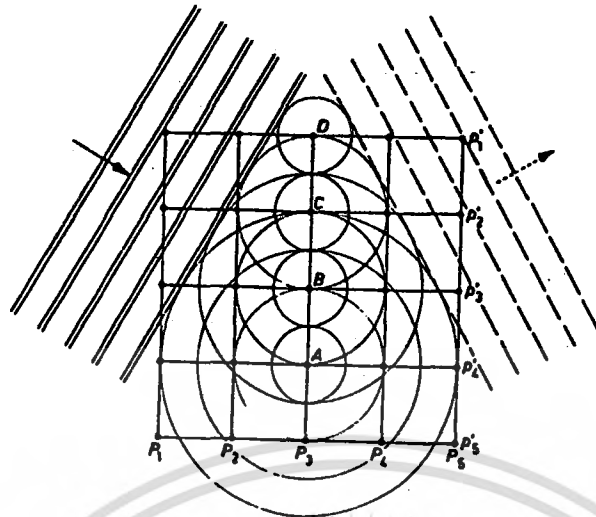
Target	Wavelengths (pm)		Filters		Thick.	$K\alpha_1$ absorbed
	$K\alpha_1$	$K\beta_2$	Element	K-edge	(μm)	(%)
Cr	228.9	208.5	V	226.9	15.3	99.0
Fe	193.6	175.7	Mn	189.6	12.1	98.7
Co	178.9	162.1	Fe	174.3	14.7	98.9
Ni	165.8	150.0	Co	160.8	14.3	98.4
Cu	154.1	139.3	Ni	148.8	15.8	97.9
Mo	70.9	63.2	Zr	68.9	63.0	96.3
Ag	55.9	49.7	Pd	50.9	41.3	94.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง-8- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1. การหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ (diffraction of x-ray)

อิเล็กตรอนเมื่อได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการสั่น (oscillate) ที่ความถี่เดียวกับสนาม เนื่องจากลำแสงรังสีเอกซ์สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อผ่านเข้าไปในระนาบและทำให้อิเล็กตรอนในทางผ่านเกิดการสั่น แต่ละอิเล็กตรอนสามารถพิจารณาให้เป็นแหล่งกำเนิดการสั่น (oscillator) เล็กๆ ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกับรังสีเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการสั่น แอมพลิจูดของคลื่นนี้ขึ้นกับจำนวนของคลื่นอิเล็กตรอนและความต่างเฟส ค่าความต่างเฟสขึ้นอยู่กับความแตกต่างของระยะทางระหว่างหน้าคลื่นซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 ให้เส้นประแสดงจะเริ่มต้นการกระเจิง d เป็นระยะทางระหว่างเส้นประ คลื่นวงกลมถูกส่งออกมาจาก A, B, C, D แสดงจุดที่สว่างด้วยหน้าคลื่น ในกรณีนี้ความยาวคลื่นคือระยะทางระหว่างเส้นที่บสองเส้นระยะทาง d ให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่มีการสั่นที่เฟสเดียวกัน มีความต่างเฟสเป็น 1 เช่น หน้าคลื่นสัมผัสเส้นวงกลมของวงแรกของ D และวงที่สองของ C และวงที่สามของ B และต่อไปเรื่อยๆ ในทิศ BP_0 จะให้คลื่นที่คล้ายกันส่งผลให้มีแอมพลิจูดเหมือนกัน และมีความต่างเฟสระหว่างกันเป็น 1 ส่วนเส้นสัมผัสวงกลมวงแรกของ D และวงที่สองของ B จะให้หน้าคลื่นมีความเข้มเป็นศูนย์ ในทิศทางที่ความต่างเฟสระหว่างหน้าคลื่นที่แผ่ออกไปจากจุด D และจุด C นั้นเป็น $1/2$ ซึ่งหมายความว่ามันจะหักล้างกันเอง คล้ายกับคลื่นที่เกิดที่ A และ B ละต่อมหนึ่งตัวประกอบด้วย นิวเคลียสหนึ่งตัวและอิเล็กตรอนอีกมากมายที่อยู่เป็นวงรอบๆ นิวเคลียสเป็นต้นๆ เมื่อมุมระหว่างรังสีที่ตกกระทบ และทิศทางที่สะท้อนเป็นศูนย์ จะไม่มีความต่างเฟสระหว่างคลื่น และเป็นผลให้คลื่นมีแอมพลิจูดสูงสุด เมื่อมุมนี้เพิ่มขึ้น คลื่นของอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาทำให้ความต่างเฟสเกิดขึ้น ทำให้แอมพลิจูดลดลง ดังนั้นค่ากำลังของการกระเจิง (scattering power)

ของอะตอมจึงขึ้นกับ จำนวนอะตอม และทิศทางการสะท้อน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Origin of diffraction phenomena.

รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดการหักเหระเจิง (diffraction)

2.2.2. condition for diffraction

เมื่อลำแสงคลื่นเดี่ยว (monochromatic) ของรังสีเอกซ์ ตกลงบน
 แลตทิซของผลึกที่เป็นระนาบ ลำแสงที่หักเหระเจิง (diffract) จะมีผลใน
 ทิศทางที่แน่นอนเท่านั้น เมื่อคลื่นที่แผ่จากอะตอมย่อยๆ มีเฟสตรงกันกับคลื่นที่
 สะท้อนออกมา รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นในกรณีนี้ เมื่อแถวของอะตอมมีระยะห่างกัน
 เป็น d มันจะง่ายเข้าถ้าสมมติให้แลตทิซของผลึกประกอบด้วยระนาบที่ขนานกัน
 ห่างกันเป็นระยะทาง d ทุกๆ อะตอมจะอยู่ในระนาบเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น ในเส้น
 P_1, P_2 หรือ P'_1, P'_2 ในรูปที่ 2.5 คิดในกรณีสองมิติ พิจารณาการหักเห
 ระเจิงสามารถกำหนดเงื่อนไขได้สองลำดับ ลำดับแรกให้คลื่นที่แผ่ออกมาจากทุกๆ
 อะตอมที่อยู่ในระนาบระนาบหนึ่งมีเฟสตรงกัน และลำดับที่สองให้การระเจิง
 ของคลื่นในระนาบต่อๆ มาจะต้องมีเฟสตรงกันด้วย ในการพิจารณาลำดับแรกสุดจะ
 ตรงตามจุดประสงค์ ถ้ารังสีที่ตกกระทบ และรังสีที่หักเหระเจิงสะท้อนกับพื้นผิว
 ของระนาบเหมือนกันทุกเส้น และมีมุมตกเท่ากับมุมสะท้อน ในกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - 10 -
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทดลองเมื่อคลื่นที่กระเจิงทั้งหมดจากอะตอมในระนาบนี้มีเฟสตรงกันในการพิจารณาในลำดับต่อมา จะแสดงในรูปที่ 2.6 รังสีสองเส้นที่ขนานกันกระทบกับระนาบของผลึกที่มีมุม θ และกระเจิงตามที่ได้อธิบายไปแล้ว ผลที่ได้จะตรงตามจุดประสงค์ก็ต่อเมื่อ ความแตกต่างของความยาวของรังสีทั้งสองจะต้องเท่ากันทุกความยาวคลื่น ความยาวนี้จะเท่ากับ $CB + BD$ และเนื่องจาก $CB = BD = x$, $n\lambda$ จะต้องเท่ากับ $2x$ เมื่อ x เป็นจำนวนเฉพาะ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า $x = d \cdot \sin\theta$ เมื่อ d เป็นระยะระหว่างระนาบ ดังนั้นจากการพิจารณาจะได้

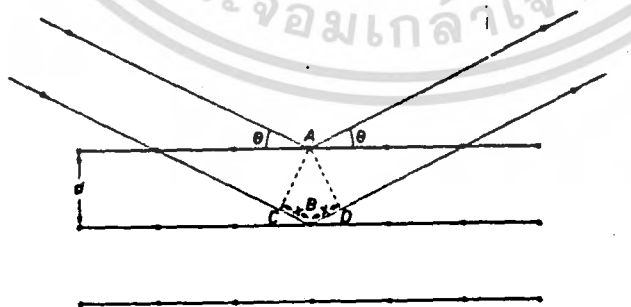
$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.3)$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

d = ระยะห่างระหว่างชั้นผลึก

θ = มุมที่เกิดจากรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของผลึก

ซึ่งจะเป็นสมการการของ Bragg Law เมื่อเราไม่คิดการหักเหของรังสีเอกซ์เนื่องจากหักเหมาก (ดัชนีหักเหประมาณ 0.99999) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความยาวคลื่นยาวขึ้นจะส่งผลให้มุมเล็กลงไปประมาณ 0.02° ต่อ 2θ



Condition for diffraction of X-rays.

รูปที่ 2.6 แสดงการพิจารณาการหักเหของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการเกิดรังสีเอกซ์

การเกิดรังสีเอกซ์ (production of X-rays) ภายในหลอดรังสีเอกซ์นั้นเกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้าโลหะด้วยพลังงานสูงมาก โดยภายในหลอดรังสีเอกซ์จะประกอบด้วย

1. ตัวให้อิเล็กตรอน
2. แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน
3. เป้าโลหะ (ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะขึ้นกับชนิดของโลหะที่ใช้เป็นเป้า)
4. ระบบหล่อเย็นสำหรับเป้าโลหะภายในหลอดรังสีเอกซ์ (เนื่องจากพลังงานจลน์ ส่วนใหญ่ที่ได้จากอิเล็กตรอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน)

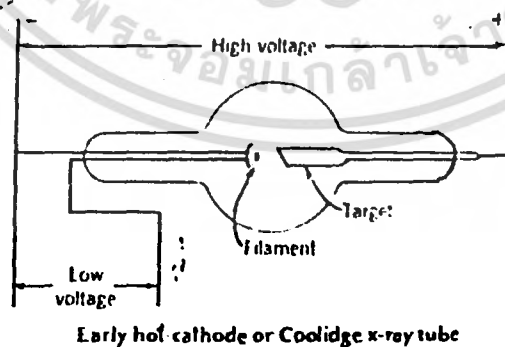
โดยโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือขั้วบวก (มักจะเป็นเป้าโลหะ) ซึ่งส่วนใหญ่ขั้วบวกนี้จะต่อลงดินเพื่อป้องกันอันตรายในขณะที่ผู้ใช้งานต้องสัมผัส ส่วนขั้วลบจะทำให้มีค่าศักดาบสูงมาก ปกติแล้วจะมีค่าระหว่าง 30 KV ถึง 50 KV สำหรับหลอดรังสีเอกซ์จะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่ใช้ก๊าซบรรจุภายในหลอด อิเล็กตรอนที่ได้จะเกิดจากการให้พลังงานมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการไอออไนซ์ของก๊าซ จากนั้นก็จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วให้วิ่งไปชนเป้าโลหะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ หลอดชนิดนี้จะให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ต่ำจึงไม่ค่อยนิยมนำไปใช้กับเครื่องคิดฟแพรทอมิเตอร์

2. ชนิดที่มีไส้หลอดเป็นลวดโลหะ อิเล็กตรอนจะเกิดจากการให้ความร้อนเข้าไปที่ไส้หลอด โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าสลับจาก 0 - 40 A ทำให้ไส้หลอดร้อนแดงจนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากไส้หลอดเป็นจำนวนมาก จากนั้นก็จะถูกเร่งด้วยศักดาบให้วิ่งไปที่เป้าโลหะแล้วคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์

ในที่นี้จะขอลำวถึงหลอดรังสีเอกซ์ที่มีไส้หลอดเป็นลวดโลหะ และใช้กับเครื่องดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ทั่วไป โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารังสีเอกซ์จะออกมาได้หลายทิศทางจึงต้องทำช่องเปิดเฉพาะทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ช่องเปิดนั้นมักจะปิดกันไว้ด้วยโลหะชนิดที่เป็น beryllium เพราะโลหะที่ทำเป็นวินโดว์ (window) นี้จะมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีเอกซ์น้อยมาก

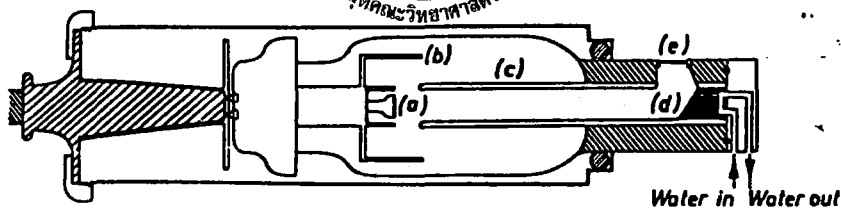
รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพซึ่งอธิบายโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์ทั่ว ๆ ไป ไส้หลอดทั้งสแตน (a) จะถูกเผาให้ร้อนด้วยการป้อนกระแสเข้าไป ทำให้เกิดบริเวณที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบๆ ไส้หลอดสูง ส่วนหมอกอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งเมื่ออยู่ในหลอด anode focusing (c) ด้วยค่าของความต่างศักย์ที่สูงมาก ๆ ที่ป้อนเข้าระหว่างหัวอานอด และไส้หลอด อิเล็กตรอนจะชนกับหัวอานอด (d) ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เกิดขึ้น ส่วนทางด้านของรังสีเอกซ์จะเป็นวินโดว์ (window) (e) จุดประสงค์ของ cathode cap (b) คือการ absorption อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมา และจำกัดการกระจายของไอทั้งสแตนจากไส้หลอด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของหลอดรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 13 -
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์จะดูธรรมดา ๆ แต่มีหลายสิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ เช่น ต้องเลือกโลหะที่จะนำมาทำขั้วอาโนด และคุณสมบัติเฉพาะของวินโดว์ที่จะใช้ เมื่อรังสีที่ฉายอย่างต่อเนื่องและมีพลังงานสูง จะต้องใช้โลหะที่จะนำมาทำเป็นขั้วอาโนดมีจำนวนอะตอม (atomic number) สูง อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนอิเล็กตรอนไปเป็นรังสีเอกซ์ เป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพนัก คือประมาณ 1% เท่านั้นจากกำลังทั้งหมดที่จ่ายเข้าไปเพื่อให้เกิดรังสี พลังงานส่วนใหญ่จะกลายเป็นความร้อน ซึ่งจะต้องมีการหล่อเย็นที่ขั้วอาโนด ดังนั้นขั้วอาโนดควรมีคุณสมบัติที่นำความร้อนได้ดี และจะเชื่อมต่อกับบล็อกทองแดงของระบบหล่อเย็นด้วย การกระจายความร้อนก็เป็นปัญหาสำคัญ เพราะเมื่อความร้อนสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะเกิดการกระเจิงมากขึ้น และส่วนที่ไปยังอาโนดมีน้อยลง อีกสิ่งที่ต้องพิจารณาคือความสามารถในการส่งผ่าน เมื่อรังสีมีความยาวคลื่นมาก ๆ ผ่านทางวินโดว์ ความหนาของทองวินโดว์นั้นจะช่วยป้องกันอนุภาคที่มีพลังงานสูง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วอาโนดด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้าวินโดว์หนา 500 μm ให้กับขั้วอาโนดที่ทำด้วยทังสเตนหรือทองคำ ขณะที่วินโดว์มีความหนา 200 μm ให้กับขั้วอาโนดที่ทำด้วยโครเมียม เป็นต้น และในทางกลับกัน ถ้าเราลดความหนาของวินโดว์ลง 1000 - 300 μm จะทำให้ค่า transition เพิ่มขึ้นประมาณ 4 Å ของรังสีจาก 3% ถึง 35% ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 2 - 3 เท่าสำหรับธาตุที่มีจำนวนอะตอมน้อย ๆ เช่น อะลูมิเนียม และซิลิกอน เป็นต้น



The sealed X-ray tube. The tungsten filament *a* is heated by the filament current producing a cloud of electrons. These electrons are accelerated along the focusing tube *c*, by the potential difference between the filament and the anode *d*. The generated X-rays (or a significant part of the total) then pass through the window *e* to the outside.

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์ในปัจจุบัน

2.4 การเลือกรังสีเอกซ์

ในการเลือกรังสีเอกซ์ในที่นี้คือการเลือกความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ โดยผู้
ใช้มักจะเน้นการแก้ปัญหาจากการที่ทราบว่า สารตัวอย่างที่จะทำการฉายรังสีนั้น
เหมาะที่จะใช้รังสีเอกซ์ในช่วงความยาวคลื่นใด โดยมีหลักการพิจารณาเลือกดังนี้

1. พิจารณาลักษณะสมบัติของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากหลอดว่าจะ
ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่า K absorption edge ของสารตัวอย่างที่จะทำการ
วิเคราะห์

2. จากกฎของแบรกก์ แสดงให้เห็นว่า ยิ่งความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ยิ่งสั้น
มุมที่ได้จากการหักเหกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่างก็จะยิ่งแคบลง แต่
จะทำให้จำนวนเส้นที่ได้จากการหักเหกระเจิงมากขึ้น ในทำนองเดียวกันถ้าเพิ่ม
ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ก็จะได้ผลออกมาในลักษณะตรงกันข้าม

ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป้าโลหะต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับ
เครื่องดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ มีดังนี้

$$\text{Mo K} = 0.711 \text{ \AA}$$

$$\text{Cu K} = 1.542 \text{ \AA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co K : 1.790 Å

Fe K : 1.937 Å

Cr K : 2.291 Å

ในการเลือกเป้าโลหะชนิดต่างๆ นั้นจำเป็นจะต้องเลือกตัวกรองที่เหมาะสม
เพื่อกำจัด $K\beta$ ออกไป โดยทั่วไปในทางปฏิบัติมักนิยมใช้ Cu $K\alpha$: 1.542 Å
มากที่สุด แต่การเลือกใช้เป้าโลหะชนิดนี้มีข้อเสียที่จะใช้วิเคราะห์ได้ไม่ดี ถ้า
สารตัวอย่างมีโลหะหนักผสมอยู่มาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เครื่องมือและอุปกรณ์

การแบ่งชนิดเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรมิเตอร์สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ด้วยกันคือ

1. เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการวัดสเปกตรัมของรังสีเอกซ์โดยวิธีนำเอาผลิตภัณฑ์กราฟโครงสร้างแน่นอนมาทำการแยกด้วยวิธีที่คล้ายเกรตติงทางด้านแสง แล้วทำการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้จากเป้าตัวสุดท้าย

2. เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาโครงสร้างทางผลึก ของวัสดุชนิดต่างๆ โดยอาศัยการวัดด้วยหลักการของการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ ที่ทราบค่าความยาวคลื่นที่แน่นอน

ในตอนต้นของการศึกษาเครื่อง XRD นี้จะอยู่ในหัวข้อที่ 2

3.1 หลักการเบื้องต้นของเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกโตมิเตอร์

เป็นการวัดความเข้มแสงที่ได้จากการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ที่ตกลงบนแผ่นฟิล์มซึ่งเป็นจุดค่า ปริมาณความเข้มของจุดค่าบนแผ่นฟิล์มจะสอดคล้องกับปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้ ในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนจากแผ่นฟิล์มมาเป็นหัววัดรังสีเอกซ์โดยตรง โดยมีตัวนับจำนวนลูกของสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) ซึ่งตัวนับรังสีเอกซ์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดแต่มีหลักการคล้ายกัน คือ พยายามเปลี่ยนพลังงาน หรือปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกลงบนตัวนับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่อาจจะ เป็นรูปฟันเลื่อย หรือ พัลส์ แล้วทำการส่งไปยังตัวนับพัลส์ในหน่วยเวลา โดยวงจรตัวนับจะอาศัยหลักการนับจำนวนพัลส์ของสัญญาณ

กระแสต่อหน่วยเวลา ซึ่งจำนวนพัลส์ที่ได้ใน 1 หน่วยเวลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

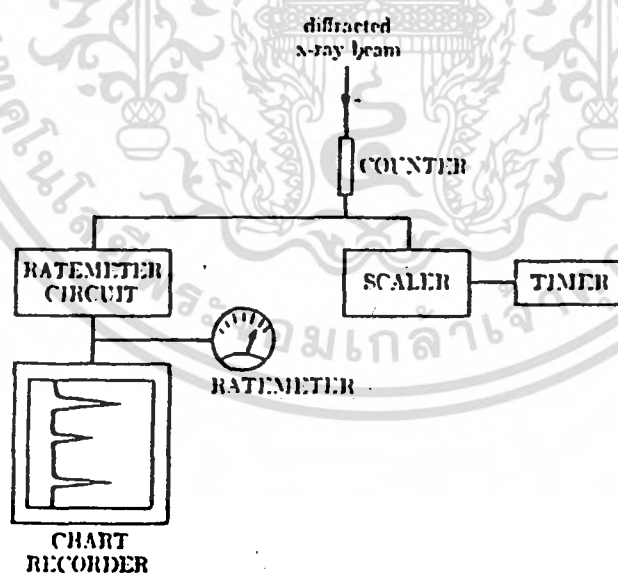
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่ผ่านเข้ามาถึงตัวนับในการวัดจำนวนพัลส์นั้นจะมีหลัก
การวัด 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. การวัดพัลส์กระแสอย่างต่อเนื่องแล้วเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณกระแส
อย่างสม่ำเสมอ โดยตัววัดที่ใช้การวัดแบบนี้เรียกว่า counting rate meter
หน่วยของค่าที่ได้จะเป็นจำนวนพัลส์ต่อหน่วยเวลา เช่น cps (counts per
seconds)

2. การวัดพัลส์ของกระแสจะใช้หลักการทางอิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า
scaler วิธีนี้จะเป็นการวัดอัตราการนับจำนวนพัลส์ โดยจะวัดจำนวนพัลส์เฉลี่ยใน
หน่วยเวลาที่แน่นอนค่าหนึ่ง การวัดในลักษณะนี้เหมาะสำหรับการวัดอย่างไม่ต่อเนื่อง
เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการนับ และวงจรของตัว scaler ไม่สามารถใช้ในการ
เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องได้

โดยเครื่อง XRD จะประกอบด้วยวงจรทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



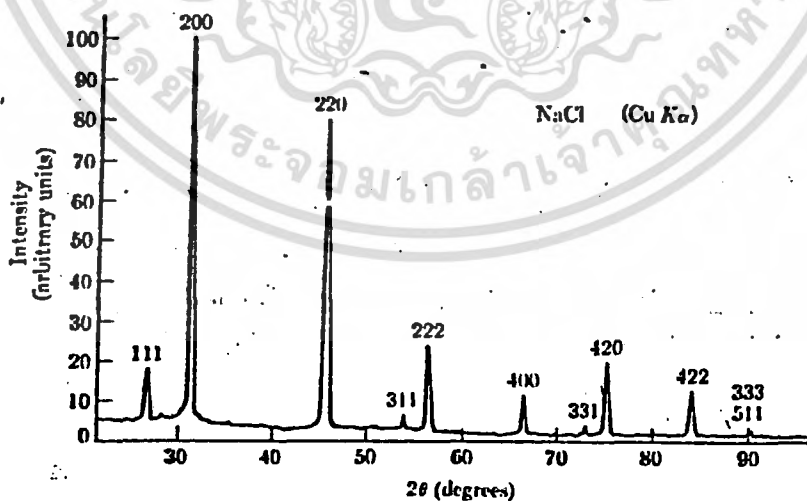
Block diagram of detector circuits for a diffractometer. The ratemeter circuit
actuates a meter, for a visual indication of the count rate, and a chart recorder. The

รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงวงจรหัววัดของเครื่อง XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดการหักเหของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากสารตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD มีลักษณะการวัดอยู่ 2 ลักษณะ คือ

1. การวัดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง มักจะตั้งตำแหน่งของหัววัดไว้ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 0^\circ$ และเชื่อมต่อกับวงจรระหว่างตัวนับสัญญาณ (รวมถึงหัววัดด้วย) กับวงจร rate meter เข้าด้วยกันสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะส่งออกไปยังส่วนแสดงผลด้านแกน y ของ chart recorder ตัวนับจะถูกขับด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่เพื่อเป็นการเพิ่มค่ามุม 2θ จนกระทั่งสุดช่วงการกวาดมุมที่กำหนด ในขณะที่ตัวนับสัญญาณที่ chart recorder ก็จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่แสดงว่าระยะระหว่างช่วงความยาวของกระดาษที่เคลื่อนที่ไปจะเป็นสัดส่วนกับมุม 2θ ดังตัวอย่างผลที่ได้จาก chart recorder ในรูปที่ 3.2 ที่ให้ผลออกมาเป็นจำนวนพัลส์ต่อวินาที (ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเข้มที่ได้จากการหักเหของรังสีเอกซ์) กับการหักเหของมุม 2θ โดยทั่วไปสำหรับกรณี high scanning speed จะกวาดมุม 2θ ด้วยอัตรา 2 ต่อ 1 นาที ซึ่งที่อัตราความเร็วนี้ถ้ากวาดมุม 2θ จาก 0° ถึง 160° จะต้องใช้เวลาประมาณ $150/2$ นาที หรือเท่ากับ 75 นาที



Automatically recorded diffraction pattern of NaCl powder. Copper radiation, nickel filter. About half of the entire range of 2θ is shown here. The numbers on the

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของผลที่ได้จาก recorder (สารตัวอย่างคือ NaCl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 19 -
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดรังสีเอกซ์แบบไม่ต่อเนื่อง เป็นการวัดที่จะใช้ตัวนับพัลส์ร่วมกับ scaler โดยการวัดจะกำหนดค่ามุม 2θ ให้คงที่ในช่วงเวลาหนึ่งที่เพียงพอที่จะทำการนับพัลส์ได้ค่าที่แน่นอน จากนั้นจะทำการเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ ไปที่ตำแหน่งใหม่ และทำการวัดในลักษณะซ้ำกับที่ได้ทำมาแล้ว โดยจะทำการวัดให้ครอบคลุมมุม 2θ ที่กำลังสนใจ สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ กับ มุม 2θ จะได้จากการนำค่าที่ได้ในแต่ละตำแหน่งมาเขียนขึ้นสำหรับกรณีที่มีสัญญาณ background เข้ามาอย่างต่อเนื่อง การเลื่อนของมุม 2θ สามารถที่จะเลื่อนด้วยมุมที่กว้างมากๆ ได้ ส่วนในกรณีที่เรากำลังต้องการรายละเอียดในการวัดค่าในช่วงใดนั้นเราสามารถที่จะเลือกค่ามุม 2θ แบบแคบๆ เพื่อที่จะทำให้เราสามารถทราบถึง profile line ในช่วงนั้นได้อย่างละเอียด วิธีการวัดแบบนี้จะใช้เวลาในการสร้าง pattern ของการหักเหกระเจิงนานกว่าวิธีแรกแต่ให้ค่าที่แน่นอนกว่ามาก การวัดในลักษณะนี้สามารถที่จะแก้ปัญหาเรื่องเวลาที่ใช้โดยการให้การควบคุมแบบอัตโนมัติ

การพัฒนาการวัดการหักเหกระเจิงของรังสีเอกซ์ไปใช้เครื่อง XRD แบบควบคุมอัตโนมัตินั้น จะต้องมีการแก้ไขปรับปรุงส่วนต่างๆ ดังนี้

- ระบบการเปลี่ยนสารตัวอย่างให้เป็นแบบอัตโนมัติ
- ระบบการควบคุมมอเตอร์ของ goniometer ให้หมุนไปอย่างต่อเนื่อง หรือ หยุดในตำแหน่งที่ได้ตั้งไว้
- ระบบการวัดให้สามารถวัดค่านานในบางตำแหน่งและเร็วในบางตำแหน่งได้
- ระบบการกวาดให้สามารถ step ด้วยค่าเท่าใดก็ได้
- ส่วนการแสดงผลสามารถที่จะเก็บหรือ บันทึกลงในแผ่นดิสก์ หรือ เรียกข้อมูลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของ JCPDS
- ระบบการเปิดปิดเครื่องสามารถที่จะตั้งเวลาได้ เพื่อให้เครื่องสามารถทำงาน

งานในเวลากลางคืน หรือในกรณีที่ไม่มีคนคอยควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการวัดของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ด้วยวิธีผง

การศึกษาโครงสร้างของสสารโดยใช้หลักการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ ในการวิเคราะห์จะเน้นหนักไปที่ลักษณะของสารตัวอย่างที่ศึกษา อยู่ในรูปของผง (powder) ในการศึกษาชั้นเริ่มแรกนั้นส่วนใหญ่เครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์จะใช้ กล้องถ่ายภาพ และฟิล์ม ในการแสดงผลของการเลี้ยวเบน ซึ่งมีการศึกษาไว้ หลายวิธี ได้แก่

3.2.1 วิธีของ Debye-Scherrer

จากหลักการของ Debye-Scherrer จะได้กล้องดังแสดงในรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยห้องที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมหรือม้วนพับปิดแน่นหนา โดยจะมีช่องด้านหนึ่ง เปิดเพื่อให้รังสีเอกซ์ผ่านเข้ามาได้ ลำของรังสีเอกซ์จะผ่านเข้ามาตกกระทบกับ สารตัวอย่างแล้วเกิดการหักเหระเจิงไปตกลงบนฟิล์ม ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่ ติดอยู่ในแนวเส้นรอบวงภายในห้องวงกลมนี้ โดยที่ส่วนตรงกลางของห้องวงกลมจะเป็นที่ยึดจับสารตัวอย่างซึ่งสามารถหมุนปรับได้

โดยจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างของเส้นที่ได้จากการหักเหระเจิงที่อยู่บนฟิล์ม s กับมุม θ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับรัศมีของกล้อง Debye-Scherrer ได้ดังนี้

$$s = 2\theta R \quad (3.1)$$

และ

$$s = R 2\theta \quad (3.2)$$

เมื่อ R คือรัศมีของกล้อง

จากสมการ (3.2) ค่า 2θ จะแสดงถึงค่าความแตกต่างของมุมระหว่างเส้นแนวที่เกิดจากการหักเหระเจิง 2 เส้น โดยถ้าค่า 2θ มีค่าคงที่แล้ว ค่า s จะมีค่าแปรผันตามค่า R ซึ่งค่า R นี้ ถ้ายังมีค่ามากก็ยิ่งทำให้ระยะระหว่างเส้นที่เกิดจากการหักเหระเจิงมีค่ามากขึ้น ทำให้เห็นความแตกต่างของเส้นได้ชัดเจน ซึ่งค่าที่จะบอกถึงความสามารถในการแยกเส้นที่เกิดขึ้นบนฟิล์มนั้น จะบอกในรูปของ ค่ากำลังการแยก (resolving power) ที่เรียกในรูป $dQ/d\lambda$ หรือ $d/\Delta d$ โดยสามารถหาค่าได้จากนําสมาการจากกฎของแบรกกมาทำการ differentiate ดังต่อไปนี้

$$n\lambda = 2ds \sin\theta \quad (3.3)$$

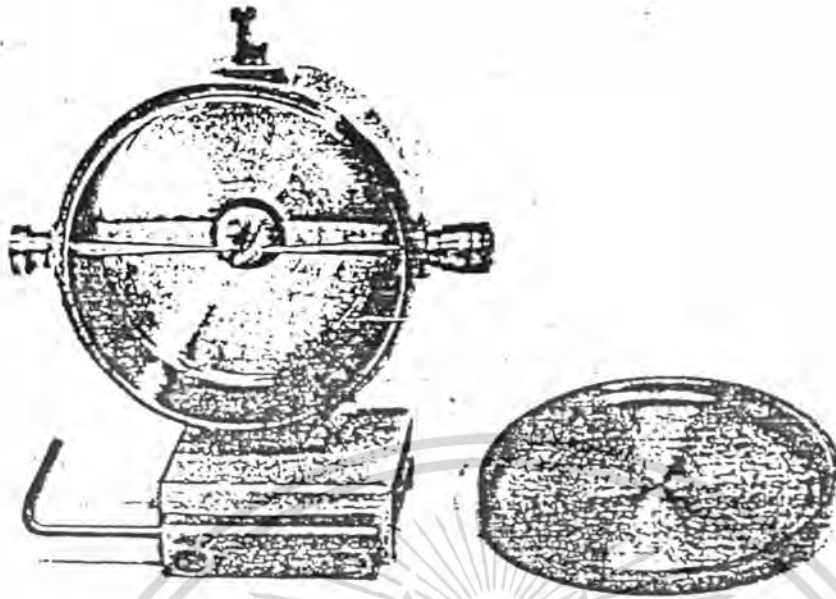
และ

$$dQ/d\lambda = -(1/d)\tan\theta \quad (3.4)$$

เมื่อ d คือ ค่าระยะห่างระหว่างระนาบภายในโครงสร้างของสารตัวอย่าง จากสมการ (3.2) และ (3.4) จะได้กำลังการแยกเป็น

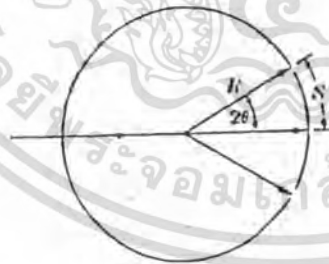
$$d/\Delta d = -(2R/s)\tan\theta \quad (3.5)$$

ค่ารัศมีของกล้องที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 10 ซม. แต่ค่าที่นิยมนำไปใช้มากที่สุดคือ $R = 5.73$ ซม. (ซึ่งจะทำให้ค่า s มีค่าคงที่ตามค่า R ไปด้วย) ซึ่งจะ ทำให้ค่ากำลังการแยกของกล้องจะขึ้นกับค่า $\tan\theta$ หรือมุม θ (ค่านี้จะขึ้นกับชนิดของสารตัวอย่างว่าจะทำให้เกิดการหักเหระเจิงด้วยมุม θ เป็นเท่าใด) โดยปกติแล้วในการกำหนดค่ากำลังการแยกนั้นจะกำหนดโดยค่า R ซึ่งค่านี้ถ้าเราเพิ่มให้มีค่ามากก็จะทำให้ค่ากำลังการแยกมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ก็จะทำให้รังสีเอกซ์ที่หักเหระเจิงแล้วตกลงบนแผ่นฟิล์มมีค่าความเข้มน้อยลง ดังนั้นในการเลือกขนาดของกล้องจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับสารตัวอย่างด้วย



Debye-Scherrer camera, with cover plate removed. (Courtesy of Philips Electronic Instruments, Inc.)

รูปที่ 3.3 แสดงกล้อง Debye-Scherrer พร้อมผลึก



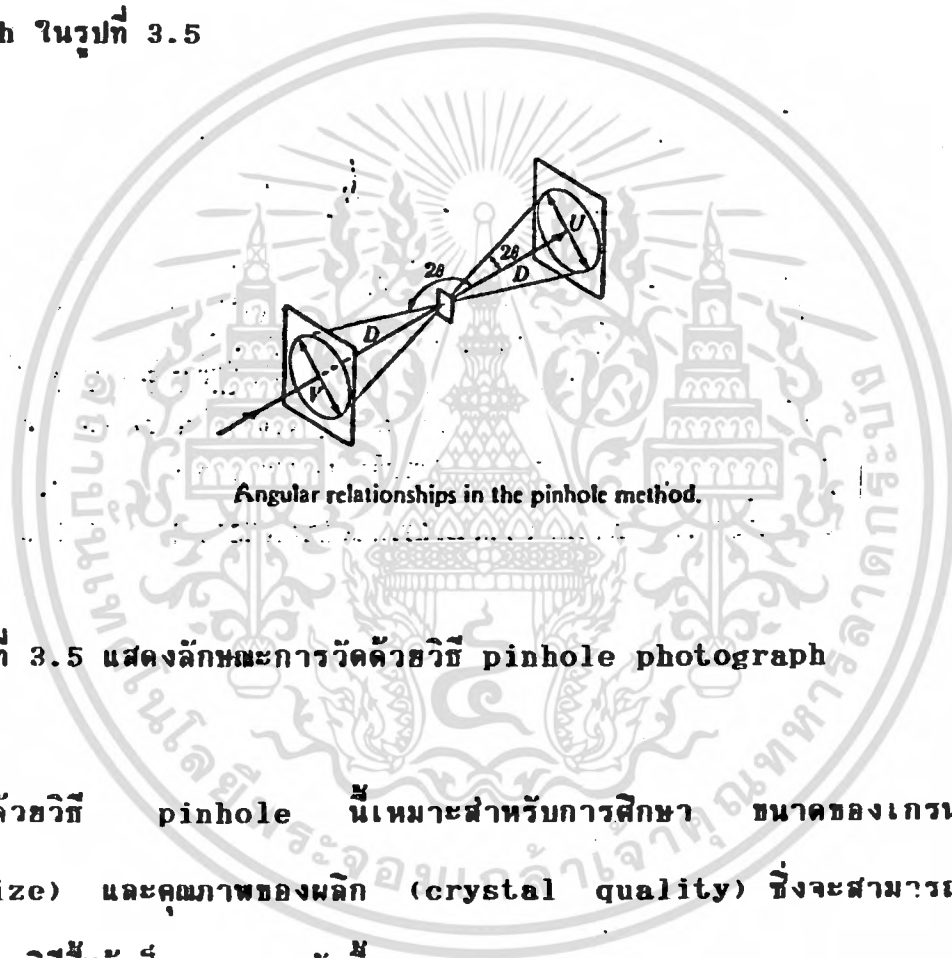
Geometry of the Debye-Scherrer method. Section through film and one diffraction cone.

รูปที่ 3.4 โครงสร้างการหาค่าตัวกวีของ Debye-Scherrer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้²³เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิธี Pinhole Photograph

วิธีการนี้ได้พัฒนามาจากวิธีการของ Debye-scherrer โดยหลักการคือ ใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic) ให้ตกลงบนสารตัวอย่างโดยผ่านรูที่อยู่บริเวณตรงกลางของแผ่นฟิล์มสำหรับใช้รับรังสีเอกซ์ ที่มีอยู่ทั้งด้านหน้า และด้านหลังของสารตัวอย่าง ดังแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี pinhole photograph ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี pinhole photograph

การวัดด้วยวิธี pinhole นี้เหมาะสำหรับการศึกษา ขนาดของเกรน (grain size) และคุณภาพของผลึก (crystal quality) ซึ่งจะสามารถแบ่งการวัดด้วยวิธีนี้ได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. การวัดแบบส่งผ่าน (transmission method) ซึ่งจะวัดโดยการให้รังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง แล้วเกิดการหักเหระเจิงไปตกลงบนแผ่นฟิล์มที่อยู่ด้านหลัง วิธีแบบนี้ที่เหมาะสมสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นเส้น หรือบางๆ เพราะเนื่องจากความหนาของสารตัวอย่าง ที่มากจะมีผลทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานมากเกินไป ดังนั้นค่าปกติของความหนาที่ใช้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 มม. ซึ่งที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นจะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านสารตัวอย่างออกมาได้มีค่า $1/3$ ของความเข้มที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ กับ เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวน U และระยะห่างระหว่างฟิล์มกับสารตัวอย่าง D จากรูป 3.5 ได้ดังนี้

$$\tan 2\theta = U/2D \quad (3.6)$$

2. การวัดแบบสะท้อนกลับ (back reflection method) เป็นวิธีที่ใช้การวัดที่ผ่านฟิล์มอยู่ที่ด้านหน้าของสารตัวอย่าง เพื่อที่จะวัดรังสีเอกซ์จากการสะท้อนกลับออกมาจากสารตัวอย่าง วิธีนี้จะไม่คำนึงถึงความหนาของสารตัวอย่าง เพราะส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเฉพาะที่ผิวของสารตัวอย่าง แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารตัวอย่างก็ควรจะมีค่าไม่น้อยกว่า 25 มม. วิธีนี้แม้ว่าจะใช้ศึกษาเฉพาะที่ผิว แต่ก็มีข้อดีที่การเตรียมหนึ่งครั้งสามารถจะวัดได้ 2 แบบ คือ วัดโดยใช้รังสีเอกซ์ และกล้องไมโครสโคป การวัดแบบสะท้อนกลับนี้จะให้ค่าความถูกต้อง และแม่นยำพอสมควร โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ ค่า U และค่า D จากรูปที่ 3.5 ได้ดังนี้

$$\tan(\pi - 2\theta) = U/2D \quad (3.7)$$

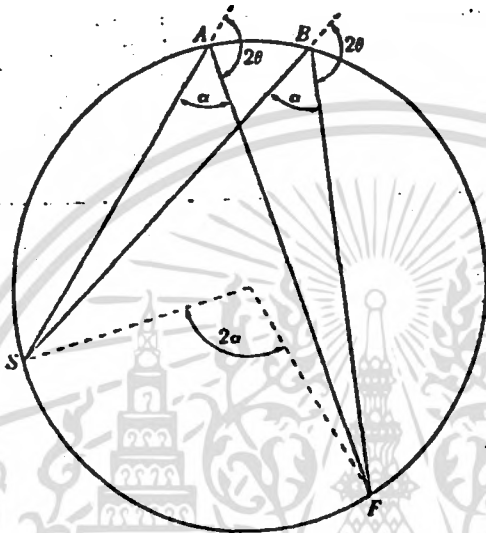
3.2.3 วิธี Focusing camera

วิธีการวัดนี้จะใช้กล้องที่มีสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์ และฟิล์ม วางอยู่ในแนวเส้นรอบวง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยมีหลักการพื้นฐานว่า ถ้าสมมุติให้รังสีเอกซ์เข้ามาที่ S และตกกระทบบนสารตัวอย่างในแนวเส้น SA และ AB แล้วเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-25-

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หักเหระเจิงมาที่ตำแหน่งโฟกัสของฟิล์มที่ F รังสีเอกซ์จะเกิดการหักเหระเจิงที่จุด A และ B ตามแนวเส้น AF และ BF ไปเป็นมุม 2θ หรือ $180 - 2\theta$ ซึ่งจากหลักการพื้นฐานนี้ได้มีการแบ่งการวัดออกเป็น 2 แบบดังนี้



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของกล้องที่ใช้วิธี focusing

1. วิธี Seemann-Bohlin วิธีนี้จะใช้กล้องที่เป็นดังรูปที่ 3.7 โดยสมมุติให้ตัวแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ T ถูกโฟกัสเข้าไปที่ช่องสลิต S ที่ทำตัวเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่จะผ่านเข้าไปในกล้อง ลำของรังสีเอกซ์ที่เข้าไปแล้วตกกระทบสารตัวอย่าง AB ทุกลำจะเกิดการหักเหระเจิงด้วยมุมที่เท่ากัน คือ มุม 2θ และจะโฟกัสเข้าไปที่จุดเดียวกันคือ จุด F ซึ่งค่ามุม θ จะสามารถหาค่าได้จากค่าของ U ในรูปที่ 3.7 ดังความสัมพันธ์

$$4\theta R = U + \text{arc } SABN \quad (3.8)$$

เมื่อ R คือรัศมีของกล้อง

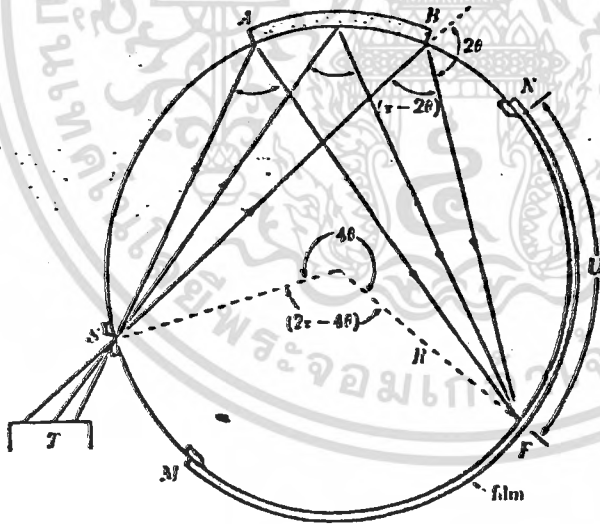
arc SABN คือ ระยะเส้นรวงวงจากจุด S ผ่าน A และ B ไปยังจุด N

จากการ differentiate สมการ (3.8) และรวมกับสมการ (3.4)

โดยเขียนในรูปของกำลังการแยกได้เป็น

$$d/\Delta d = -(4R/\Delta U) \tan \theta \quad (3.9)$$

ค่ากำลังการแยกที่ได้จากวิธีนี้จะมีค่าเป็น 2 เท่าของวิธี Debye-Scherrer (เมื่อรัศมีของกล้องเท่ากัน) วิธีนี้จะใช้เวลาในการวัดน้อย และให้ความคมชัดมาก เนื่องจากสารถ้องที่ใช้มีขนาดใหญ่ และการหักเหกระเจิงของรังสีเอกซ์จะไปตกลงที่โฟกัสเดียวกัน แต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัดที่ห้ามุมของการหักเหกระเจิงเป็น 2θ เท่านั้น จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของกล้องที่ใช้วิธี focusing ของ Seemann-Bohlin

2. วิธีการสะท้อนกลับ (back-reflection focusing method) เป็น

วิธีที่ให้ความแม่นยำในการวัดค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก (lattice)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง -27- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องที่ใช้ในวิธีนี้จะเป็นกล้องที่ความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 หลักการพื้นฐานของวิธีนี้จะคล้ายวิธี Seemann-Bohlin แต่สลิตจะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกันข้ามกับส่วตัวอย่าง โดยจะทำให้ส่วตัวอย่างเกิดการสั่นอย่างช้าๆ ด้วยมุมเล็กๆ เพื่อที่จะทำให้เกิดเส้นของการหักเหระเจิงที่เรียบ สำหรับค่ามุมของการหักเหระเจิงจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$(4r - 8e)R = V \tag{3.10}$$

เมื่อ V คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่เกิดจากการหักเหระเจิงที่บริเวณ 2 ด้านของสลิต S

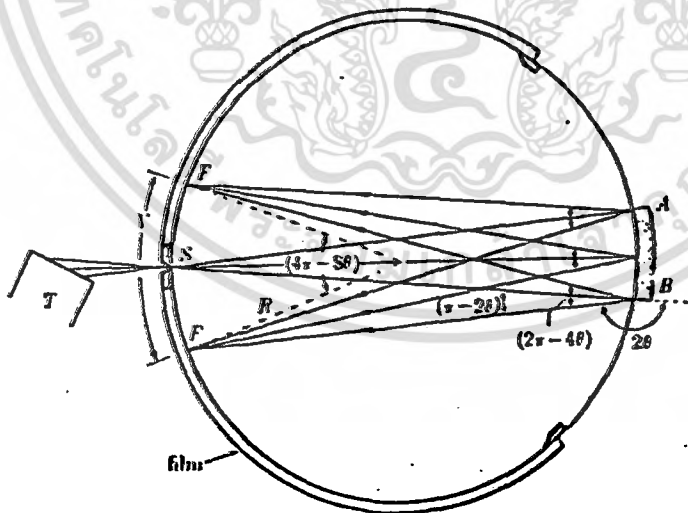
ถ้าการ differentiate สมการ (3.10) นี้จะได้

$$e = -(1/4R)\Delta(V/2) \tag{3.11}$$

นำสมการ (3.11) รวมกับสมการ (3.4) จะได้ ค่ากำลังการแยก เป็น

$$d/\Delta d = -(4R/\Delta(V/2)) \tan \theta \tag{3.12}$$

ค่ากำลังการแยกของวิธีนี้จะมีค่าเท่ากับวิธีของ Seemann-Bohlin (ที่ค่า R เท่ากัน)



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของกล้องที่ใช้วิธี focusing แบบ back-reflection

โดยวิธีการที่กล่าวมาทั้งหมดจะใช้ฟิล์มเป็นส่วนแสดงและบันทึกผล pattern ของการหักเหระเจิงของสารตัวอย่าง (ดังในรูปที่ 3.9) ซึ่งจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

3.3 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ส่วนประกอบของเครื่อง XRD จะแสดงแผนผังดังในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. ก่อนหน้าที่จะเริ่มจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์แต่ละส่วนของเครื่อง XRD จะต้องเดินเครื่องระบบหล่อเย็นเพื่อให้นำที่ จะนำไปหล่อเย็นให้กับเครื่อง XRD ให้มีความเย็นเพียงพอ
2. จ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทุกตัวแล้วเริ่มเปิดเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ เพื่อให้เครื่องเริ่มอุ่นให้หลอดรังสีเอกซ์จนมีความร้อนเพียงพอ และระบบตรวจสอบทุกอย่างพร้อม ก็จะเริ่มมีการเปล่งรังสีเอกซ์ออกมา
3. รังสีเอกซ์ที่ออกมาจากหลอดรังสีเอกซ์ที่เปล่งออกมาทุกทิศทาง จะถูกจำกัดให้ออกมาได้เฉพาะที่วินโดว์ (window) เท่านั้น ซึ่งจะมีตัวควบคุมการเปิดปิดอีกที
4. จากที่วินโดว์จะต่อเข้ากับตัว goniometer ที่จะมีช่องที่มีขนาดใกล้เคียงกับช่องที่ให้รังสีเอกซ์ออกมา เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไป จะผ่านสลิต และตัวกรอง (เพื่อให้ได้ค่าพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะที่ต้องการ) ไปตกกระทบบนสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์ที่หักเหระเจิงจากสารตัวอย่างจะถูกตัวหัววัดรังสีเอกซ์ ที่สามารถหมุนเปลี่ยนมุม หรือตำแหน่งได้ ทำการวัดค่าปริมาณของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งมุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-29-

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

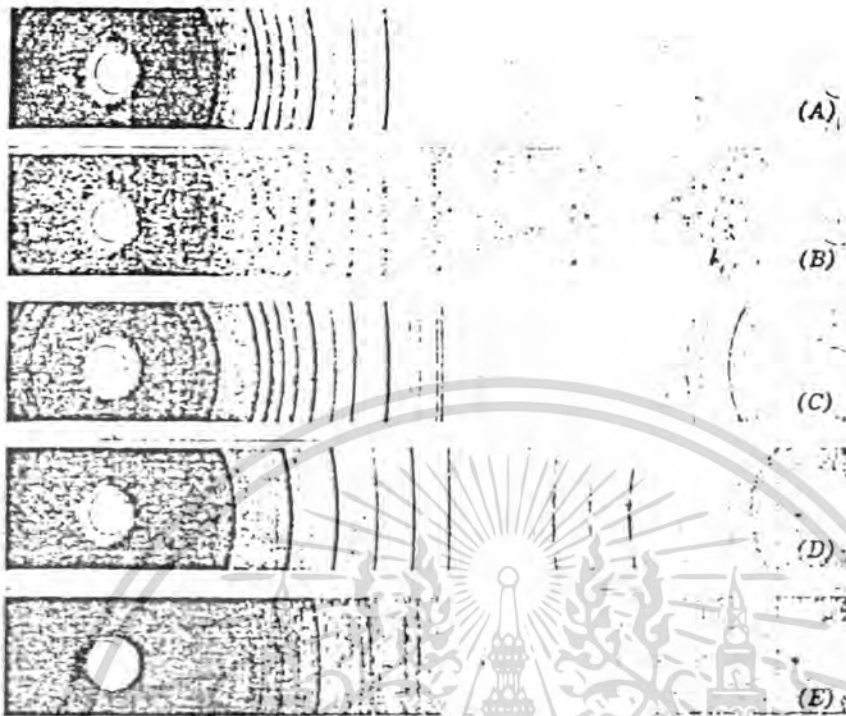
5. ผลจากตัวหัววัดรังสีเอกซ์จะออกมาในรูปของจำนวนพัลส์ ที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะถูกส่งไปยังส่วนวงจรจัดรูปสัญญาณเพื่อจัดรูปสัญญาณให้อยู่ในรูปที่เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างคงที่ จากนั้นจะส่งไปยังส่วนขยายสัญญาณเพื่อขยายแอมพลิจูดของพัลส์ให้มีขนาดเหมาะสมที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ในส่วนวงจรวิเคราะห์สัญญาณ ในการวิเคราะห์สัญญาณจะวิเคราะห์จากแอมพลิจูดของพัลส์

6. พัลส์ที่ออกมาจากส่วนวิเคราะห์แล้วจะเป็นพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีเอกซ์จริงๆ เพราะว่าในส่วนวิเคราะห์จะกำจัดพัลส์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน หรือสัญญาณอื่นๆ ออกไป โดยช่วงของแอมพลิจูดที่จะผ่านออกมานั้นสามารถกำหนดค่าได้ตามชนิดของสารตัวอย่าง

7. จากพัลส์ที่ได้ก็จะถูกนำไปวัดจำนวนโดยวงจรนับที่มีหลักการนับสองแบบ ในแบบแรกจะเป็นการนับแบบที่ดึงค่าเวลาในการนับที่แน่นอน หรือดึงค่าจำนวนนับที่แน่นอน จากนั้นจะนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าอัตรานับเฉลี่ย การนับแบบนี้จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า scaler และ timer ร่วมกัน ซึ่งสามารถวัดค่าอัตราการนับได้ที่ละมุมเท่านั้น ถ้าต้องการวัดค่าอัตรานับที่มุมต่างๆ ก็จะต้องทำในลักษณะนี้เป็นจำนวนเท่ากับจำนวนมุมที่ต้องการ ส่วนในแบบที่สองจะเป็นการวัดที่จะวัดออกมาเป็นอัตราการนับเฉลี่ยโดยตรงจึงทำให้สามารถวัดค่าอัตราการนับได้ต่อเนื่อง ถ้าตัวหัววัดรังสีสามารถวัดมุมด้วยอัตราคงที่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบนี้เรียกว่า ratemeter ซึ่งการวัดแบบนี้ถ้าใช้งานร่วมกับ recorder ก็จะทำให้ได้ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของรังสีเอกซ์กับ มุมของการหักเหระเจิง จากกราฟนี้ก็จะนำไปวิเคราะห์ตามหลักการของเครื่อง XRD

จากลำดับขั้นตอนการทำงานดังกล่าวเครื่อง XRD จะทำงานได้เมื่อส่วนประกอบแต่ละส่วนทำงานตามหน้าที่ได้ถูกต้อง และสมบูรณ์ ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดการทำงานในส่วนประกอบย่อยๆ แต่ละส่วนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Debye-Scherrer photographs prepared under different conditions: (A) Quartz powder, 5μ, specimen stationary; (B) Quartz powder, 15-30 $\mu</math>, specimen stationary; (C)$

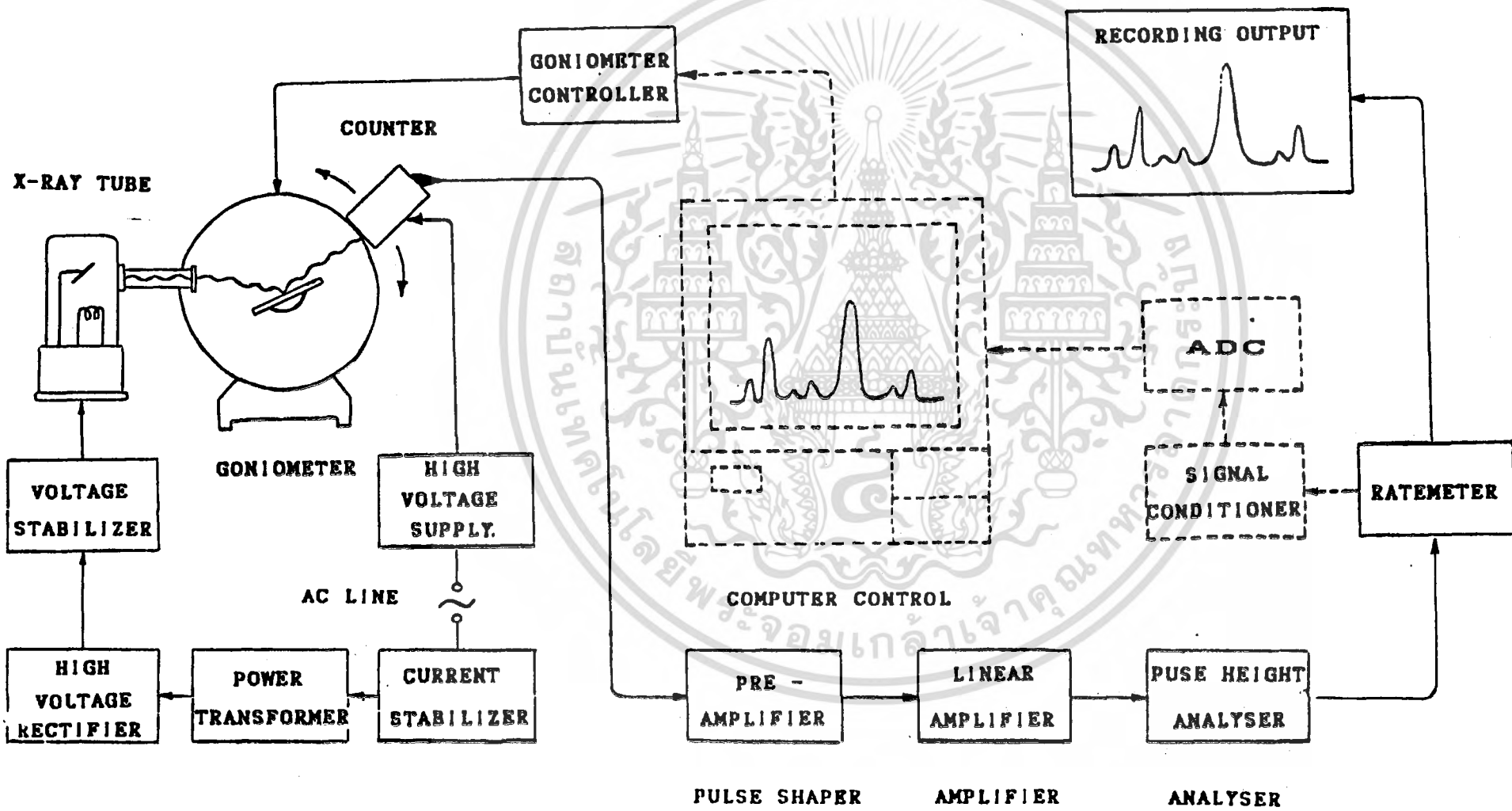
รูปที่ 3.9 แสดงผลของฟิล์มที่ได้จากการหักเหรังสีของสสารด้วยขั้วชนิดต่างๆ ด้วยวิธีของ Debye-Scherrer ที่สภาวะต่างๆ กัน

- (A) ผลผลึกควอตซ์ขนาด 5 ไมครอน เมื่อสสารตัวอย่างอยู่นิ่ง
- (B) ผลผลึกควอตซ์ขนาด 15-50 ไมครอน เมื่อสสารตัวอย่างอยู่นิ่ง
- (C) ผลผลึกควอตซ์ขนาด 15-50 ไมครอน เมื่อหมุนสสารตัวอย่าง
- (D) NaCl เมื่อหมุนสสารตัวอย่าง
- (E) Felspar เมื่อหมุนสสารตัวอย่าง

ในปัจจุบันเครื่อง XRD ได้พัฒนาไปมาก เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น หัววัด วงจรมับ ภาคขยายสัญญาณ และโดยเฉพาะภาคแสดงผล ได้มีการพัฒนาจากภาพในแผ่นฟิล์มที่มีจุดดำ และจุดขาวที่แสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ ไปเป็นการวัดค่าความเข้มของการหักเหรังสีของรังสีเอกซ์โดยตรง และนำมาแสดงในรูปของกราฟ ด้วยเครื่อง X-Y recorder หรือ แสดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-31-

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงแผนผังส่วนประกอบของเครื่อง XRD

จอคอมพิวเตอร์ และด้วยระบบคอมพิวเตอร์นี้ทำให้สามารถที่จะเก็บข้อมูล หรือนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานได้สะดวก รวดเร็ว และมีความแม่นยำมากขึ้น

3.3.1 ตัวนับ

ตัวนับที่กล่าวถึงในที่นี้ ที่จริงก็คือ ตัวหัววัดรังสีเอกซ์แต่เนื่องจากการทำงานหลัก คือการวัดพัลส์ (pulse) จึงทำให้นิยมเรียกตัวตัวนับรังสีเอกซ์ว่า ตัวนับ (counter) ในปัจจุบันมีตัวนับที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์อยู่ทั้งหมด 4 ชนิดคือ

1. ตัวนับชนิด proportional
2. ตัวนับชนิด geiger
3. ตัวนับชนิด scintillation
4. ตัวนับชนิด สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

การเลือกชนิดที่จะใช้ในงาน ขึ้นกับปริมาณพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการไปออกในช่องคอมทอมภายในตัวนับ โดยถ้าเป็นตัวนับชนิด proportional และชนิด geiger อะตอมภายในตัวนับจะเป็นก๊าซ ส่วนตัวนับชนิด scintillation และชนิดสารกึ่งตัวนำ จะเป็นอะตอมของ ของแข็ง โดยตัวนับจะมีคุณสมบัติที่สำคัญ และควรให้ความสนใจอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน คือ

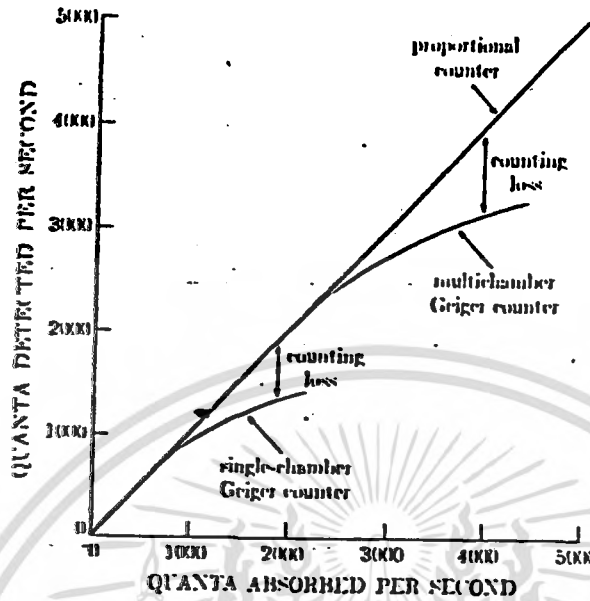
- counting losses ค่านี้จะบอกถึงความผิดพลาดจากการที่จำนวนนับที่ได้มีจำนวนน้อยกว่าที่ควรจะเป็น โดยทั่วไปจะเกิดจากการที่มีอัตรานับสูงมากเกินไป เพราะการที่มีค่าอัตรานับสูงจะทำให้ระยะห่าง หรือเวลาระหว่างพัลส์แต่ละลุ่มมีค่าน้อยเกินไป จนทำให้ตัวนับไม่สามารถแยกแยะจำนวนพัลส์ได้ จึงได้มีการกำหนดค่าเวลาระหว่างพัลส์น้อยที่สุด ที่ทำให้ตัวนับยังสามารถแยกแยะจำนวนพัลส์ได้ เป็น resolving time, t_m หรือกำหนดค่าอัตรานับสูงสุดเป็น $1/t_m$ แต่ในการใช้งานจริงค่าที่กำหนดขึ้นมานี้ก็ยังมีผลให้เกิดการ loss อยู่ เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่เข้ามาที่หัววัดจะออกมาในลักษณะของการสุ่ม (random) ทำให้ในช่วงที่ไม่มีรังสีเอกซ์เลย แต่บางช่วงมีรังสีเอกซ์ออกมามาก ซึ่งช่วงที่มีรังสีเอกซ์จำนวน

มากขึ้นจะทำให้อัตรานับมีค่าสูงกว่าปกติ ดังนั้นถ้าเราใช้งานที่อัตรานับสูงสุดแล้วก็จะทำให้เกิดการ loss ขึ้น จากรูปที่ 3.11 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน quanta ที่ถูกดูดกลืนต่อวินาที (เป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีเอกซ์) กับจำนวน quanta ที่วัดได้ต่อวินาที ซึ่งในอุดมคติแล้ว กราฟควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ในความเป็นจริงจะเกิด loss ขึ้น จากการทดลองปรากฏว่าถ้าใช้อัตรานับเพียง 1 % ของอัตรานับสูงสุดที่คำนวณได้ ก็จะได้ค่าจำนวนนับที่มีความถูกต้อง

-counting efficiency เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพของตัวนับว่าจะสามารถวัดค่าจำนวนนับได้ถูกต้องเพียงไร โดยค่าประสิทธิภาพโดยรวม E จะหาได้จาก ผลคูณของค่าประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงาน E_{abs} และค่าประสิทธิภาพในการวัด E_{det} ซึ่งปกติแล้วระหว่างหลอดรังสีเอกซ์กับตัวนับ จะถูกกันไว้ด้วยวินโดว์ที่ทำด้วย ไม้ก้ำ หรือ beryllium โดยค่าอัตราส่วนที่ถูกดูดกลืนโดยวินโดว์ คือ $f_{bb,w}$ และค่าอัตราส่วนที่ถูกดูดกลืนโดยตัวนับคือ $f_{bb,c}$ สำหรับอัตราส่วนที่เกิดจากการ loss คือ f_{loss} ก็จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพรวมได้จากสมการ

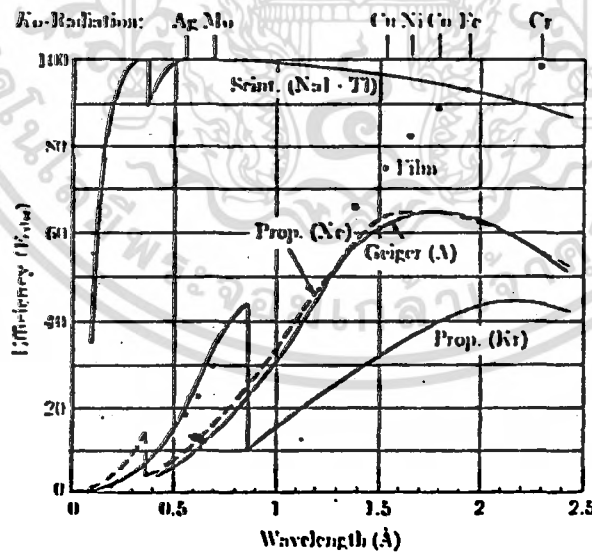
$$E = E_{abs} E_{det} = [(1-f_{bb,w})(f_{bb,c})][1-f_{loss}] \quad (3.13)$$

โดยปกติค่า E_{abs} จะพยายามให้มีค่ามากที่สุด ซึ่งถ้าเราสมมติว่าไม่มี loss เกิดขึ้นเลข ค่า E ก็จะขึ้นกับ E_{abs} ที่หาค่าได้จากรูปร่าง และค่าการดูดกลืนของวินโดว์ และตัวนับ ดังในรูปที่ 3.12 จะแสดงถึงค่า E_{abs} กับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืน



The effect of counting rate on counting losses for three kinds of counter

รูปที่ 3.11 แสดงถึงผลกระทบของอัตราการนับจาก counting losses



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{ph} (เป็นเปอร์เซ็นต์) กับความ

ยาวคลื่นของรังสีเอกซ์สำหรับตัวนับชนิดต่างๆ

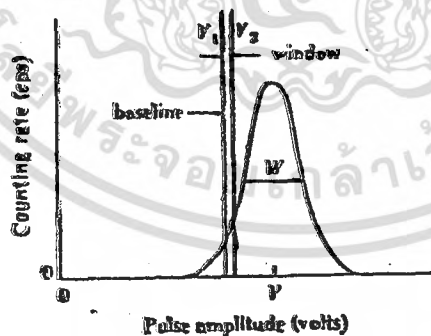
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง -35- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- energy resolution เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการแยก
ระดับพลังงาน ปกติค่าแอมพลิจูดของพัลส์จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่
ถูกดูดกลืน จึงทำให้แอมพลิจูดของพัลส์ที่ออกมาจากตัวนับมีขนาดที่แตกต่างกัน (จาก
ผลของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาซึ่งมีค่าระดับพลังงานไม่เท่ากัน) แต่ถ้าเราสมมติให้
ทุกพัลส์มีขนาดเท่ากัน คือ V โวลต์ (ซึ่งในความจริงจะมีพัลส์ที่มีแอมพลิจูดต่างจากนี้
อยู่) ดังในรูปที่ 3.13 สามารถแสดงการกระจายของค่าแอมพลิจูดของพัลส์รอบๆ
ค่า V กับค่าอัตรานับ (ที่แสดงถึงจำนวนพัลส์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน) ถ้าเรากำหนด
ให้ความกว้างของเส้นกราฟที่ความสูงครึ่งหนึ่งจากจุดสูงสุด เป็น W และค่า
แอมพลิจูดเฉลี่ยของพัลส์เป็น V ก็จะสามารถหาค่าความสามารถของตัวนับในการ
แยกระดับพลังงาน คือ R ได้จากสมการ

$$R = W/V \quad (3.13)$$

โดยค่า R (ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่า W) ยิ่งมีค่าน้อยจะยิ่งดี เพราะจะทำให้
เส้นกราฟมีความชันมากขึ้น หรือพัลส์ที่มีแอมพลิจูดต่างจากค่า V มีจำนวนน้อยลง
ซึ่งเป็นการแสดงถึงความสามารถในการแยกที่ดีของตัวนับ



Distribution curve of pulse size.

รูปที่ 3.13 แสดงการกระจายของแอมพลิจูดของพัลส์

เมื่อทราบถึงค่าตัวแปรที่สำคัญสำหรับตัวนับแล้ว ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียด

เอียดของตัวนับที่ใช้สำหรับวัดรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนับรังสีแบบบรจกาซ

เมื่อโฟตอน (photon) ของรังสีเอกซ์ ทำปฏิกิริยากับอะตอมของก๊าซเฉื่อย อิเล็กตรอนวงนอกสุดอาจจะหลุดออกไป ทำให้เกิดอไอออนบวก ตัวอย่างเช่นในกรณีของก๊าซอาร์กอน



เป็นผลทำให้เกิดอิเล็กตรอน และอไอออนบวก ซึ่งจะเรียกว่าคู่ของอไอออน (ion pairs) ค่าของศักย์ไฟฟ้าที่จะทำให้อิเล็กตรอนตัวแรก หลุดออกจากอะตอมของก๊าซเฉื่อยนั้นค่ามาก อยู่ในช่วงประมาณ 20 eV ซึ่งค่านี้ที่จริงแล้วขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอม (atomic number) ของอะตอม แสดงในตารางที่ 3.1 ค่าของศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการไอออไนซ์เซชัน (ionization) ครั้งแรกจะลดลงเมื่อจำนวนอะตอมเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน พลังงานในการสร้างคู่ของอไอออนเรียกว่า ค่า effective ionization potential ซึ่งมากกว่า ค่า theoretical first ionization potential ค่าเหล่านี้ได้วัดและแสดงในตารางที่ 3.1 ด้วย ซึ่งระยะของอนุภาคจะลดลงเมื่อจำนวนอะตอมเพิ่มขึ้น จำนวน (n) ของคู่ของอไอออนเริ่มแรกที่กำเนิดจากการไอออไนซ์เซชันจากรังสีเอกซ์ จะแปรตามพลังงาน (E_0) ของ

First Ionization Potentials

Element	Density (g.p.l.)	Atomic Number	Theoretical Ionisation Potential (eV)	Average energy to produce ion pairs (eV)
He	0.179	2	24.6	27.8
Ne	0.900	10	21.6	27.4
Ar	1.874	18	15.8	26.4
Kr	3.708	36	14.0	22.8
Xe	5.841	54	12.1	20.8

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า First Ionization Potentials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-37-

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบ และจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$n = E_0 / e_1 \quad (3.14)$$

เมื่อ e_1 เป็น effective ionization potential

รูปแบบที่เป็นหลักการพื้นฐานของตัวนับรังสีแบบบรรจุก๊าซ ประกอบด้วย กระจกบอกล่าง มีเส้นลวดบาง ๆ อยู่ตรงกลางเป็นแกนของรังสี ซึ่งเส้นลวดนี้จะเป็น ขั้วแอโนด (anode) ของตัวนับรังสี และต่อกับศักดาไฟฟ้ามีความต่างศักย์ ประมาณ 1-2 keV ตัวถังของกระจกจะต่อกับสายดิน และบรรจุด้วยก๊าซผสม ที่ ความดันบรรยากาศ ช่องวินโดว์ (window) จะอยู่ที่ผนังหรือ ที่ก้นกระจก ซึ่งจะ เป็นช่องที่ให้รังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบผ่านเข้าไปได้ ซึ่งโฟตอนของรังสีเอกซ์ ที่เข้าไป ในตัวนับรังสีจะสร้างคู่ของอิเล็กตรอน-โพสิตรอน n คู่ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ ซึ่งความน่าจะเป็นของจำนวนคู่ที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของการ absorption โฟตอน โดยก๊าซในตัวนับ เมื่อให้ความต่างศักย์ของศักดาไฟฟ้าที่ขั้ว แอโนด สูงพอที่จะป้องกันการเกิดการ recombination แล้ว อิเล็กตรอนจะพุ่ง เข้าหาขั้วแอโนด และอิเล็กตรอนบวกจะพุ่ง เข้าหาสายดินที่เป็นตัวถังของกระจก ซึ่งค่า mean free path ของอิเล็กตรอนนั้น จะสั้นมาก ที่อุณหภูมิต่ำ และความดันปกติ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของอาร์กอนจะอยู่ในช่วงประมาณ 4×10^{-5} cm อิเล็กตรอนตัว นรจะชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยอื่นๆ ที่ความต่างศักย์ไม่มากนัก การชนกันนี้จะไม่ ผลิตหยุน (inelastic) และอิเล็กตรอนตัวใหม่จะเกิดขึ้น เมื่อการชนกันแต่ละครั้ง ทำให้ อิเล็กตรอนตัวแรกหลุดออกมาจากที่มันเคยอยู่ ขบวนการนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่อง และผลสุดท้ายอิเล็กตรอน n ตัว ก็จะไปถึงขั้วแอโนดในที่สุด แต่ที่ความต่าง ศักย์สูง ๆ การชนกันจะผลิตหยุน (elastic) เพราะว่าพลังงานจลน์ที่เพิ่มให้ค่า electron mean free path ให้มากกว่าพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากกาชนกัน

ดังนั้นอิเล็กตรอนเริ่มแรกจะชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย ทำให้อะตอมเกิดการ

อิเล็กตรอนเป็นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่วิ่งไปเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

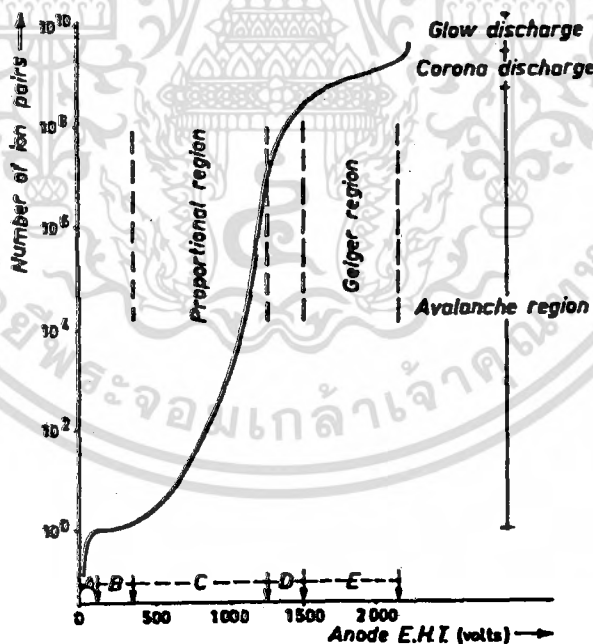
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเป็น 38- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนไนซ์ โดยปราศจากการ absorption ดังนั้น หนึ่งอิเล็กตรอนก็จะกลายเป็นสอง สองอิเล็กตรอนก็จะกลายเป็นสี่ และต่อไปเรื่อยๆ ขณะที่อิเล็กตรอนเข้าใกล้ขั้วสนามไฟฟ้าแรงสูงใกล้กับขั้วแอโนด พลังงานจะเพิ่มมากขึ้นค่า mean free path จะเพิ่มขึ้น และเมื่อหลาย ๆ ขบวนการเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะเรียกว่าการเกิด avalanche ผลของขบวนการนี้เราจะเรียกว่าการขยายของก๊าซ แทนด้วยสัญลักษณ์

$$G = N \times e, / E_0 \quad (3.15)$$

เมื่อ G เป็นกาขยายของก๊าซ และ N เป็นจำนวนของคู่ของไอออน ที่ทำให้อิเล็กตรอนไปถึงขั้วแอโนด

ภาพที่ 3.14 แสดงการพล็อต (plot) ค่า N กับความต่างศักย์ที่ขั้วแอโนด สำหรับการอธิบาย ตัวนับก๊าซ ในช่วง A ความต่างศักย์ไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดการ recombination ของคู่อิออน และเกินกาขยายรวมนั้นน้อยกว่าหนึ่ง



Plot of the number (N) of ion pairs produced at different applied voltages, for a coaxial type gas counter, from a wavelength giving (n) primary ion pairs. As $N = n \times G$, the ordinate represents the effective gas gain (G).

ภาพที่ 3.14

แสดงการplotจำนวน(N)คู่อิออนที่เกิดขึ้น กับความต่างศักย์ที่ขั้วแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความต่างศักย์สูงขึ้น จนถึงความต่างศักย์ ที่ป้องกันการเกิดการ recombination หรือเมื่อ $n = N$ ในช่วงนี้เป็นช่วง B เรียกว่าเป็นช่วง ion chamber และพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ จะมีความสูงของ pluse และการขยายคงที่

เมื่อความต่างศักย์สูงขึ้นไปอีก การอัดตัวของก๊าซจะเริ่มขึ้น โดยการเกิด avalanche และมีกาขยายมากกว่า 10^6 ในช่วงพื้นที่ C นี้เรียกว่าเป็นช่วง proportional region และจะเกิด avalanche ใกล้เคียง ๆ กับหัวอาโนด ช่วงนี้จะให้ความสูงของ พัลส์ ที่แท้จริง แปรตามพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ

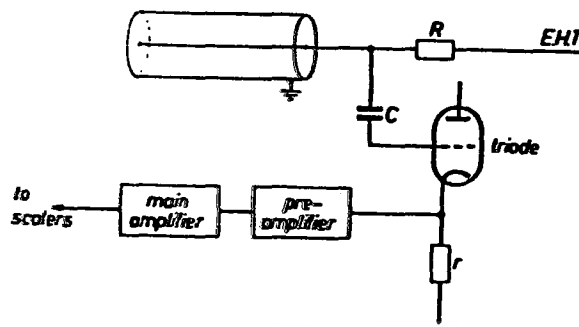
ถ้าความต่างศักย์สูงขึ้นไปอีก จะเกิด avalanche เนื่องจากอิเล็กตรอนเริ่มแตกจากปฏิกิริยาของ UV quanta และที่คาโทด (cathode) จะเกิดการ discharge อย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของอาโนด อิเล็กตรอนจะเกิดการไอออไนซ์ เป็นพันธะรังสีต่อวินาที ซึ่งมากกว่าความสามารถที่ไอออนบวกจะสร้างตัวขึ้นมาเป็นเกราะรอบ ๆ อาโนดได้อย่างสมบูรณ์ และขนาดความสูงของ พัลส์ ที่ discharge ออกมาจะมีขนาดเท่า ๆ กัน นี่เป็นผลของช่วงสูงสุดของช่วง proportional region แสดงอยู่ในช่วง D

ช่วง E เป็นช่วง Geiger region และเป็นคุณสมบัติที่แอมพลิจูด (amplitude) ของ พัลส์ ขึ้นกับพลังงานของโฟตอนของรังสีเอกซ์แต่ละตัว มีการขยายประมาณ 10^8 สำหรับช่วง Geiger region นี้

แม้ว่าที่ความต่างศักย์ที่สูงกว่านี้จะทำให้เกิดการ discharge อย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าความต่างศักย์จะเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดก็ตาม เพราะช่วงนี้ถึงที่ที่กระแสถูกสร้างขึ้นด้วยก๊าซที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ช่วงสุดท้ายนี้เรียกว่าช่วง glow discharge region

ภาพที่ 3.15 แสดงโครงสร้างของตัวนับชนิดที่บรรจุก๊าซ รวมทั้งวงจรพื้นฐาน เมื่ออิเล็กตรอนไปถึงหัวอาโนด และสร้างกระแสซึ่งจะถูกจำกัดไว้ด้วยตัวต้านทาน

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The basic circuitry requirement for the gas proportional counter. In the case of the Geiger counter the pulses from the counter do not require further amplification.

ภาพที่ 3.15 แสดงโครงสร้างของนับชนิดที่บรรจุก๊าซรวมทั้งวงจรพื้นฐาน

R ซึ่งต่ออนุกรมกับเอาโนดของตัวนับรังสี กระแสที่ไหลทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อม และเกิด พัลส์ ที่เกิดขึ้นจะมีแอมพลิจูดสูงพอ เมื่อมีกระแสเพียงขนาดไม่กี่ไมโครแอมป์ ซึ่งค่าของตัวต้านทาน R จะต้องมีค่าสูงตามไปด้วย ปกติจะอยู่ในช่วงประมาณเมกะโอม ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของวงจรจึงสูงมาก และจุดประสงค์ของวงจรคาโอด ฟอลโลเวอร์ นั้นจะสร้าง พัลส์ ที่คล้ายกันแต่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า ด้วยการป้อน พัลส์ ไปยังกริด (grid) ของหลอดไตรโอด (triode) พัลส์ ที่เหมือนกันจะเกิดขึ้นที่ r และมีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า สามารถเลือกค่า r ที่ต่ำ ๆ ที่เหมาะสมกันได้ ปกติแล้วอยู่ในช่วงไม่กี่ร้อยโอห์มแอมพลิจูดของ พัลส์ ที่ R ยังคงกำหนดแอมพลิจูดของ พัลส์ ที่ r แม้ว่าจะมีค่าคงที่ของวงจรคาโอด ฟอลโลเวอร์ น้อยตัวก็ตาม ถ้าผลของ พัลส์ ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่พอ เช่นในกรณีของ Geiger counter มันก็จะสามารถผ่านไปยัง scaler ได้โดยตรง ส่วนในกรณีของ proportional counter มันก็ต้องผ่านการ preamplification เสียก่อน

จำนวนของอิออนบวกควรจะถูกพิจารณาต่อไป

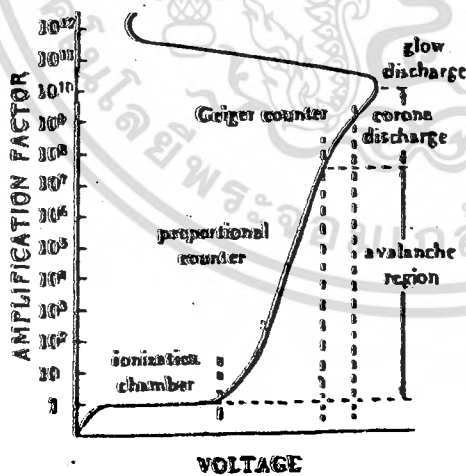
เมื่ออิออนไปถึงที่คาโอด

อิเล็กตรอนก็สามารถหลุดออกมาจากผิวของคาโอด ซึ่งมีความเป็นกลางทางประจุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

แต่จะกำเนิดสิ่งที่แตกต่างกันคือโฟตอน ซึ่งมีพลังงานแปรตามความแตกต่างของพลังงานระหว่าง อีออนที่มาตกกระทบ และค่า work function ของผิวของคาโทด ซึ่งเป็นภาวะเกิดการ recombination ของโฟตอนที่สามารถหลุดออกมาจากผิวของคาโทดและกลายเป็นavalanche ตัวใหม่ ซึ่งจำเป็นมากที่จะต้องป้องกันในตัวนับรังสีแบบบรรจุก๊าซนี้ ปกติจะเพิ่มก๊าซอีกชนิดลงไปเป็น ionizable gas ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบของธาตุที่มีสองอะตอม หรือ ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะเกิดรังสีโดยง่าย โดสรังสีนี้สามารถให้อิเล็กตรอนไปจับกับอีออนบวกของก๊าซเฉื่อยทำให้เกิดอะตอมของก๊าซเฉื่อยชนิดเดียวกับ quench gas ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันก็มี Halogens, methane และ alkyl halide

1. ตัวนับชนิด proportional ตัวนับชนิดนี้จะประกอบด้วย ทรงกระบอกโลหะ (ที่เป็นหัวคาโทด) สยาวประมาณ 10 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งภายในบรรจุก๊าซ และมีเส้นลวดโลหะ (หัวอานอด) วางใน



Effect of voltage on the gas amplification factor.

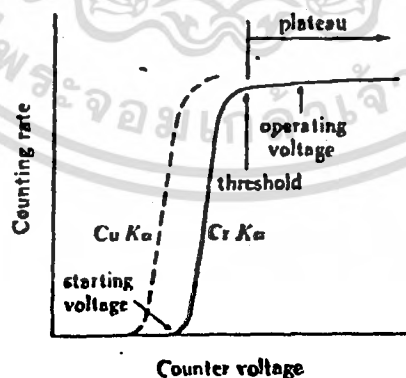
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างขั้วกับค่า gas

amplification

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง-42- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวเส้นแกนของทรงกระบอก โดยมีค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วคาโธด และขั้ว
 อานอด ประมาณ 200 V และที่ปลายด้านหนึ่งของทรงกระบอกจะถูกปิดด้วยช่องที่
 ยอมให้รังสีเอกซ์ผ่านเข้าได้ ส่วนปลายอีกด้านจะปิดกั้นไม่ยอมให้รังสีเอกซ์ผ่าน ดัง
 นั้นรังสีเอกซ์ที่เข้ามาจะถูกดูดกลืนพลังงานโดยอนุภาคของก๊าซที่อยู่ในทรงกระบอก
 ทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ และปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อน
 ที่ภายใต้สนามไฟฟ้ามุ่งไปยังขั้วอานอด จึงเกิดระแแสคงที่ ประมาณ 10^{-12} A
 หรือน้อยกว่า ไหลผ่านตัวต้านทาน R ค่ากระแสจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของรัง
 สีเอกซ์ เราจะเรียกอุปกรณ์ที่ทำงานในลักษณะนี้ว่า ionization chamber ซึ่งถ้า
 สมัย และไม่นิยมนำมาใช้นานแล้ว เนื่องจากความไวในการวัดต่ำ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวนับชนิดใหม่โดยอาศัยจากหลักการข้างต้น เรียกว่า
 ตัวนับชนิด proportional ซึ่งจะใช้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วประมาณ 1000
 V ทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหม่ขึ้น เรียกว่า multiple ionization หรือ gas
 amplification โดยที่สภาวะนี้จะทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามี่ค่าสูงพอที่จะ
 เร่งให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์ วิ่งเข้าไปหาเส้นลวดอานอด ซึ่งยังเข้า



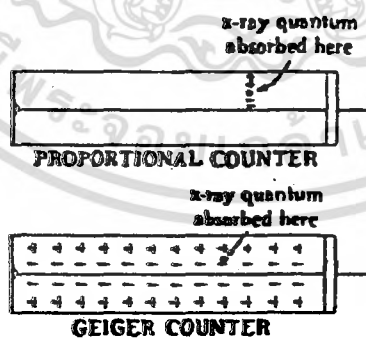
Effect of voltage applied to proportional counter on observed counting rate at constant x-ray intensity (schematic).

รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วกับค่าอัตรานับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้ขีดอาโนดเท่าใดอัตราเร่งก็จะยิ่งมีค่ามากขึ้น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะไปทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม และเกิดการไอออไนซ์ขึ้นในลักษณะต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จะทำให้อะตอมที่ถูกไอออไนซ์จากการดูดกลืนพลังงานของรังสีเอกซ์เพียงครั้งเดียว มีจำนวน 10^3 ถึง 10^5 เท่าของที่เกิดใน ionization chamber ซึ่งจากผลของการ amplification นี้ จะทำให้วงจรมานอกสามารถวัดกระแสของพัลส์ที่เกิดขึ้นได้ง่าย

ค่า gas amplification, A สามารถหาได้โดยให้ n เป็นจำนวนอะตอมที่ถูกไอออไนซ์จากการเข้ามาของรังสีเอกซ์หนึ่งอนุภาค (quanta) ดังนั้นจำนวนอะตอมที่ถูกไอออไนซ์รวมจะมีค่าเป็น An จากรูปที่ 3.16 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า gas amplification กับค่าความต่างศักย์ระหว่างขีดอาโนดและขีดคาโทด จะเห็นได้ว่าที่ค่าความต่างศักย์ในช่วงของตัวนับแบบ proportional จะมีค่าประมาณ 10^3 ถึง 10^5 (เพราะค่า A ของ ionization chamber มีค่าเป็น 1) ก็จะทำให้เกิดพัลส์ของกระแสที่มีค่าแอมพลิจูดประมาณหลาย มิลลิวัตต์



Differences in the extent of ionization between proportional and Geiger counters. Each plus (or minus) symbol represents a large number of positive ions (or electrons).

รูปที่ 3.18 แสดงความแตกต่างของการเกิดไอออไนซ์ ระหว่างตัวนับชนิด

proportional กับตัวนับชนิด geiger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง -44- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

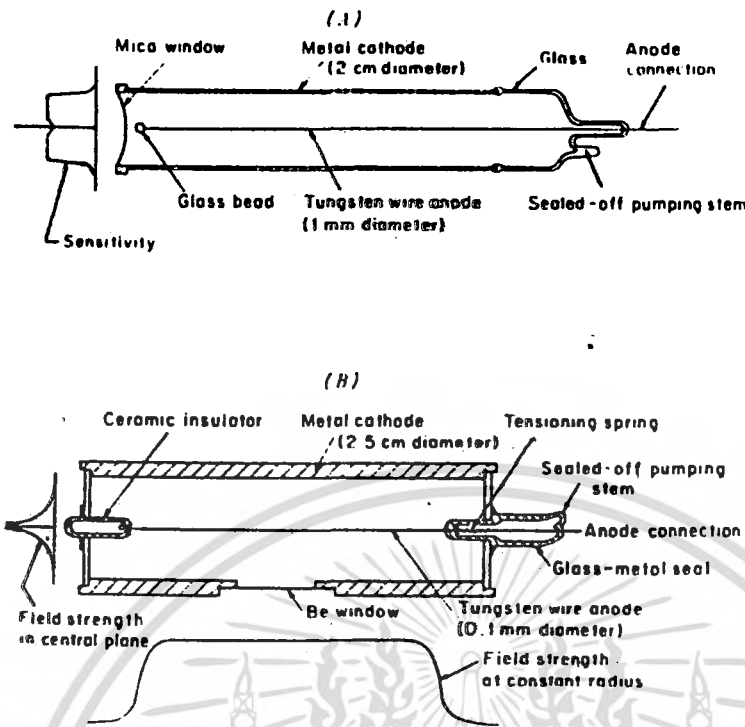
ในการใช้งานตัวนับชนิดนี้ ค่าความต่างศักย์ที่ใช้จะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และค่าอัตรานับก็ต้องไม่ขึ้นกับค่าความต่างศักย์ ดังในรูปที่ 3.17 ก็คือช่วงที่เรียกว่า ช่วง plateau จุดที่ก่อนเข้าสู่ช่วง plateau เรียกว่า จุด threshold การใช้จะให้ค่าความต่างศักย์ในช่วงที่สูงกว่า threshold ประมาณ 100 V

ตัวนับชนิด proportional เป็นตัวนับที่วัดค่าได้รวดเร็วมาก และสามารถวัดค่าของอัตรานับสูงถึงค่า 10,000 cps ซึ่งความสามารถนี้เป็นผลมาจากการเกิด avalanche trigger จากการคูณรังสีเอกซ์ในช่วงแคบๆ ประมาณ 0.1 มม. หรือน้อยกว่า จึงทำให้มีชั้นที่เคลือบสำหรับการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ที่จะเข้ามาอีกได้ ดังในรูปที่ 3.18 และเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่บริเวณใกล้กับขั้ววาโนดจะมีค่าไม่ยูนิฟอร์ม (ไม่แน่นอน) ตัวนับชนิด proportional ส่วนใหญ่จึงนิยมให้เปิดช่องวินโดว์สำหรับให้รังสีเอกซ์เข้าไปอยู่ที่ด้านข้าง ซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็นไปตามรูป 3.19 (B)

2. ตัวนับชนิด geiger

จากตัวนับชนิด proportional นั้นถ้าเราเพิ่มความต่างศักย์ระหว่างขั้วไปจนมีค่าใกล้เคียง 1500 V ก็จะทำให้ได้ตัวนับชนิดใหม่อีกชนิดหนึ่งเรียกว่า ตัวนับชนิด geiger จากผลของความต่างศักย์นั้นนอกจากทำให้อะตอมที่ถูกไอออนไนซ์จะเข้าไปไอออนไนซ์อะตอมอื่นแล้ว ยังมีผลให้เกิดการปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกมาด้วย ซึ่งโฟตอนของรังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้จะเคลื่อนที่ทั่วภายในตัวนับด้วยความเร็วสูงมากจนทำให้เกิดการไอออนไนซ์ไปทั่วทั้ง chamber ของตัวนับ ดังในรูปที่ 3.18 ตัวนับชนิดนี้จะให้พัลส์ที่มีขนาดเท่ากันหมดไม่ว่าพลังงานของรังสีเอกซ์จะมีค่าเท่าใด

ตัวนับชนิดนี้จะวัดค่าอัตรานับได้ต่ำ เพราะจะมี loss เกิดขึ้นเมื่อวัดที่อัตรานับสูง ทำให้ไม่นิยมใช้สำหรับเครื่อง XRD ส่วนโครงสร้างภายในจะเป็นไปตามรูปที่ 3.19 (A)



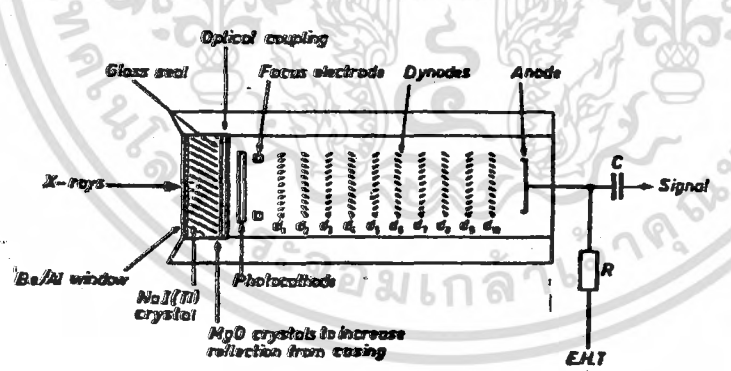
(A) Geiger-Müller counter, showing sensitivity across the window. (B) Proportional counter, showing variation of field strength along its length and across its diameter

รูปที่ 3.19 แสดงโครงสร้างภายในตัวนับ (A) เป็นแบบ geiger (B) เป็นแบบ proportional

3. ตัวนับชนิด scintillation

ตัวนับชนิดนี้ จะอาศัยหลักการของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนสารบางชนิด แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงออกมา ปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีเอกซ์ แต่เนื่องจากปริมาณ หรือความเข้มของแสงที่วัดมีค่าน้อย จึงต้องใช้หลอดรับแสงชนิดพิเศษที่เรียกว่า หลอดรับแสงทวีแรงดัน (photomultiplier) ซึ่งจะทำให้กระแสที่ได้จากการวัดมีค่ามากพอที่จะวัดได้ โดยปกติสารที่จะเปล่งแสงเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบคือ ผลึกของโซเดียมไอโอไดด์ (sodium iodide, NaI) ที่เจือด้วยทลเลียม (thallium) ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งจะ

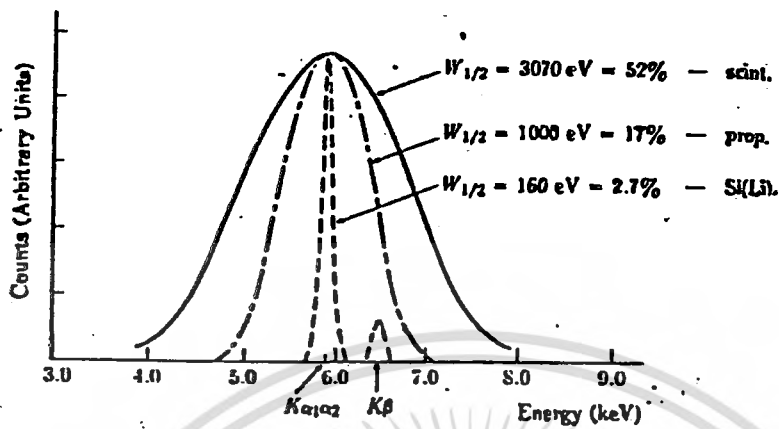
มีการเคลือบผิวหน้าของหลอดด้วยสารเรืองแสง และซิลด์เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกด้วยอะลูมิเนียมฟอสเฟต ดังในรูปที่ 3.20 เมื่อรังสีเอกซ์วิ่งมาตกกระทบลงบนผลึกของ NaI ก็จะทำให้เกิดแสงผ่านต่อไปยังส่วนที่เรียกว่า photocathode ซึ่งเป็นวัสดุไวแสง (ที่มีหน้าที่ในการทำให้แสงที่ตกกระทบเปลี่ยนไปเป็นอิเล็กตรอน) โดยปกติจะทำจากสารประกอบของโลหะที่เจือด้วยซีเซียม (cesium) และสารหนู (antimony) จากนั้นผ่านเข้าไปในหลอดรับแสงทวีแรงดัน ซึ่งภายในจะมีโลหะที่เป็นตัวสะท้อนอิเล็กตรอน เรียกว่า ไดโนด (dynode) โดยแต่ละตัวจะมีผลให้ค่าความต่างศักย์มีค่าสูงขึ้น 100 V จึงทำให้ได้พัลส์ที่มีขนาดใหญ่ไม่น้อยกว่าพัลส์ที่ได้จากตัวนับชนิด geiger แต่สามารถวัดค่าอัตรานับได้สูงถึง 10^6 cps โดยไม่เกิด loss และยังให้พัลส์ที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ เช่นเดียวกับตัวนับชนิด proportional แต่มีความสามารถในการแยกแยะดีกว่า (มีค่า resolution ต่ำกว่า) ดังที่ได้แสดงในรูป 3.21



The scintillation counter. The X-rays are converted into light energy by the NaI(Tl) Phosphor. This light falls onto the Sb/Cs photocathode producing a burst of electrons which are focussed onto the first of a series of 10 dynodes (d_1-d_{10}). Each dynode has a successively higher positive potential and the electrons produced at each dynode are accelerated to the next, until they eventually reach the anode. Here a small current is produced causing a momentary drop in voltage and each pulse is passed via the condenser C to the cathode follower and amplifying circuits on to the scaling circuits.

รูปที่ 3.20 โครงสร้างของตัวนับชนิด scintillation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - 47 -
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

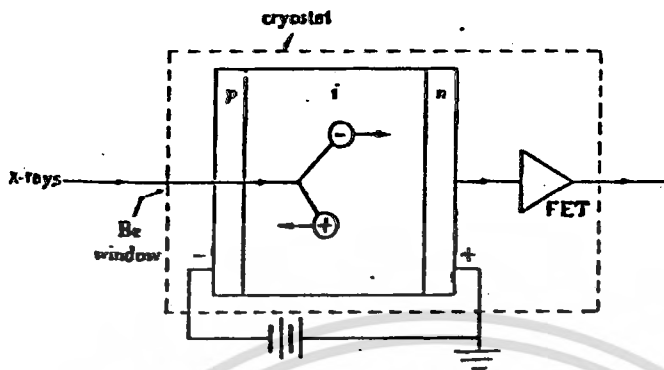


Pulse-height distribution curves for three kinds of counter. Incident radiation is Mn $K\alpha$ ($\lambda = 2.10 \text{ \AA}$, $h\nu = 5.90 \text{ keV}$) and Mn $K\beta$ ($\lambda = 1.91 \text{ \AA}$, $h\nu = 6.50 \text{ keV}$).

รูปที่ 3.21 แสดงถึงการกระจายของขนาดความสูงของพัลส์สำหรับตัวนับชนิดต่างๆ

4. ตัวนับชนิดสารกึ่งตัวนำ

ตัวนับชนิดนี้เป็นตัวนับที่เกิดขึ้นหลังจากตัวนับ 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว โดยจะมีความสามารถในการแยกแยะระดับได้ดีกว่า จึงนิยมใช้กับเครื่องสเปกโตรสโคปี (spectroscopy) หลักการคือ จะใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัววัดค่า ซึ่งปกติจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ ซิลิกอน (silicon, Si) และเจอร์มาเนียม (germanium, Ge) โดยเจอร์มาเนียมจะเหมาะสำหรับวัดรังสีแกมมา ส่วนซิลิกอนจะใช้สำหรับวัดรังสีเอกซ์ แต่เนื่องจากตัวนับชนิดนี้ต้องใช้งานที่อุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน คือ 77 เคลวิน หรือ -196 องศาเซลเซียส จึงไม่นิยมใช้งานกับเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ตัวนับชนิดนี้จะมีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.22



Si(Li) counter and FET preamplifier, very schematic. Both are in a cooled space, and x-rays enter through a beryllium window. The counter is operated about 1000 volts. \ominus = electron, \oplus = hole.

รูปที่ 3.22 โครงสร้างของตัวนับชนิดสารกึ่งตัวนำ

ในโครงการพิเศษนี้

เป็นการศึกษาการทำงานของหัววัดชนิด

proportional ซึ่งเหมาะสมอย่างมากกับการใช้กับเครื่อง XRD

3.3.2 pulse Height Analyser

ปัจจุบันนิยมใช้ชุดตัวนับชนิด proportional counter สำหรับเครื่อง XRD ซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวนับจะเป็นสัดส่วนกับรังสีเอกซ์ที่เข้ามา โดยจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ใช้แบ่งแยกระดับความสูงของพัลส์ เพื่อที่จะสามารถบอกถึงความแตกต่างของพลังงานของรังสีเอกซ์ วงจรนี้มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แบ่งเรียงตามความซับซ้อนของการทำงาน ดังต่อไปนี้

- Pulse-height discriminator
- Single channel pulse-height analyser
- Multichannel pulse-height analyser

สำหรับวงจรแรก และวงจรที่สอง จะใช้กับเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ทั่วไป ส่วนในวงจรที่สาม นิยมใช้กับเครื่องเอกซ์เรย์สเปคโตรสโคปี ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้

1. Pulse-height discriminator

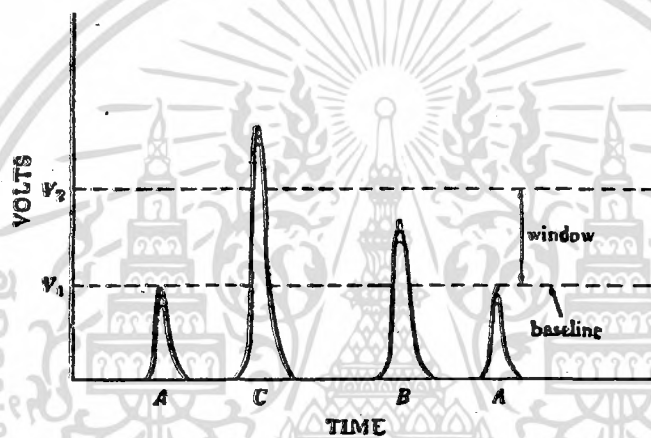
เป็นตัวแยกสัญญาณความสูงของพัลส์ มีหลักการทำงานดังนี้คือ รังสีเอกซ์ที่เข้ามาที่ตัวนับมีความยาวคลื่น 3 ค่า คือ $a > b > c$ ตัวนับจะส่งสัญญาณออกไปเป็นพัลส์ A, B, C ที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ลูก สมมุติว่า C มีขนาดใหญ่ที่สุด ถ้ามีวงจรที่ใส่เข้าไปทำหน้าที่ในการตั้งค่าความสูงของพัลส์ต่ำสุด (เพื่อตัดค่า background) ก็จะมีพัลส์ที่ออกมาเฉพาะที่มีความสูงของพัลส์มากกว่าระดับที่ตั้งไว้ ในที่นี้สมมุติว่าให้เป็น V, วอลต์ จากรูปที่ 3.23 จะเห็นได้ว่าพัลส์ A จะไม่สามารถผ่านไป

2. Single channel pulse-height analyser

เป็นวงจรที่นอกจากจะทำหน้าที่แยกความสูงของพัลส์ต่างๆ ที่มีค่าความสูงน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า V_1 โวลต์ ดังในรูปที่ 3.23 แล้ว ยังจะทำการตัดพัลส์ที่มีความสูงมากกว่า V_2 โวลต์ ด้วย เพราะว่าพัลส์ลักษณะนี้จะ trigger ทั้งค่า V_1 และ V_2 พร้อมๆ กัน , สมมุติว่ามีพัลส์ A, B และ C ผ่านเข้ามาถึงส่วนวิเคราะห์ จะมีพัลส์ B เท่านั้นที่จะผ่านไปถึง ระดับแนวกันล่างที่ตั้งไว้ เรียกว่า base line ช่วงของแรงดันระหว่าง V_1 และ V_2 จะเรียกว่า window หรือ channel

สำหรับในโครงการพิเศษนี้ เครื่อง XRD ที่ใช้จะมีส่วนวงจรนี้ เช่นเดียวกัน แต่จะเรียกว่า วงจร analyser



Pulse-height discrimination and analysis. The statistical spread in pulse size, measured by the width H' of Fig. 7-13, is suggested above by the variable heights of each pulse.

รูปที่ 3.23 ตัวอย่างการใช้ pulse-height analyser กับพัลส์ขนาดต่างๆ

3.3.3 Scaler

เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับนับ pulse ต่างๆ ที่ได้จากตัวหัววัด โดยการวัดจะกำหนดค่าเวลาในการวัดไว้แน่นอนค่าหนึ่ง แล้วทำการวัดค่าของอัตราส่วนนับ pulse หรือกำหนดค่าอัตรานับ pulse ที่แน่นอนไว้จากนั้นก็บันทึกค่าเวลา ซึ่งค่าที่ได้ทั้งสองแบบจะนำไปหาค่าอัตรานับเฉลี่ย โดยตัว scaler ประกอบด้วย stage ต่างๆ ที่เหมือนกันมาต่ออนุกรมกัน ในแต่ละ stage จะมีวงจรหารให้มีย่าน้อยลง ซึ่งจะมีค่าลดลงที่เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งในทุกๆ stage เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่าลดลง 10 ทุกๆ stage จะเรียกว่า decade scaler หรือลดลงแต่ละ stage เป็น 2 จะเรียกว่า binary scaler

สำหรับ decade scaler นั้น pulse ที่ออกมาจาก stage ที่สอง 1 ลูก จะมาจาก pulse ที่เข้าไปใน stage แรกจำนวน 10 ลูก ถ้า scaler มีทั้งหมด 5 stage แสดงว่า pulse ลูกที่ stage ที่ห้า จะมาจาก pulse ที่เข้าไปที่ stage แรกจำนวน 10^5 ลูก โดยตัวเลขที่ใช้แสดงผลค่าจำนวน pulse จะอยู่ในรูปของเลขฐานสิบเท่านั้น ส่วนกรณีที่เป็น binary scaler ก็จะทำงานในทำนองเดียวกัน แต่ค่าแฟกเตอร์จะเป็น 2^n เมื่อ n เป็นจำนวน stage สำหรับการแสดงผลของผลรวมจะแสดงในรูปเลขฐานสิบเช่นเดียวกัน

โดยการใช้งานจริงจะให้ scaler ร่วมกับ timer ซึ่งการวัดจะมี 2 ลักษณะดังนี้ 1. การวัดแบบกำหนดเวลาคงที่ จะวัดได้โดยการกำหนดเวลาที่ใช้ t ด้วยการเลือกจากปุ่ม preset time เมื่อนับจำนวน pulse จนครบเวลาที่ตั้งไว้ ก็จะได้จำนวน pulse เป็น N pulse เราจะสามารถหาค่าอัตราการนับเฉลี่ยได้จาก N/t cps (counts per second)

2. การวัดแบบกำหนดจำนวน pulse คงที่ จะวัดโดยตั้งค่าจำนวน pulse ที่จะให้หยุดการวัด จากนั้นจะนำค่าเวลาที่ใช้ในการวัดจะได้จำนวน pulse เท่าที่ตั้งไว้มาหาค่าอัตราการนับเฉลี่ยจากสูตร N/t cps เช่นเดียวกัน

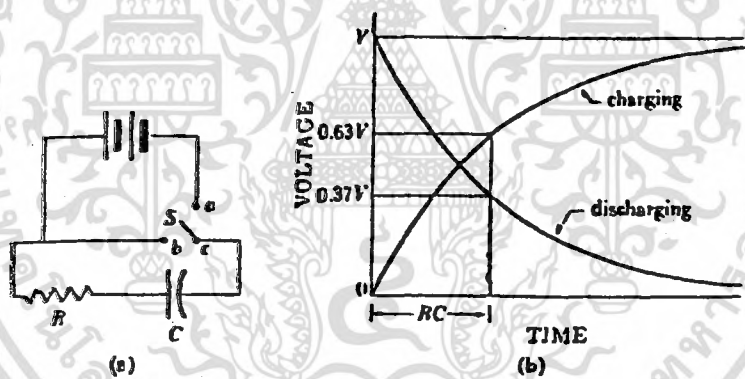
3.3.4 rate meter

counting - rate meter เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวัดค่าอัตรานับเฉลี่ยของ pulse โดยจะทำการวัดค่าโดยตรงไม่จำเป็นต้องวัดจำนวน pulse และเวลาแยกกันเหมือนกับที่วัดค่าด้วยวงจรร่วมระหว่าง scaler และ timer ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของ ratemeter คือ จะเป็นวงจรที่ต่ออนุกรมระหว่างตัวเก็บประจุกับตัวต้านทาน โดยการทำงานจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า และกระแส ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.24(a) ซึ่งสวิตช์ S สามารถที่จะต่อให้จุด c กับจุด a ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ หรือต่อให้จุด c กับจุด b ก็จะเกิดการลัดวงจรระหว่างตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ เปลี่ยนในช่วงเวลาชั่วหนึ่งที่ขึ้นกับค่าของตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ดังในรูปที่ 3.24(b)

วงจร ratemeter ที่สมบูรณ์นั้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรก pulse-shaper จะทำหน้าที่ในการจัดรูปร่างของ pulse ให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างของ pulse คงที่ แล้วส่งต่อไปยังส่วนที่สอง ที่มีหน้าที่ในการขยายสัญญาณ pulse ให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับที่จะส่งไปยังตัวนับ ดังวงจรในรูปที่

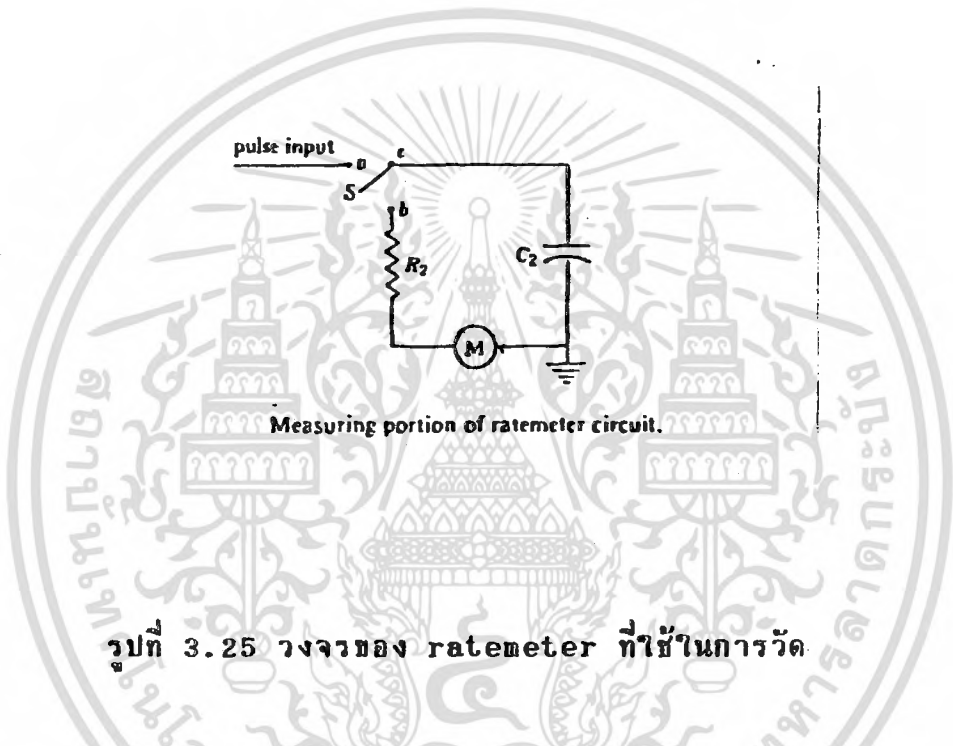


รูปที่ 3.24 (a) วงจรพื้นฐานของ ratemeter

(b) ผลตอบสนองของวงจร

3.25 ซึ่งมีหลักการพื้นฐานเหมือนในรูปที่ 3.24(a) และมีค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็น $R_c C_c$ โดยเมื่อสวิตช์ S เชื่อมต่อจุด b กับจุด c ถ้ามี pulse เข้ามาก็จะทำให้เกิดการเก็บประจุเข้าที่ตัวเก็บประจุ C_c แต่เมื่อเชื่อมต่อจุด b กับจุด c ก็จะทำให้มีกระแสไหลจากการคายประจุผ่านตัวต้าน

ทานจน R_c และแอมป์มิเตอร์ M จนเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ ซึ่งกระแสที่ไหลนั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีเอกซ์ ในการใช้งานจริงจะต้องวางจว ratemeter ร่วมกับ chart recorder เพื่อที่จะบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ได้อย่างต่อเนื่อง และถ้าให้ goniometer ทวนมุมด้วยอัตราเร็วคงที่ กราฟที่ได้จาก recorder ก็จะสามารถบอกให้ทราบว่ามีความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดการหักเหกระจงที่มุมต่างๆ เป็นอย่างไร



รูปที่ 3.25 วงจรของ ratemeter ที่ใช้ในการวัด

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับ ratemeter คือ ค่าคงที่ของเวลา ซึ่งในที่นี้คือ ค่า $R_c C_c$ ต้องเลือกค่าให้เหมาะสมกับลักษณะของสัญญาณ pulse ที่เข้ามา โดยมีค่าที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกดังนี้

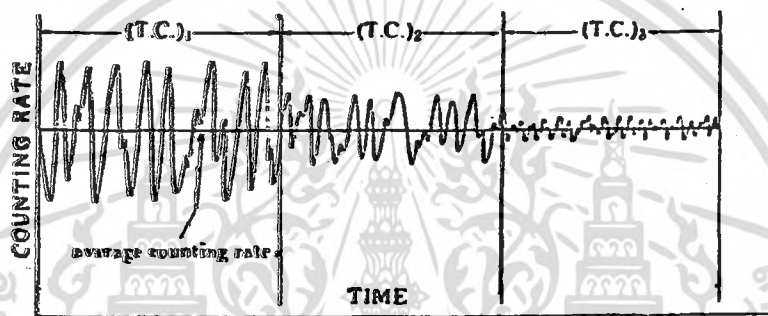
1. การกระเพื่อมของอัตราการนับ (fluctuation in counting rate) เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จะออกมาอย่างไม่ต่อเนื่อง หรือออกมาแบบสุ่ม (random) คือบางช่วงออกมาน้อย หรือไม่มีเลย แต่ในบางช่วงออกมามาก ดังนั้นถ้าค่าคงที่ของเวลามีค่าน้อยเกินไปก็จะทำให้เห็นการ

กระเพื่อมในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวน pulse มากดังในรูปที่ 3.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเปลี่ยนแปลงของอัตราการนับ (change of counting rate) โดยถ้าเราใช้ค่าคงที่ของเวลาที่มากเกินไปจะมีผลทำให้ไม่สามารถตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการนับที่เร็วมากๆ ได้ (เพราะช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมากๆ จะเป็นค่าใช้ในกาวิเคราะห์)

ในเครื่อง ratemeter ทั่วไปจะมีปุ่มที่ใช้ในการเลือกค่าคงที่ของเวลาอยู่ ด้วยเสมอซึ่งหลักในการค่าคงที่ของเวลา คือ จะให้ค่าคงที่ของเวลามีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวของความกว้างของสลิต



Effect of time constant (T.C.) on recorded fluctuations in counting rate constant x-ray intensity (schematic). Time constants changed abruptly at times show $(T.C.)_1 < (T.C.)_2 < (T.C.)_3$.

รูปที่ 3.26 ผลของค่าคงที่เวลากับการกระเพื่อมของอัตราการนับ เมื่อ $(T.C.)_1 < (T.C.)_2 < (T.C.)_3$

3.3.5 goniometer

อุปกรณ์ตัวนี้จะใช้สำหรับติดตั้งหัววัดรังสีเอกซ์ และสำหรับวางสารตัวอย่าง โดยจะมีช่องสำหรับเปิดรับรังสีเอกซ์ ซึ่งรังสีเอกซ์ที่เข้ามาจะผ่านสลิต และตัวกรองมาตกกระทบบนสารตัวอย่าง แล้วเกิดการหักเหระเจิงของรังสีเอกซ์ที่สามารถเลื่อนตำแหน่งของมุมที่ใช้ในการวัดได้ โดยจะมีตัวเลขที่บอกตำแหน่งของมุมของหัววัดในรูปของมุม 2θ ในการใช้งานนั้นสามารถที่จะให้หัววัดกวาดได้ทั้งเคาน์เตอร์เอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า และถอยหลัง (เพิ่มและลดมุม 2θ) และยังสามารถใช้ในลักษณะที่การเลื่อน
มของห้ววัดโดยการใช้นิ้วมือหมุน หรือให้ทำการกวาดมุมอย่างต่อเนื่องโดยการหมุน
ของมอเตอร์ ซึ่งสามารถตั้งอัตราการกวาดมุม และตั้งการกวาดมุมให้กวาดเฉพาะ
ในช่วงมุมที่ต้องการได้

3.3.6 X-Y Recorder

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลของสัญญาณไฟฟ้าที่เข้ามา โดยจะบันทึกใน
รูปของกราฟที่มีสองแกน คือ แกน X และ แกน Y ซึ่งสำหรับเครื่อง XRD แล้วมัก
จะให้แกนนึงเป็นแกนของเวลา และอีกแกนหนึ่ง จะเป็นสัญญาณที่แสดงถึง
ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์

สำหรับเครื่องที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้จะให้แกน X เป็นแกนของเวลา และ
แกน Y เป็นแกนของอัตรานับ (จำนวนพัลส์ต่อวินาที) โดยถ้าเรานำไปใช้งานร่วม
กับ goniometer ที่ตั้งมุมเริ่มต้น และตั้งให้ทำการกวาดมุมเป็นอย่างต่อเนื่อง ค่าใน
แกน X ก็จะทำให้สามารถบอกได้ว่าที่เวลานั้นๆ ตำแหน่งของมุมที่เรากำลังวัดมีค่า
เป็นเท่าไร ดังนั้นกราฟที่ได้ก็จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการหักเหระเจิง
(มุม 2θ) กับความเข้มของรังสีเอกซ์ ทำให้สามารถทราบว่าที่มุม 2θ นั้นๆ มีค่า
ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการหักเหระเจิงเป็นเท่าไร

3.3.7 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray generator) จะมีหน้าที่ในการสร้าง
และปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา โดยส่วนมากนี้จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage supply) จะมีหน้าที่ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับหลอดรังสีเอกซ์ ปกติจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 20 kV ถึง 60 kV ค่าศักย์ที่ใช้มีไว้ก็เพื่อทำให้เกิดสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะเร่งอนุภาคภายในหลอดรังสีเอกซ์ที่ถูกไอออไนซ์แล้ว วิ่งจากหัวคาโทดไปยังหัวแอโนด

2. ส่วนรักษาระดับกระแสคงที่ (current stabilizer) มีหน้าที่ในการรักษาระดับของกระแสที่ไหลผ่านหลอดรังสีเอกซ์ให้มีค่าคงที่ โดยอาศัยหลักการที่ว่า จะให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทานที่ทราบค่าแน่นอน แล้วนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้ มาใช้ในการควบคุมด้วยการป้อนกลับค่าแรงดันนี้ไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อเปรียบเทียบแรงดัน กับค่าแรงดันอ้างอิง ถ้ากระแสที่ไหลผ่านหลอดน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ วงจรเปรียบเทียบแรงดันนี้จะไปทำให้ค่า reactance ของตัวคอยล์ (ที่ใช้ควบคุมแรงดันคร่อมไส้หลอด) มีค่าน้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันคร่อมไส้หลอดมีค่ามากขึ้นเพื่อทำให้เกิดการจ่ายอิเล็กตรอนมากขึ้น หรือมีกระแสไหลผ่านหลอดมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้ามีกระแสไหลผ่านหลอดมากเกินไป ก็จะทำให้ค่า reactance ของคอยล์มีค่ามากขึ้น และแรงดันคร่อมไส้หลอดมีค่าน้อยลง

3. ส่วนรักษาระดับแรงดันคงที่ (voltage stabilizer) มีหน้าที่ในการควบคุมแรงดันคร่อมระหว่างหัวแอโนด และหัวคาโทดของหลอดรังสีเอกซ์ให้มีค่าคงที่ กาวทำงานคือจะใช้วงจรแบ่งแรงดันในการแบ่งแรงดันตกคร่อมหัวหลอด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงในวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ถ้าแรงดันที่เปรียบเทียบกันมีค่าต่างไปจากค่าที่ตั้งไว้ก็จะมีผลให้ค่า reactance ของคอยล์ที่ควบคุมแรงดัน และกระแสที่จ่ายให้กับตัวมอเตอร์ ที่ใช้หมุน variac (มีหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันคร่อมหัวหลอด) ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพื่อที่จะรักษาให้แรงดันคร่อมหัวหลอดมีค่าคงที่ตามที่ตั้งไว้

4. ส่วนสร้างแรงดันอ้างอิง (Stabilised rectifier) มีหน้าที่ในการสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปใช้ในวงจรอื่นๆ วงจรส่วนนี้จะสร้างจากวงจรพื้นฐานที่มี reference tube ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับซีเนอร์ไดโอด (zener diode) ที่จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งแรงดันอ้างอิงนี้จะถูกนำไปใช้ในวงจรเปรียบเทียบกับของส่วนรักษาระดับแรงดันคงที่ และส่วนรักษาระดับกระแสคงที่

5. ส่วนขยายกำลัง (Power amplifier) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (ที่ใช้หมุนตัว variac) ซึ่งส่วนนี้จะนำไปใช้ควบคุมการหมุนตัว variac เพื่อที่จะทำให้แรงดันคร่อมขั้วหลอดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ

6. ส่วนแปลงสัปดาห์ไฟฟ้า (Rectifier unit) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟ และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ส่วนขยายกำลังให้มีค่าคงที่

7. ส่วนตั้งเวลา (Timer) มีหน้าที่ในการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเปิดหรือปิดของซีลเตอร์ (ช่องที่ให้รังสีเอกซ์ออกมา) จะประกอบด้วย รีเลย์ และอุปกรณ์สำหรับตั้งเวลาที่ เป็นแบบกลไก

3.3.8 ระบบหล่อเย็น

ส่วนนี้จะ เป็นส่วนที่ทำความเย็นแก่หน้าที่จะนำมาหล่อเย็นให้แก่ เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ระบบนี้จะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่จะใช้ โดยอาศัยจากข้อมูลพื้นฐานที่เครื่องต้องการ เช่น อัตราการไหลของน้ำ (flow rate) อุณหภูมิที่ใช้งาน เป็นต้น เนื่องจากเครื่อง XRD ที่ใช้ในโครงการงานพิเศษนี้ ยังไม่มี จึงได้มีการออกแบบขึ้นใหม่โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

- ถังผสม (Mixing tank) เป็นถังที่ใช้สำหรับบรรจุน้ำที่นำไปใช้ในการหล่อเย็นให้แก่เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยได้ออกแบบสร้างจากข้อมูลของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า และไหลออก

- ปั๊ม (Pump) ได้เลือกจากค่าอัตราการไหลขั้นต่ำสุดที่เครื่องต้องการ (เป็นค่าอัตราการไหลที่น้อยที่สุดที่เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ต้องการ เพื่อทำให้ระบบวาล์วนิรภัยทำงาน) แล้วนำมาคำนวณว่าต้องใช้ปั๊มที่มีขนาดกำลังม้าเป็นเท่าไร ในงานนี้จะใช้ปั๊มทั้งหมด 2 ตัว สำหรับปั๊มน้ำเข้าไปในระบบทำความเย็นหนึ่งตัว ส่วนอีกตัวสำหรับปั๊มน้ำเข้าสู่เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

- Water chiller และ chiller unit. ส่วนนี้จะมีหน้าที่ในการทำความเย็นให้กับน้ำในถังผสมเพื่อให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ต้องการ ในการเลือกของส่วนนี้ จะเลือกจากปริมาณน้ำที่จะทำความเย็น และอัตราการไหลเข้าของน้ำ นำมาคำนวณค่าเพื่อเลือกขนาดของ water chiller และเลือกจำนวน BTU ของ chiller unit

บทที่ 4

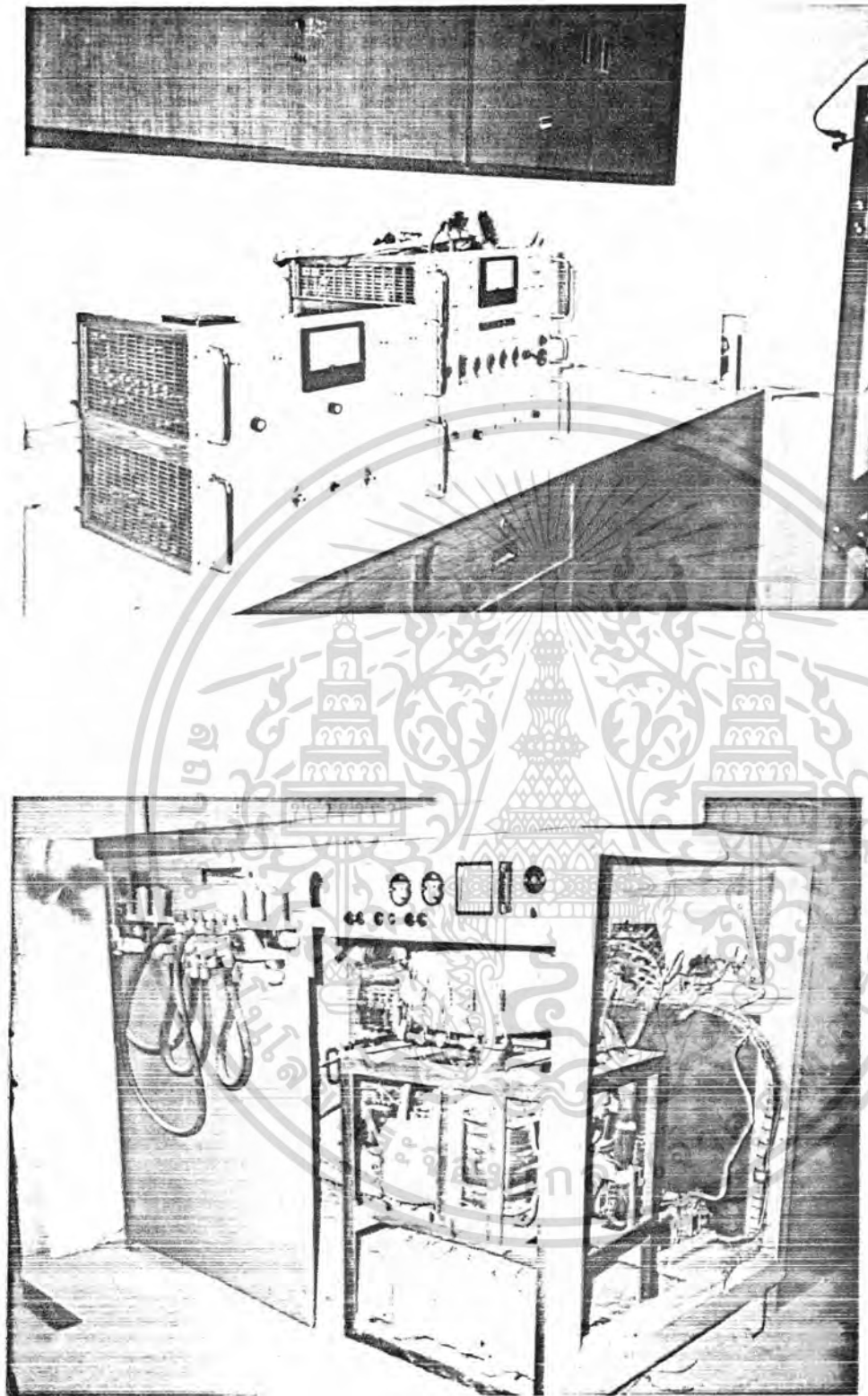
การทดลอง

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ได้ติดต่อขอรับเครื่อง XRD ที่ชำรุดใช้งานไม่ได้แล้ว จากสถาบัน และหน่วยงานอื่น ได้แก่ ส่วนวิจัยอุตสาหกรรมโลหะ และเซรามิก สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และกองวิเคราะห์ดิน กรมชลประทาน เป็นจำนวน 2 เครื่องโดยเครื่องแรกเป็นของบริษัท SIEMEN และ เครื่องที่สองเป็นของบริษัท PHILIPS ซึ่งเครื่องทั้งสองอยู่ระหว่างการรอการจำหน่ายเป็นครุภัณฑ์ที่ใช้การไม่ได้แล้ว เนื่องจากโครงการพิเศษนี้ได้สำรวจพบว่า เครื่อง XRD ดังกล่าว สามารถนำมาทำให้เกิดประโยชน์ในด้านการศึกษางานของเครื่องต่อไปได้ ถ้านำมาแก้ไขปรับปรุงบางส่วน ที่เสียหาย หรือขาดหายไป

จากการสำรวจ และตรวจสอบสภาพของเครื่อง XRD ที่ได้รับ เครื่อง XRD ของบริษัท SIEMEN (แสดงในรูปที่ 4.1) ได้ใช้งานมานานมากกว่า 20 ปี และ เครื่องได้ถูกทิ้งไว้เป็นเวลานาน จึงมีส่วนประกอบหลายส่วนที่ชำรุดใช้งานไม่ได้ และบางส่วนขาดหายไป การแก้ไขจึงทำได้ยาก นอกจากนั้นเป็นเครื่องรุ่นเก่า มากจึงไม่มีอะไหล่ให้เปลี่ยน ซึ่งจากสภาพของเครื่องพบว่าไม่สามารถนำมาแก้ไขให้ใช้งานได้อีก แต่ยังเป็นประโยชน์ในการศึกษาสำหรับเรียนรู้เทคโนโลยี การสร้างเครื่อง XRD การออกแบบโครงสร้าง และหลักการทำงาน นอกจากนั้นชิ้น ส่วนบางอย่างยังสามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ และดัดแปลงใช้กับเครื่องมืออื่น ๆ ได้ ส่วนเครื่อง XRD ของบริษัท PHILIPS (แสดงในรูปที่ 4.2) ยังอยู่ในสภาพที่สามารถนำมาใช้งานได้ มีชิ้นส่วนที่สำคัญๆ เกือบสมบูรณ์ และชิ้นส่วนบางอย่าง สามารถหาได้จากเครื่อง XRD ของบริษัท SIEMEN ดังนั้นจึงนำเครื่อง XRD ของบริษัท PHILIPS มาทำการซ่อมแก้ไขเพื่อใช้ในการศึกษาในโครงการพิเศษนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง -60- และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

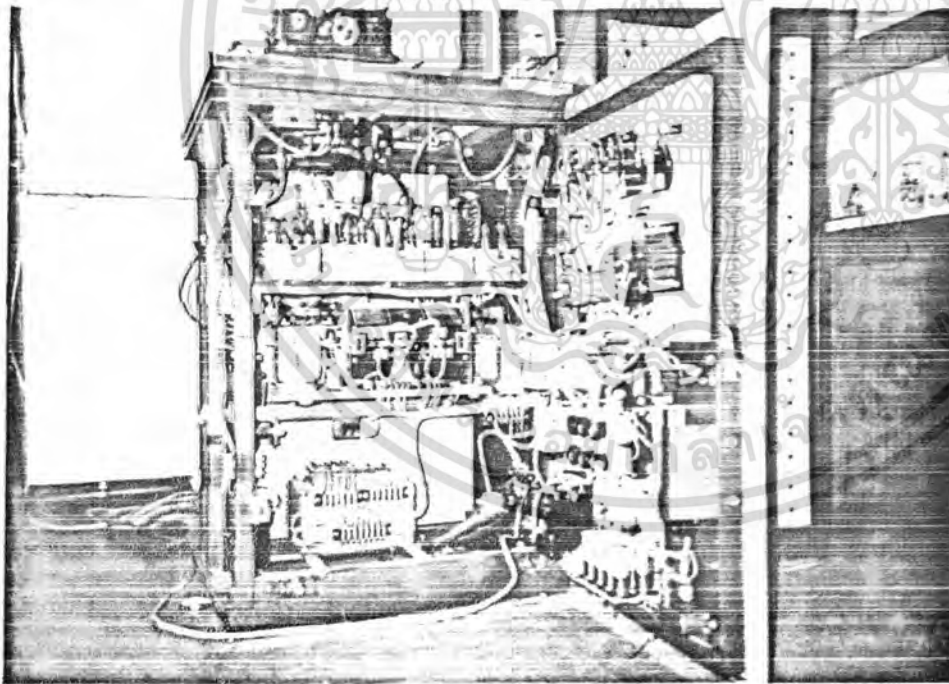
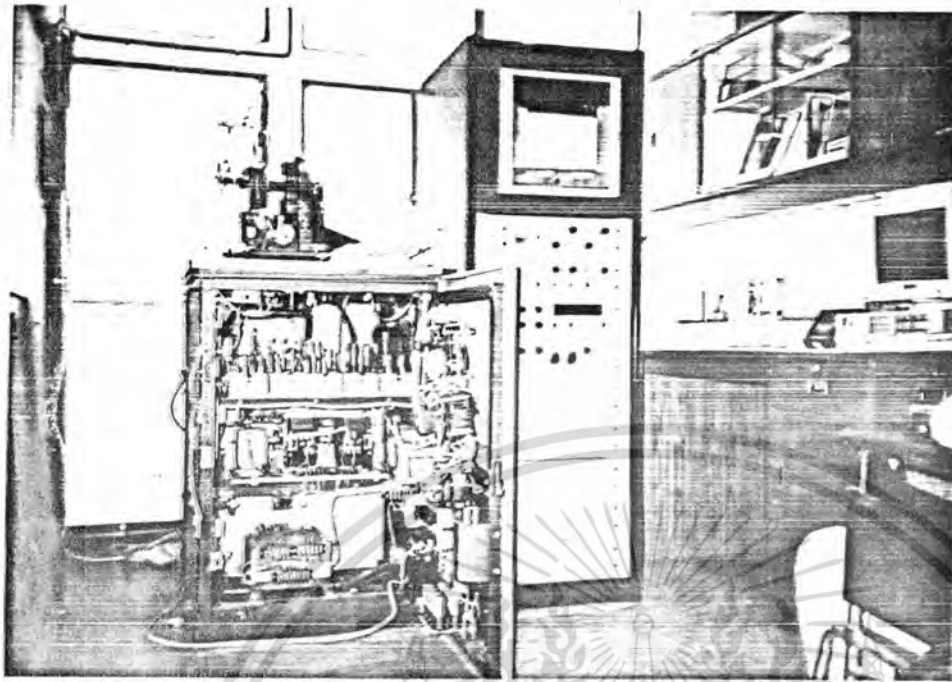


รูปที่ 4.1 เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกัตมิเตอร์ของ SIEMEN ได้รับจาก

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

สภาพส่วนต่างๆ ของเครื่องทั้งหมดทำงานไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เครื่องเอกซเว็คิฟแวกโทมิเตอร์ของ PHILIPS ได้มาจาก
 กรมชลประทาน สภาพทันสมัยต่างๆ ของเครื่องเกือบครบสมบูรณ์
 และมีบางส่วนที่ขาดหายไปซึ่งพอที่จะสร้างขึ้นมาใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

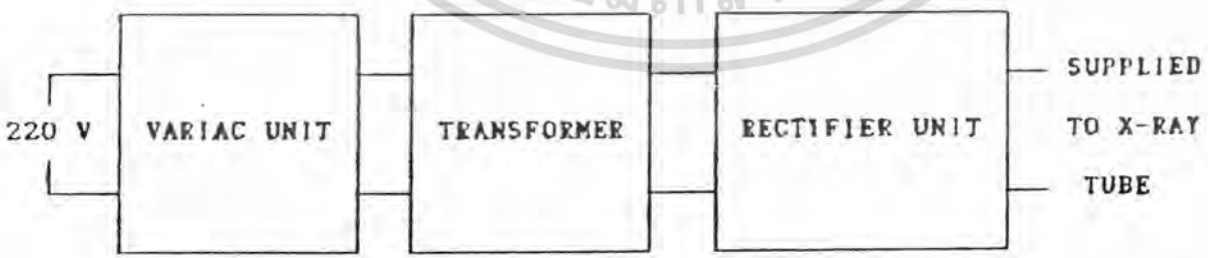
4.1 การตรวจสอบแก้ไขเครื่องเอกซเรย์คัลฟแพรทมิเตอร์

ในการตรวจสอบ และแก้ไขส่วนต่างๆ ของเครื่อง XRD แยกส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องซึ่งทำหน้าที่ต่างๆ กันออกมา แล้วนำมาตรวจสอบการทำงานของ แต่ละส่วน เพื่อศึกษา และเลือกวิธีการทดลอง และวิธีการทดสอบที่เหมาะสม

ส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญ และต้องทำการทดสอบ ได้แก่ High Voltage Source (60 KV) ,Tube Current Stabilizer, Stabilized Rectifier Unit, X-ray Detector ,Timer เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า มีบางส่วนที่หายไป และจำเป็นต้องสร้างขึ้นใหม่ ได้แก่ cooling system, sample holder เป็นต้น

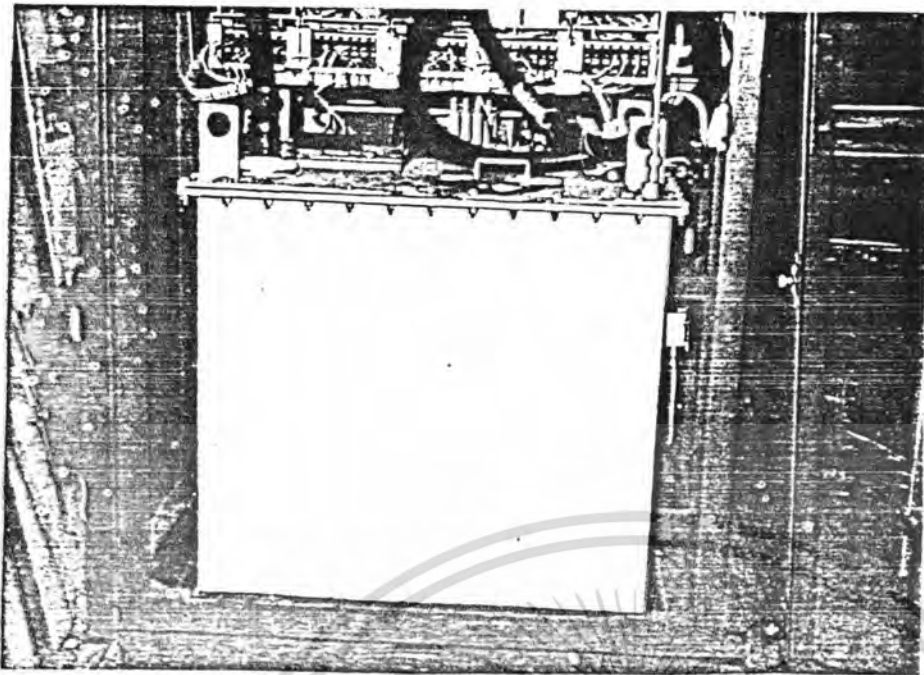
4.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (high voltage source) ประกอบด้วยหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้า และส่วนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะมีหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 60 KV เพื่อนำไปจ่ายให้แก่หลอดรังสีเอกซ์ การทดสอบการทำงานของ แหล่งจ่ายไฟนี้จะแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะนำไปใช้ในการทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของเครื่อง XRD ทั้งสองชุด (ดังแสดงในรูปที่ 4.4)

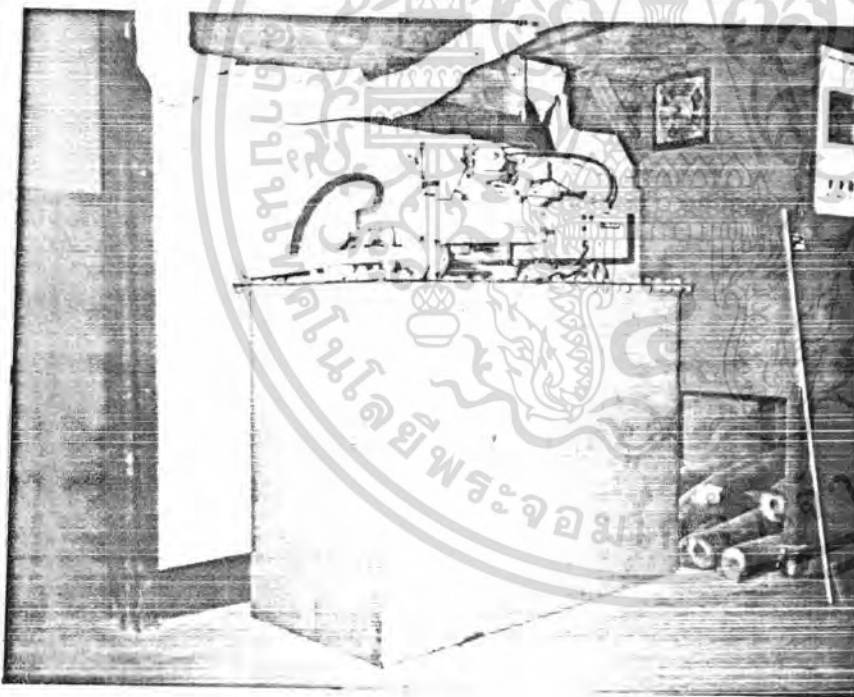


รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงสำหรับหลอดรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เครื่อง XRD ของบริษัท PHILIPS ยังทำงานได้



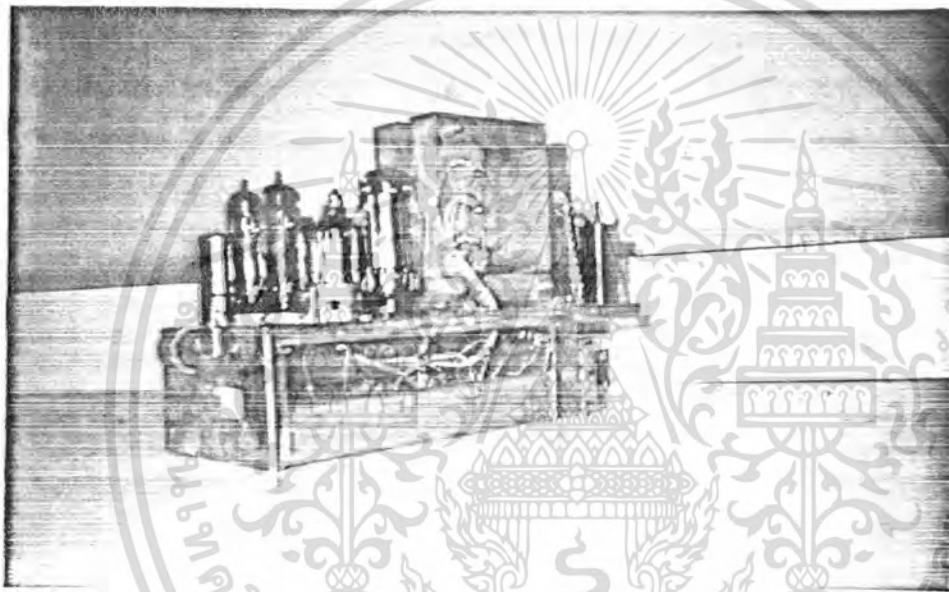
(ข) เครื่อง XRD ของบริษัท SIEMEN ใช้งานไม่ได้

รูปที่ 4.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับหลอดรังสีเอกซ์

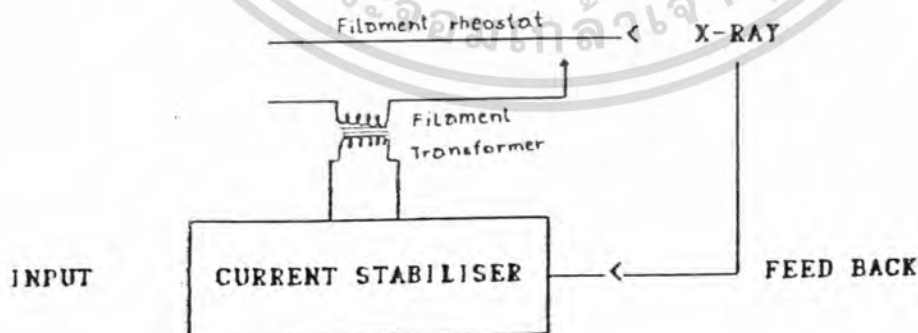
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่

ส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่ (Tube Current Stabilizer) ดังในรูปที่ 4.5 มีหน้าที่ในการควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหลอดรังสีเอกซ์ให้มีระดับคงที่ตลอดเวลา โดยที่สามารถควบคุม และเลือกขนาดของกระแสตามที่ต้องการได้ ซึ่งการทดสอบการทำงานของส่วนนี้สามารถทำการตรวจสอบตามวงจร ในรูปที่ 4.6 โดยเลือกใช้ load ที่มีความต้านทานใกล้เคียงกับความต้านทานของหลอดรังสีเอกซ์



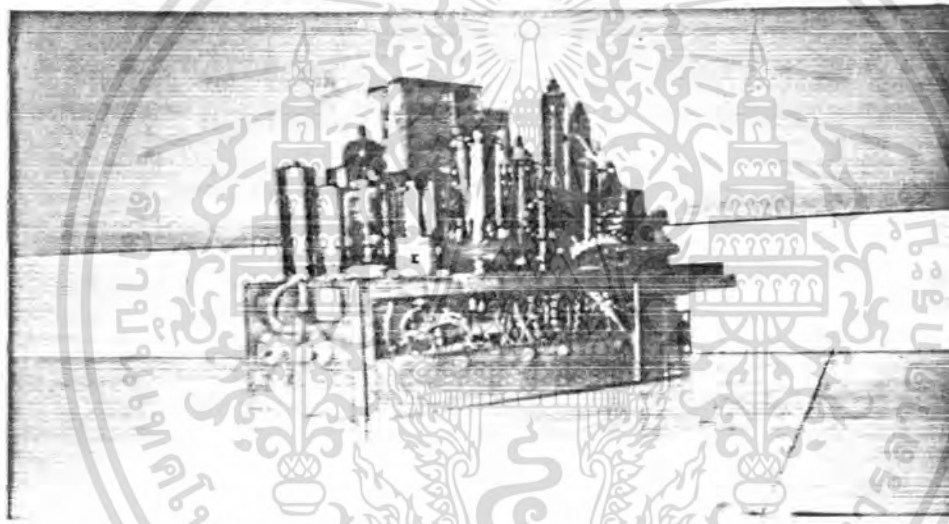
รูปที่ 4.5 ลักษณะของส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่



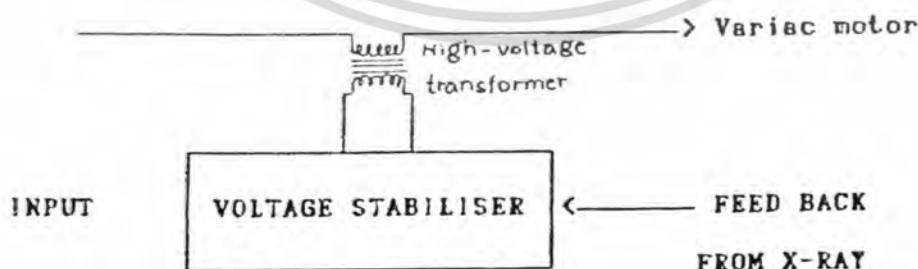
รูปที่ 4.6 การทดสอบการทำงานของส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่

ส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่ (Tube Voltage Stabilizer) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอดรังสีเอกซ์ให้มีค่าคงที่ โดยสามารถควบคุม และเลือกขนาดแรงดันตกคร่อมได้ตามความต้องการ โดยมีวงจรถอดสอบดังในรูป 4.8 ซึ่งในการทดสอบได้ใช้การสร้างสัญญาณย้อนกลับเทียม โดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่ปรับแรงดันได้ และสามารถวัดผลของสัญญาณที่ควบคุมได้



รูปที่ 4.7 ลักษณะของส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่



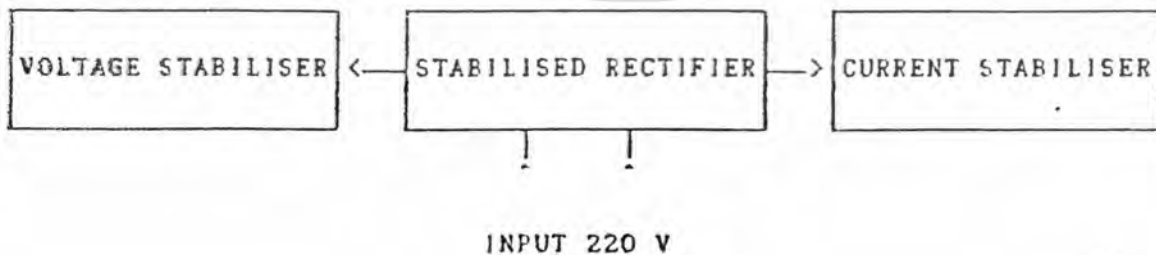
รูปที่ 4.8 การทดสอบการทำงานของส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่

ส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่ (Stabilised Rectifier) ดังในรูปที่ 4.9 ทำหน้าที่จ่ายไฟให้แก่ส่วนรักษาระดับกระแส และส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่ (หัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3) ในส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่นี้ จะเป็นแหล่งจ่ายไฟ และสร้างแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรทั้งสองส่วนข้างต้น สำหรับการทดสอบทำได้โดยการป้อน Input ให้แก่ส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่ แล้ววัดผลของ Output ที่ได้จากส่วนรักษาระดับแรงดัน และส่วนรักษาระดับกระแสให้คงที่ ดังในรูปที่ 4.10



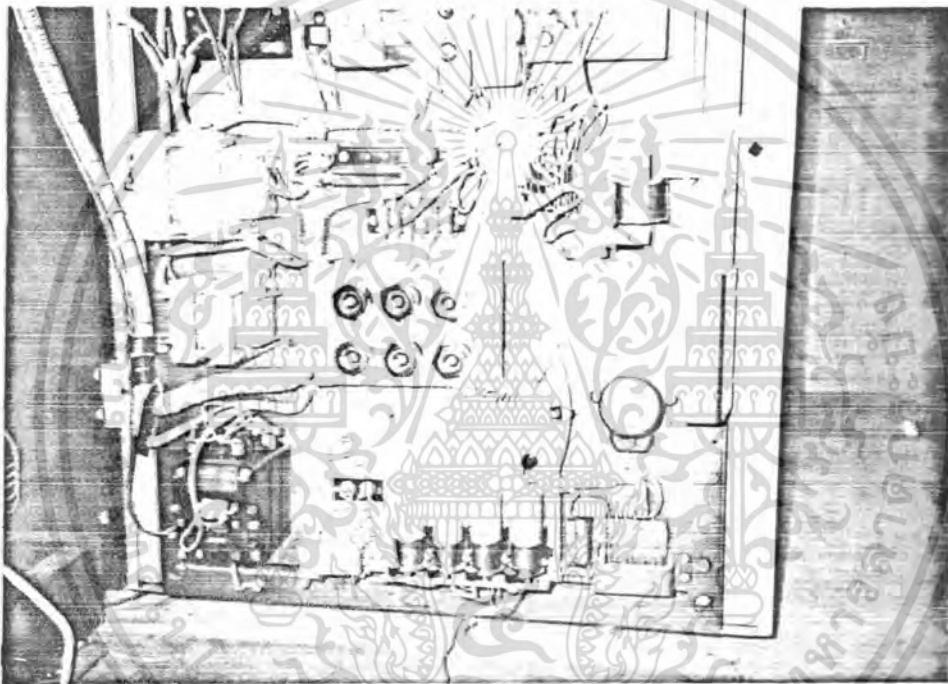
รูปที่ 4.9 ลักษณะของส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่



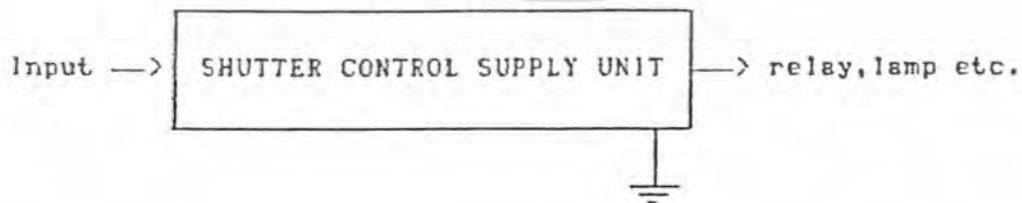
รูปที่ 4.10 การทดสอบการทำงานของส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงให้คงที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.5 หน่วยควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า

หน่วยควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Shutter Control Supply Unit) ดังรูปที่ 4.11 ส่วนนี้จะเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับแผงควบคุมการทำงานของระบบ หลอดไฟ และสวิตช์รีเลย์ต่างๆ ในการทดสอบจะทำได้ในรูปที่ 4.12 โดยการจ่าย Input ให้กับหน่วยควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า แล้ววัด Output ที่อุปกรณ์ต่างๆ



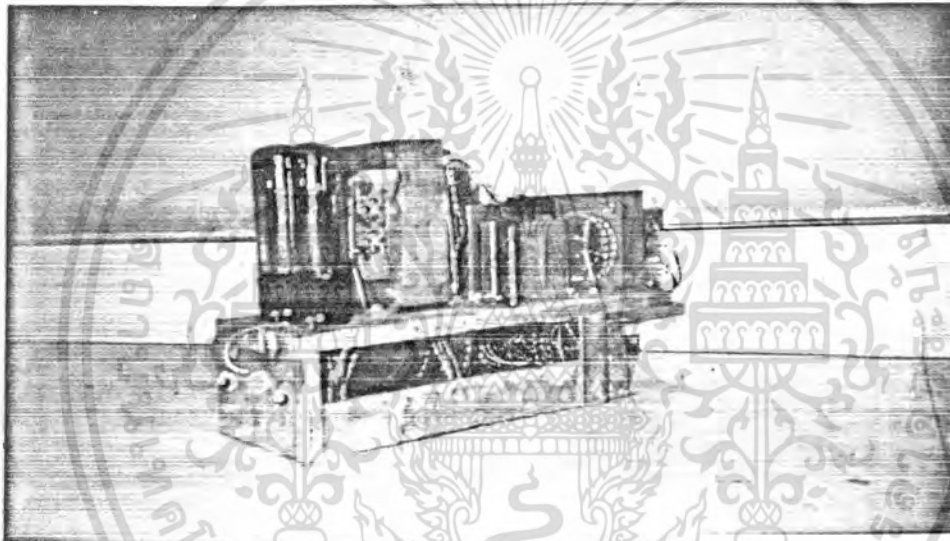
รูปที่ 4.11 ลักษณะของส่วนควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า



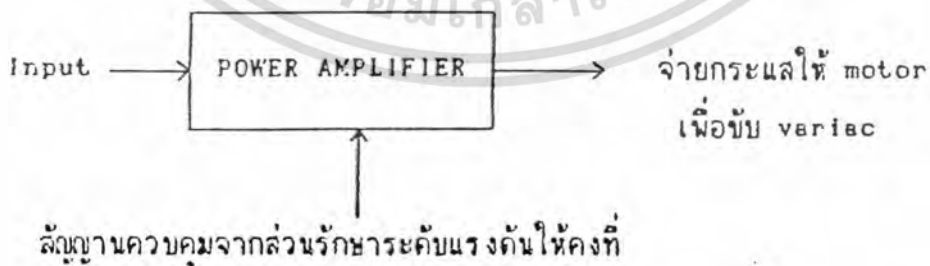
รูปที่ 4.12 การทดสอบการทำงานของส่วนควบคุมการปิดเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ส่วนขยายกำลัง

ส่วนขยายกำลัง (Power Amplifier) ดังในรูปที่ 4.13 ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแส และแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ที่ใช้ในการหมุนเพื่อการปรับค่าความต้านทานของ Variac Unit การทดสอบทำได้ดังรูปที่ 4.14 โดยการตัดแปลงนำเอาสัญญาณควบคุมจากส่วนรักษาระดับแรงดันให้คงที่ (หัวข้อที่ 4.1.2) และป้อน Input เข้าไปแล้ววัด Output จากส่วนขยายกำลัง เพื่อตรวจสอบการทำงานของส่วนขยายกำลัง



รูปที่ 4.13 ลักษณะของส่วนขยายกำลัง

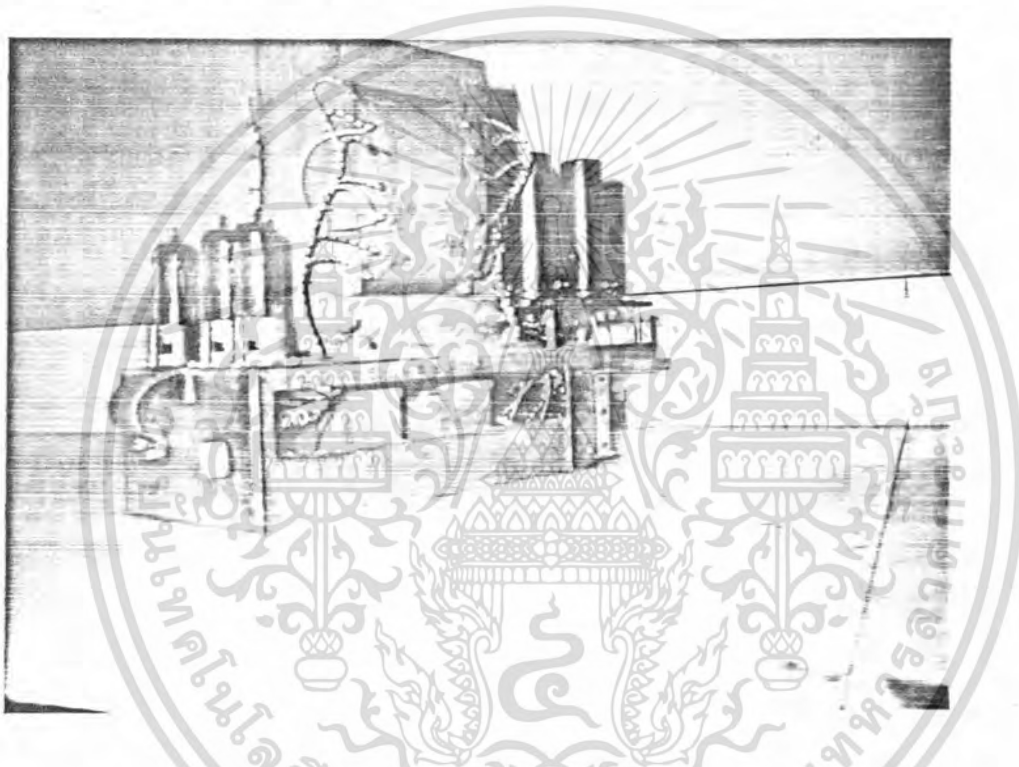


รูปที่ 4.14 การทดสอบการทำงานของส่วนขยายกำลัง

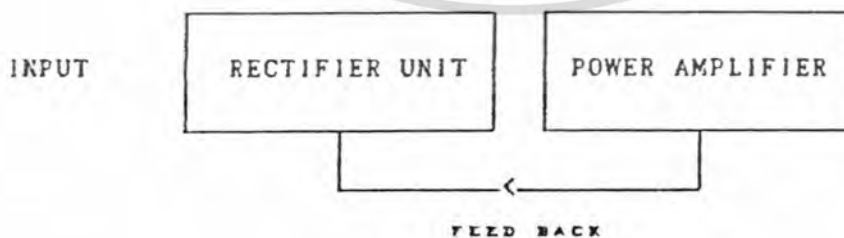
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 ส่วนแปลงศักดาไฟฟ้า

ส่วนแปลงศักดาไฟฟ้า (Rectifier Unit) ดังรูปที่ 4.15 ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้า และรักษาระดับให้กับส่วนขยายกำลัง(หัวข้อ 4.1.6) ในรูปที่ 4.16 เป็นการทำงานของส่วนแปลงศักดาไฟฟ้า ซึ่งการทดสอบจะทำได้โดยการป้อน Input แล้วตรวจวัด Output ที่ได้



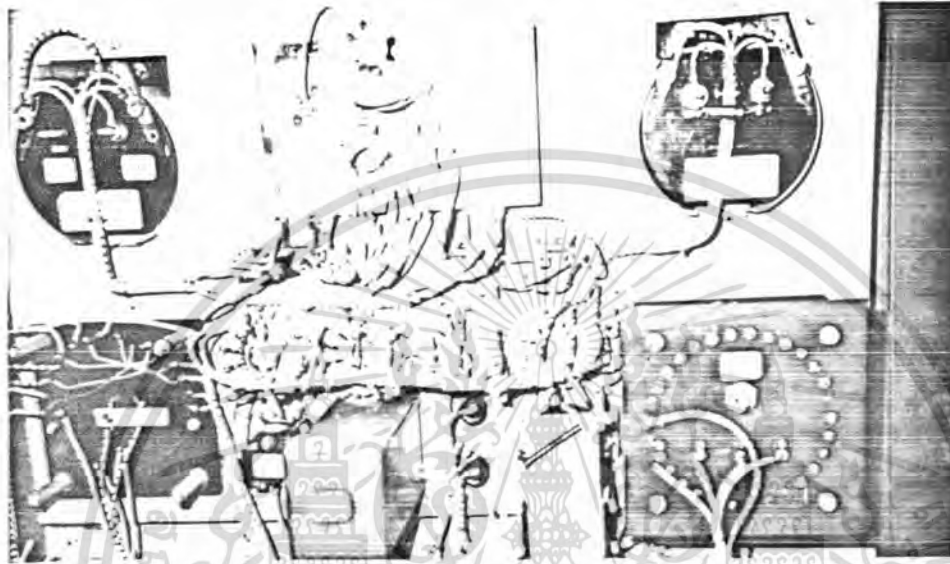
รูปที่ 4.15 ลักษณะของส่วนแปลงศักดาไฟฟ้า



รูปที่ 4.16 การทดสอบการทำงานของส่วนแปลงศักดาไฟฟ้า เอกสารนี้เช่นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง 70% และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 ส่วนตั้งเวลา

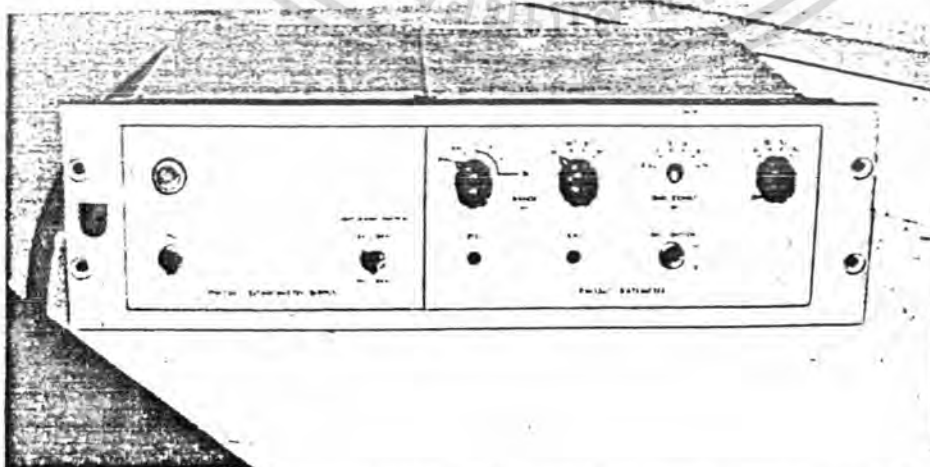
ส่วนตั้งเวลา (Timer) ดังรูปที่ 4.17 ทำหน้าที่ควบคุมการปิดเปิด ชุดเตอร์ตามฟังก์ชันเวลาที่กำหนดให้ ซึ่งประกอบด้วยรีเลย์ และอุปกรณ์สำหรับตั้งเวลาเชิงกล สำหรับการทดสอบจะพิจารณาการปิดเปิดของส่วนต่างๆ ตามเวลาที่ตั้งไว้



รูปที่ 4.17 ลักษณะของส่วนตั้งเวลา

4.1.9 แหล่งจ่ายไฟและตัวควบคุมของ Goniometer

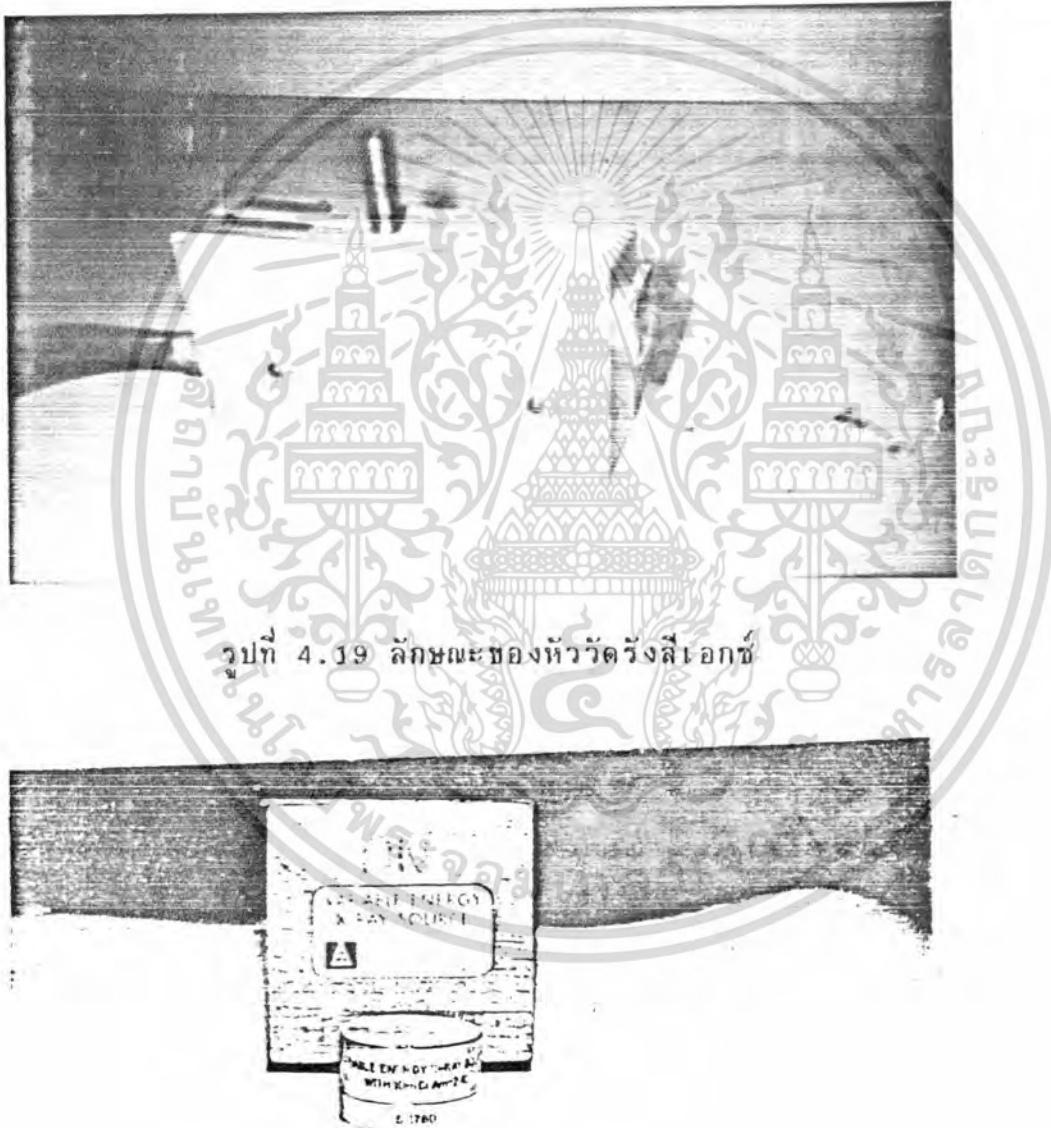
ส่วนนี้จะ เป็นแหล่งจ่ายไฟให้ Goniometer และเป็นตัวควบคุมอัตราการทำงานของ Goniometer การตรวจสอบหน้าที่การทำงานทำได้โดยการป้อนแหล่งจ่ายไฟแล้วทดสอบการทำงานของทุกส่วน ลักษณะอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและตัวควบคุม Goniometer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปล 71 หน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.10 หัววัดรังสีเอกซ์

ส่วนหัววัดรังสีเอกซ์ (X-ray Detector) แสดงในรูปที่ 4.19 ทำหน้าที่วัดรังสีเอกซ์ โดยเปลี่ยนสัญญาณจากพลังงานของรังสีเอกซ์ไปเป็นสัญญาณพัลส์ของกระแส ในการทดสอบโดยการตรวจสอบสัญญาณที่ได้จาก Co-source มาตรฐาน S1780 (รูปที่ 4.20) ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ



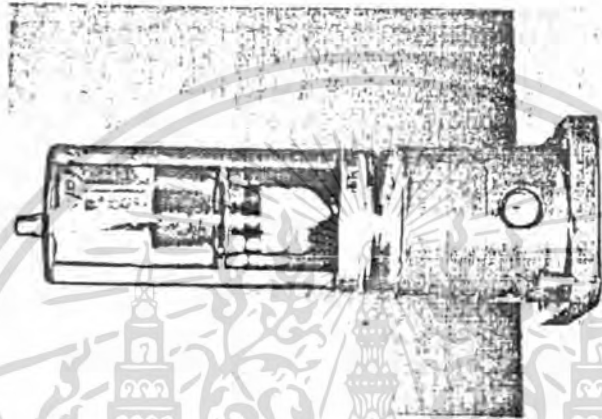
รูปที่ 4.19 ลักษณะของหัววัดรังสีเอกซ์

รูปที่ 4.20 Source มาตรฐาน S1780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.11 หลอดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray Tube) ที่อยู่ในเครื่อง XRD ของบริษัท PHILIPS เป็นหลอดชนิด Cu-Tube (ดังในรูปที่ 4.21) ได้ทดสอบการทำงานโดยการจ่ายพลังงานได้ และวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นด้วยตัวหัววัดรังสีเอกซ์ โดยหลอดรังสีเอกซ์นี้จะให้พลังงานที่ความยาวคลื่น 154.1 pm (0.1541 Å)



รูปที่ 4.21 หลอดรังสีเอกซ์ชนิด Cu-tube

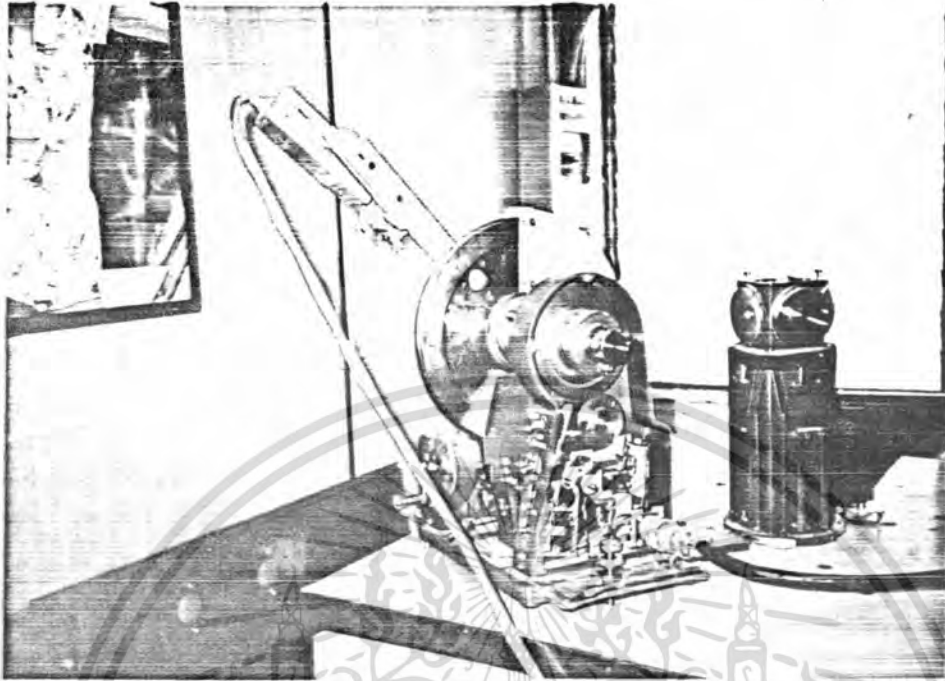
4.1.12 Goniometer

Goniometer ของเครื่อง XRD ที่ได้รับมามีสองแบบ คือ ของบริษัท PHILIPS จะเป็นแบบ Vertical goniometer ดังรูปที่ 4.22(a) จะมีการหมุนในแนวตั้ง และของบริษัท SIEMEN จะเป็นแบบ Horizontal goniometer ดังในรูปที่ 4.22(b) จะมีการหมุนในแนวนอน ในการทดสอบจะอาศัยการตรวจสอบการทำงานโดยการติดตั้ง และทำงานร่วมกับส่วนควบคุม เมื่อมีการปรับตั้งค่าต่างๆ ที่ทำให้มีการหมุนด้วยอัตราเร็ว และมุมต่างๆ กันแล้วจะมีผลการตอบสนองตามที่ใช้ค่าสิ่งต่างๆ หรือไม่ จึงทำให้สามารถตรวจสอบการทำงานของเครื่องได้จากสภาพของ Goniometer ในรูปที่ 4.22 จะพบว่า Goniometer ของบริษัท SIEMEN ไม่สามารถแก้ไขให้ทำงานได้อีกแล้ว ในการทดลองจึงได้เลือกใช้เครื่องของบริษัท SIEMEN ไม่สามารถแก้ไขให้ทำงานได้อีกแล้ว ในการทดลองจึงได้เลือก

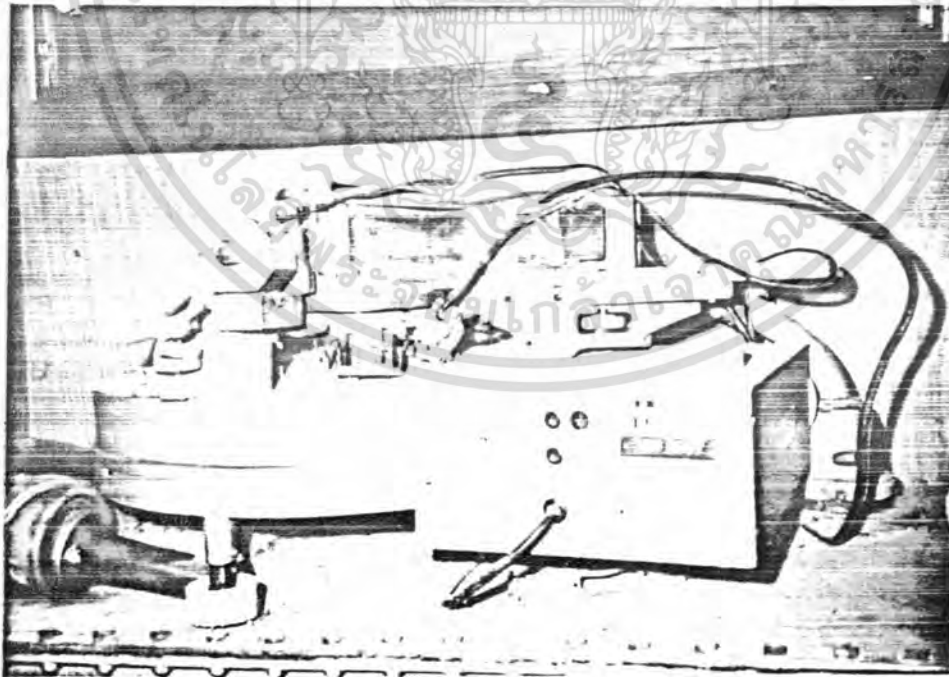
ใช้เครื่องของบริษัท PHILIPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง 73 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 Goniometer ของเครื่อง XRD



(ก)แบบ Vertical ของบริษัท PHILIPS



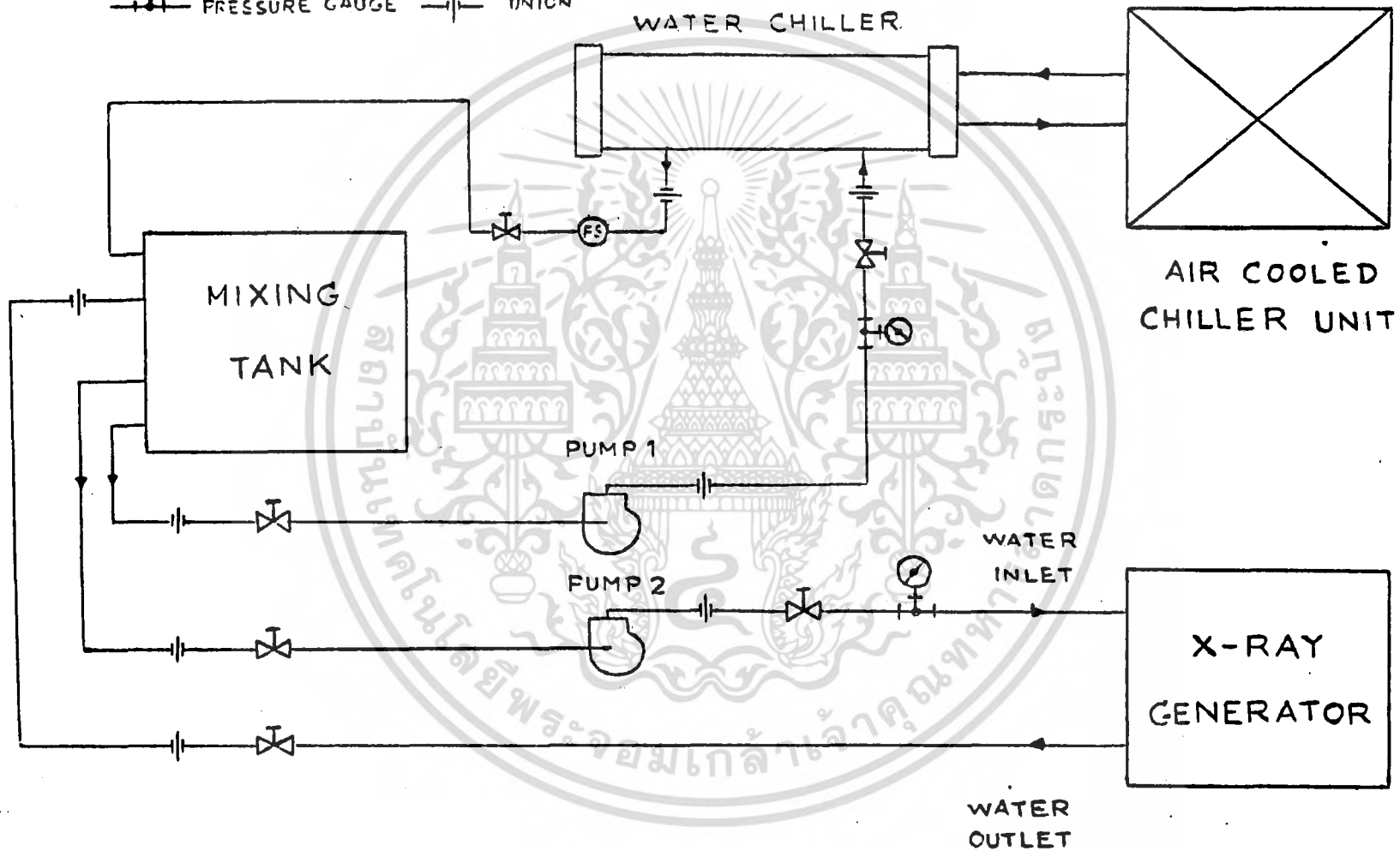
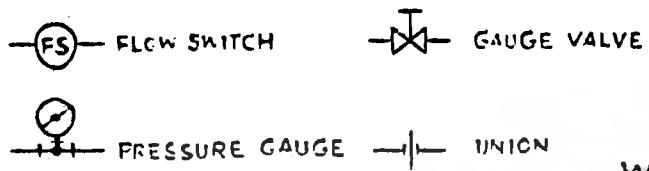
เอกสารนี้เป็นเอกสาร (ก)แบบ Horizontal ของบริษัท SIEMEN
เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชนที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.13 ระบบหล่อเย็น

ระบบหล่อเย็น (Cooling System) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในหลอดรังสีเอกซ์ และในแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนด เนื่องจากระบบนี้เป็นส่วนที่ขาดหายไปต้องสร้างชิ้นใหม่ แต่ราคาของระบบหล่อเย็นสำหรับเครื่อง XRD ที่สั่งทำในประเทศ มีราคาตั้งแต่ แสนกว่าบาทขึ้นไป ส่วนราคาของต่างประเทศประมาณ 2 แสนบาทขึ้นไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างเอง และสั่งซื้อแต่ส่วนที่จำเป็น โครงสร้าง และส่วนประกอบสำคัญของระบบหล่อเย็นที่ได้ออกแบบเพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำที่จะไปหล่อเย็น หลอดรังสีเอกซ์ ประมาณ $-18-20^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.23 ส่วนแผนผังของระบบหล่อเย็นที่สร้างในรูปที่ 4.24 (รายละเอียดในภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4-23 ระบบหล่อเย็นที่สร้างขึ้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แผงวงจรระบบหล่อเย็น

4.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกโตมิเตอร์

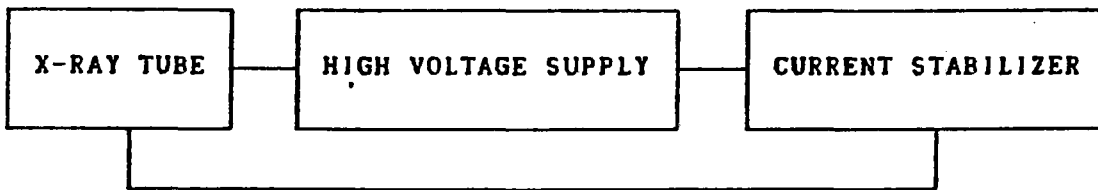
หลังจากการตรวจสอบ และการทดสอบการทำงานของส่วนต่างๆ ของเครื่อง XRD ในหัวข้อ 4.1 ได้ทำการประกอบส่วนต่างๆ เหล่านั้นเข้ากลับที่เดิม รวมทั้งส่วนที่แก้ไขเพิ่มเติม และสร้างชิ้นใหม่สำหรับส่วนที่ขาดหายไป รายละเอียดขั้นตอนการตรวจสอบ และประกอบเครื่องอยู่ในภาคผนวก ข.

สำหรับการทดสอบการทำงานของเครื่อง XRD ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังในแผนผังรูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) การตรวจระบบหล่อเย็นสำหรับหลอดรังสีเอกซ์
- (2) จ่ายกระแสไฟฟ้า เปิดเครื่องทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้หลอดรังสีเอกซ์ตามแผนผังรูปที่ 4.25
- (3) ตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากหลอดรังสีเอกซ์ด้วยหัววัดรังสีเอกซ์ และวัดความเข้มเพื่อทดสอบการทำงานของหัววัดรังสีเอกซ์ ตามแผนผังรูปที่ 4.26
- (4) ตรวจสอบการทำงานของ Goniometer เมื่อใช้คำสั่งในการตั้งค่ามุมที่จะหมุนต่างๆกัน ตามแผนผังรูปที่ 4.27
- (5) วัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อใส่ Slit และตัวกรองชนิดต่างๆ ปรับให้ค่าความเข้มให้ได้มากที่สุด ณ ที่มุม θ มีค่าเท่ากับ 0
- (6) เตรียมตัวอย่างสารที่ใช้เป็นมาตรฐานในการตรวจวัดค่า θ ที่ถูกต้อง ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้ผง Silicon (Si) บริสุทธิ์ ซึ่งจะให้ Peak ที่ค่า θ ประมาณ 28.44° ของรังสีเอกซ์ จาก Cu-Tube ($\lambda = 1.541 \text{ \AA}$)
- (7) โดยการปรับเทียบด้วยผง Si ปรับ Goniometer เพื่อทำให้ Peak เกิด ณ ค่า $\theta = 28.44^\circ$

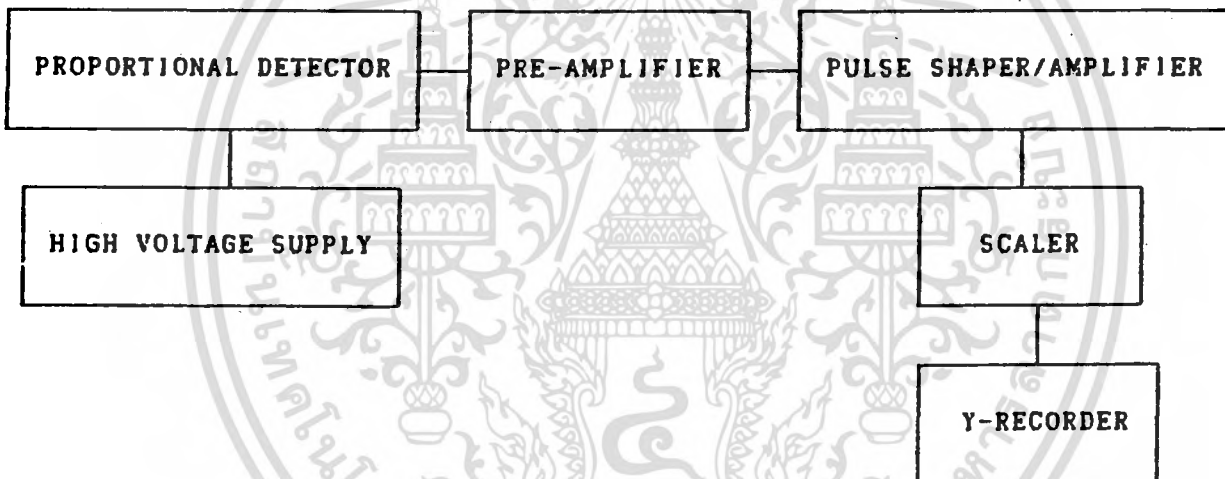
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X-ray generator



รูปที่ 4.25 แผนผังการทำงานของส่วนกำเนิดรังสีเอกซ์

X-ray detector



รูปที่ 4.26 แผนผังการทำงานของหัววัดรังสีเอกซ์

Goniometer



รูปที่ 4.27 แผนผังการทำงานของ Goniometer และส่วนควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก-78-เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ผลการทำงานของส่วนประกอบของเครื่อง X-RAY DIFFRATOMETER

ผลจากการตรวจสอบชิ้นส่วน และอุปกรณ์ภายในเครื่อง XRD ทั้งสองเครื่องที่ได้รับบริจาคมา (สรุปไว้ในตารางที่ 5.1) พบว่า สภาพของทั้งสองเครื่องไม่สามารถทำงานได้ โดยเฉพาะเครื่องของบริษัท SIEMEN ซึ่งทรุดโทรมมาก และอุปกรณ์ส่วนใหญ่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ สำหรับเครื่องของบริษัท PHILIPS อุปกรณ์ส่วนใหญ่ยังอยู่ในสภาพที่ดีอยู่ มีบางส่วนที่ต้องซ่อมแซมแก้ไข และบางส่วนต้องสร้างเพิ่มเติม จึงจะทำให้เครื่องนี้สามารถนำมาใช้งานได้อีก แต่การตรวจสอบต้องอาศัยเวลามาก เพราะเป็นเครื่องที่มีความซับซ้อน และถูกทิ้งไว้นานมาก ทำให้เกิดการอุดตันของท่อน้ำที่ใช้หล่อเย็นหลอดรังสีเอกซ์ และส่วนของภาคควบคุมกระแสหลอดไม่ทำงานต้องแก้ไขเพิ่มเติม อีกทั้งในส่วน Amplifier/Analyser ที่เป็นส่วนหนึ่งของ Ratemeter ก็มีอุปกรณ์ภายในบางส่วนเสียหาย ซึ่งสามารถซ่อมจนพอใช้ได้ ซึ่งสรุปแล้วส่วนใหญ่สามารถทำงานได้ เหลือแต่เพียงภาคกำเนิดรังสีเอกซ์โดยตรง คือ หลอดรังสีเอกซ์เอง ซึ่งได้ส่งไปทำการตรวจสอบที่บริษัท PHILIPS ทางบริษัทได้แจ้งกลับมาว่าหลอดเสื่อมสภาพใช้งานไม่ได้

ตารางที่ 5.1 ผลการตรวจสอบการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRD

รายการอุปกรณ์	PHILIPS	SIEMEN	หมายเหตุ
1.High Voltage Source	/	xx	
2.Tube Voltage Stabilizer	/	xx	
3.Tube current Stabilizer	x	xx	
4.Stabilized Rectifier	/	xx	
5.Shutter Control Supply	/	xx	
6.Power Amplifier	/	xx	
7.Rectifier Unit	/	xx	
8.Timer	/	-	
9.X-ray Detector	/	-	
10.Goniometer	x	xx	
11.Cooling System	-	-	สร้างชุดใหม่
12.Recorder	/	-	
13.Sample Holder	x	-	ซ่อมแซมบางส่วน
14.X-ray Tube	xx	xx	
15.Ratemeter	x	xx	

หมายเหตุ / ใช้งานได้ x ซ่อมแซมได้ xx ซ่อมแซมไม่ได้ - ขาดหายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. R. Jenkins and J.R. De Vries ,Practical X-ray Spectrometry
John Wiley&Sons ,New York,1982,pp.1-69
2. Harold P.K and Leloy E.A.,X-ray diffraction Procederes,
For Polycrystalline and Amorphous Materials,
John Wiley&Son Inc.USA 1954,p.966

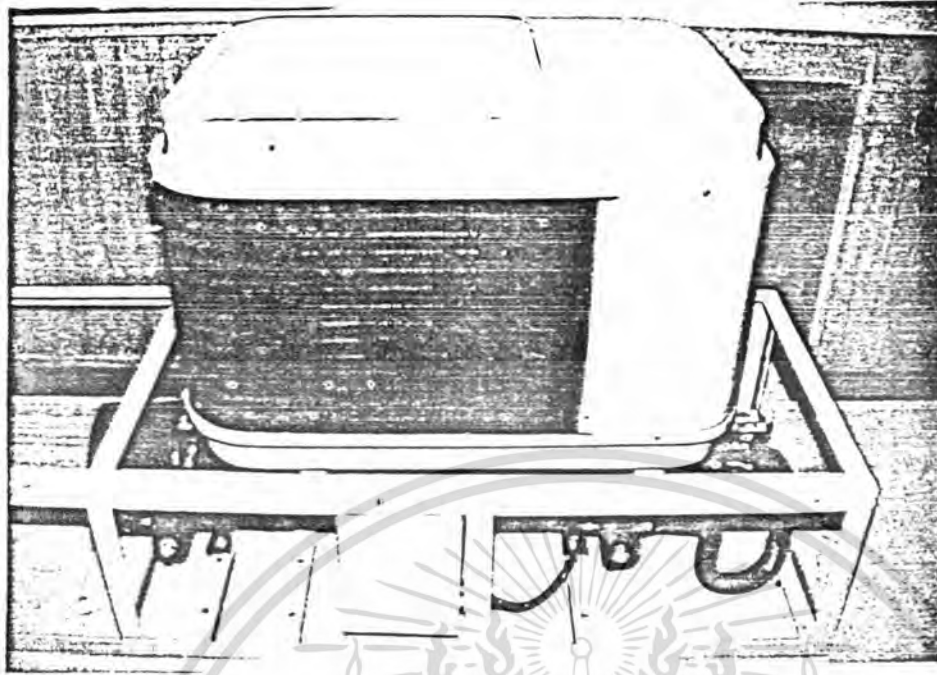


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การติดตั้งระบบหล่อเย็นของหลอดรังสีเอกซ์

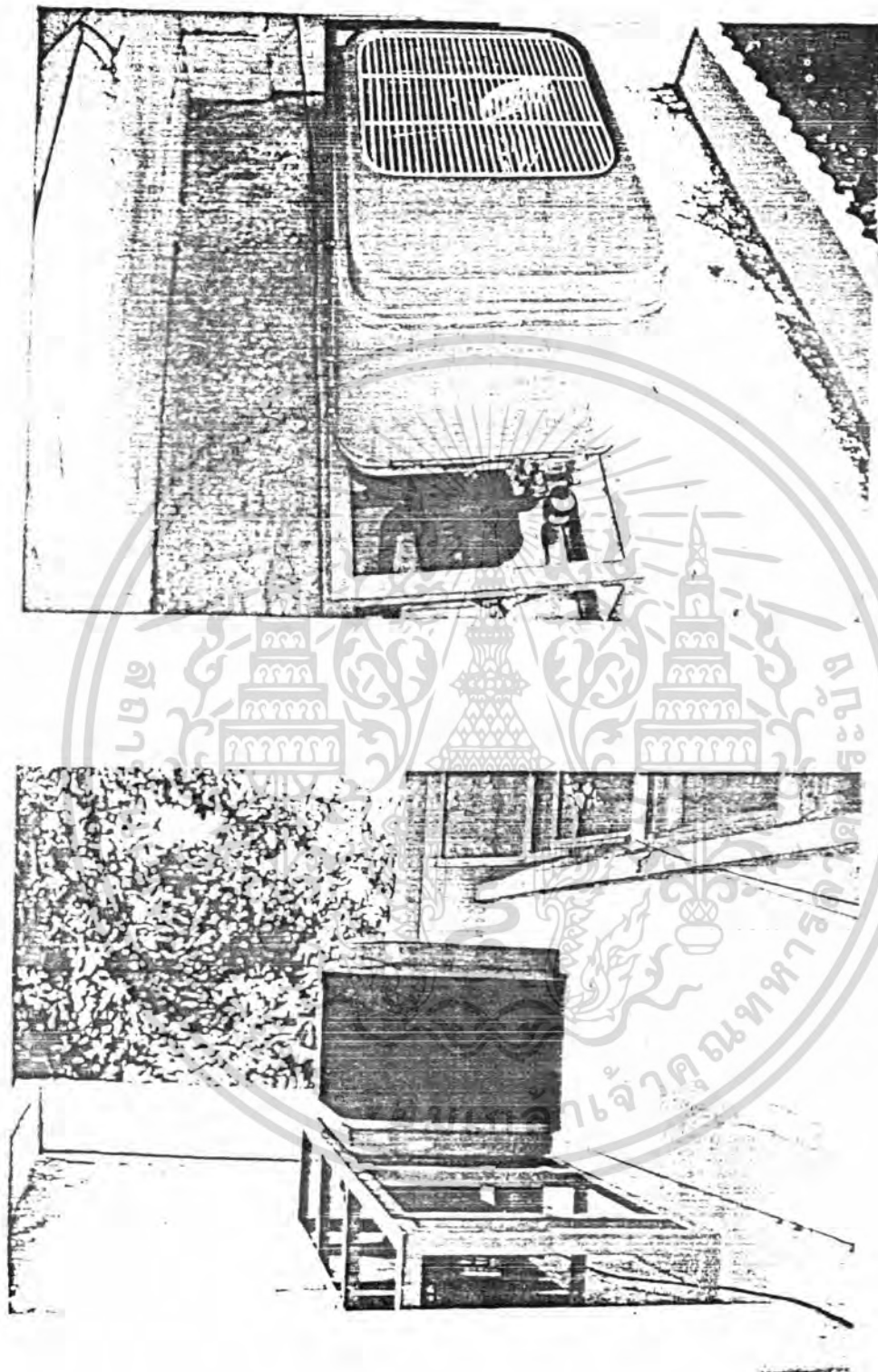




รูปที่ ก. 1 ระบบทาคความชื้นที่ได้ออกแบบและสร้างเพื่อทำให้น้ำที่ใช้หล่อเย็น

มีอุณหภูมิ 18-20 c

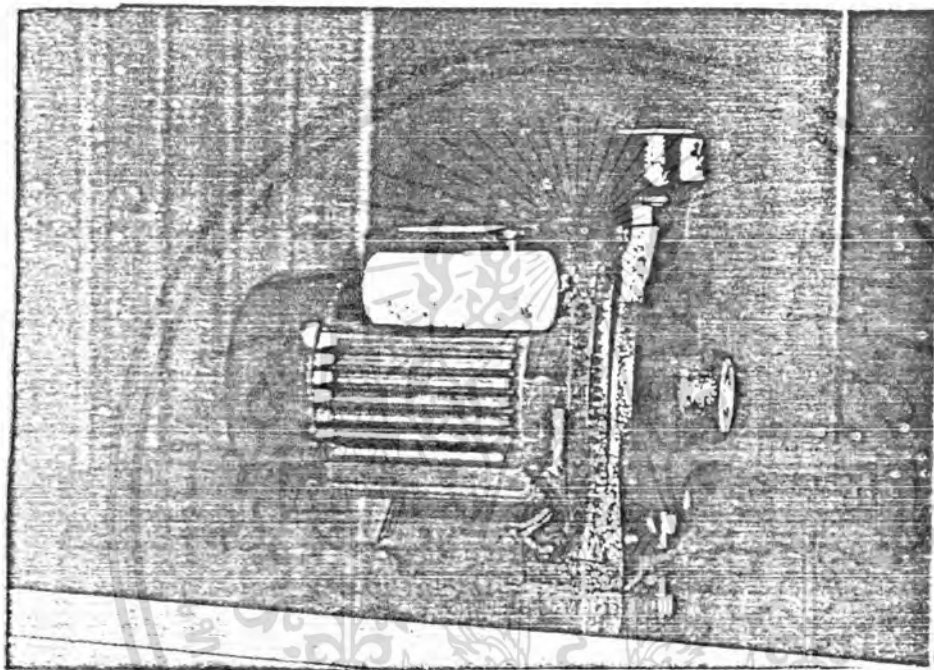
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 การติดตั้งระบบทาความเย็นที่บริเวณภายนอกอาคาร

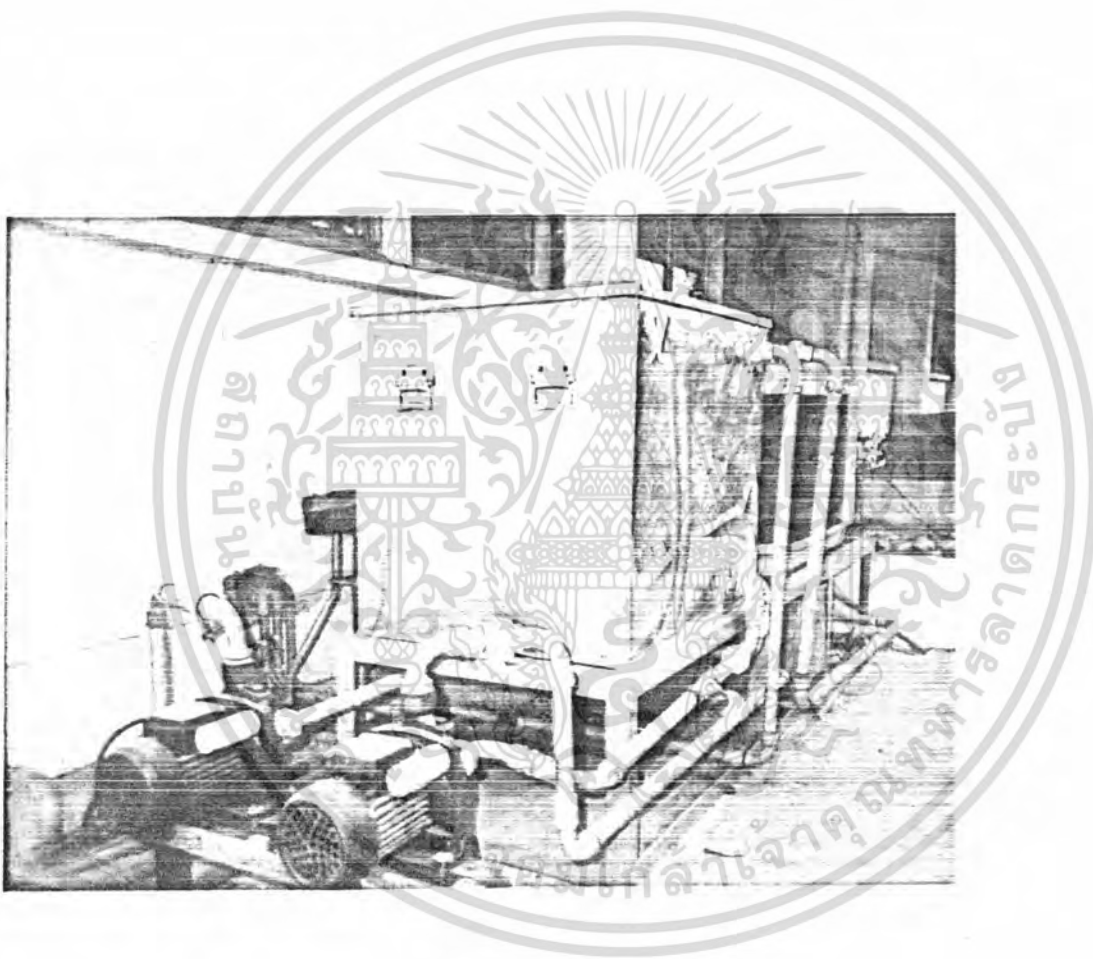
เพื่อให้สะดวกในการระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



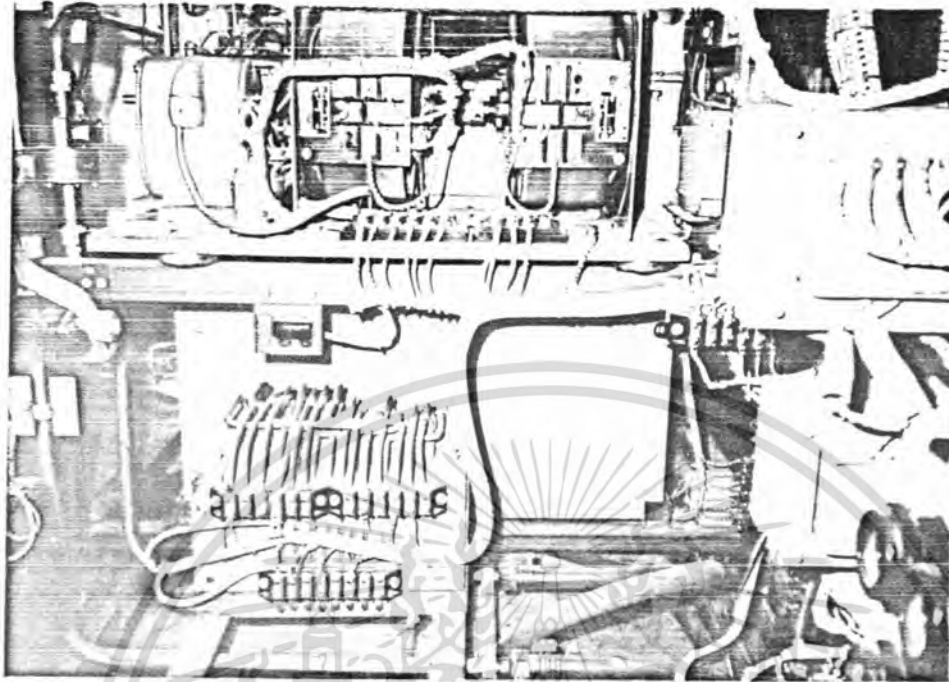
รูปที่ ก.3 ปีม้า สำหรับใช้ในถาวรหล่อเย็นเครื่อง XRD
วัดผล เป็นระบบน้ำหนัก เวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

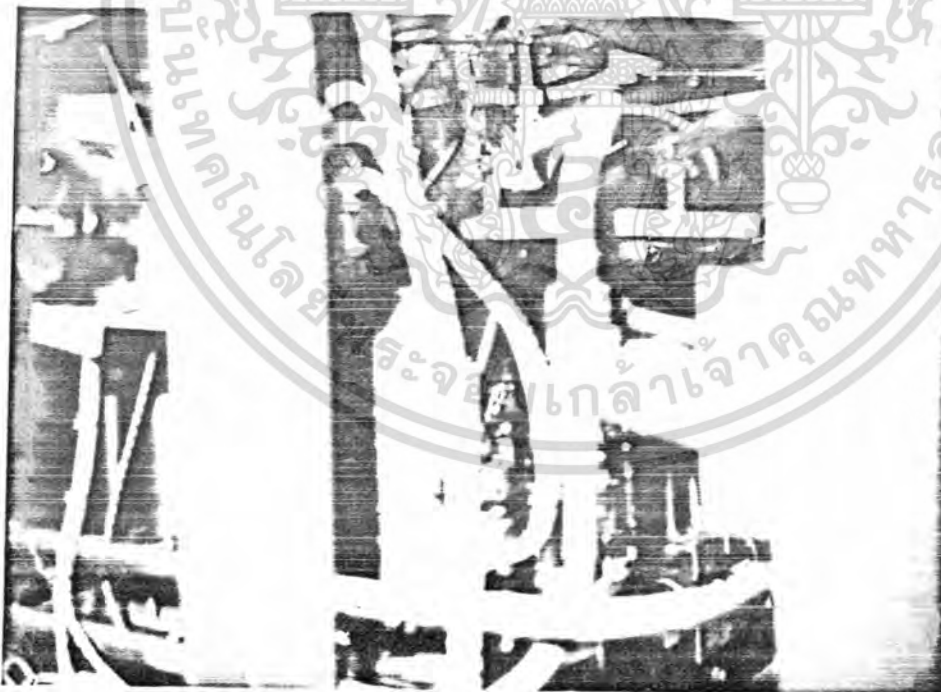


รูปที่ ก.4 การติดตั้งและระบบที่สมบูรณ์ของระบบหล่อเย็นสำหรับเครื่อง XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 86 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระบบหล่อเย็นภายในเครื่อง XRD



(ข) น้ำเย็นจะเข้าไปหล่อเย็นให้หลอดรังสีเอกซ์

รูปที่ ก.5 การติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้ากับเครื่อง XRD

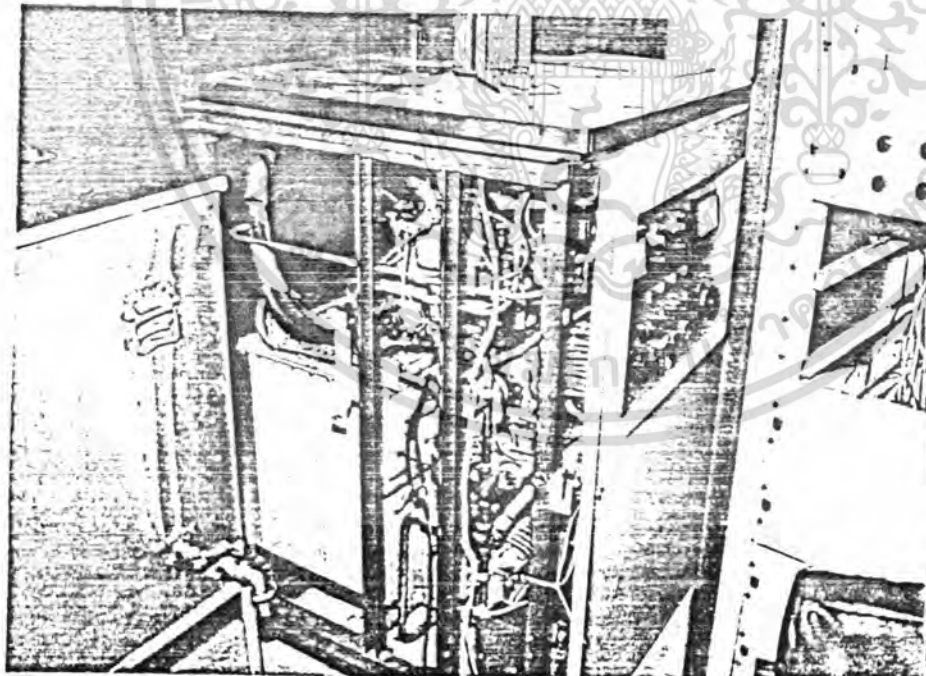
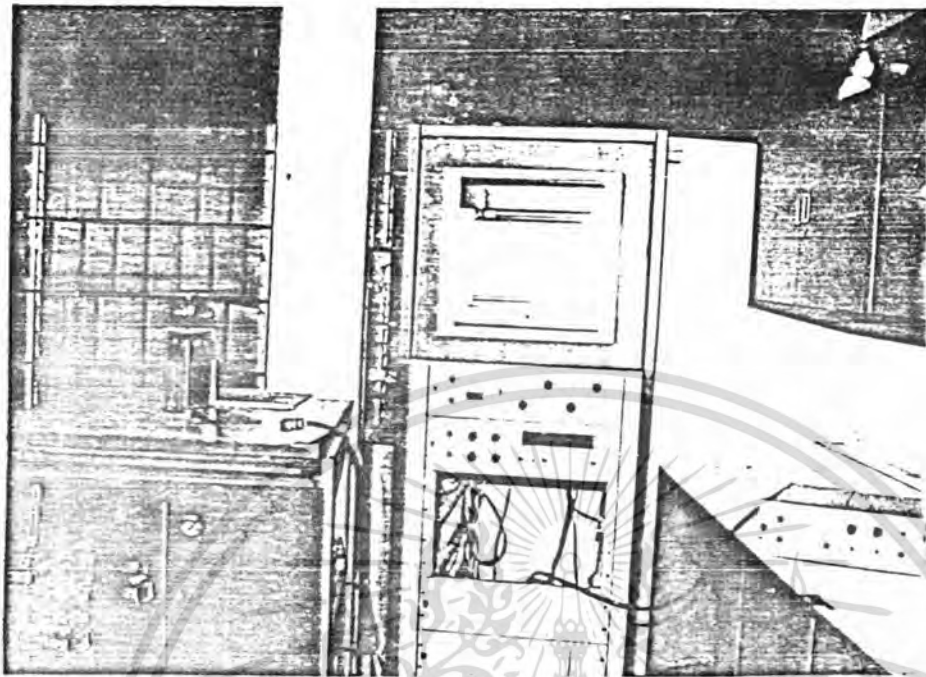
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

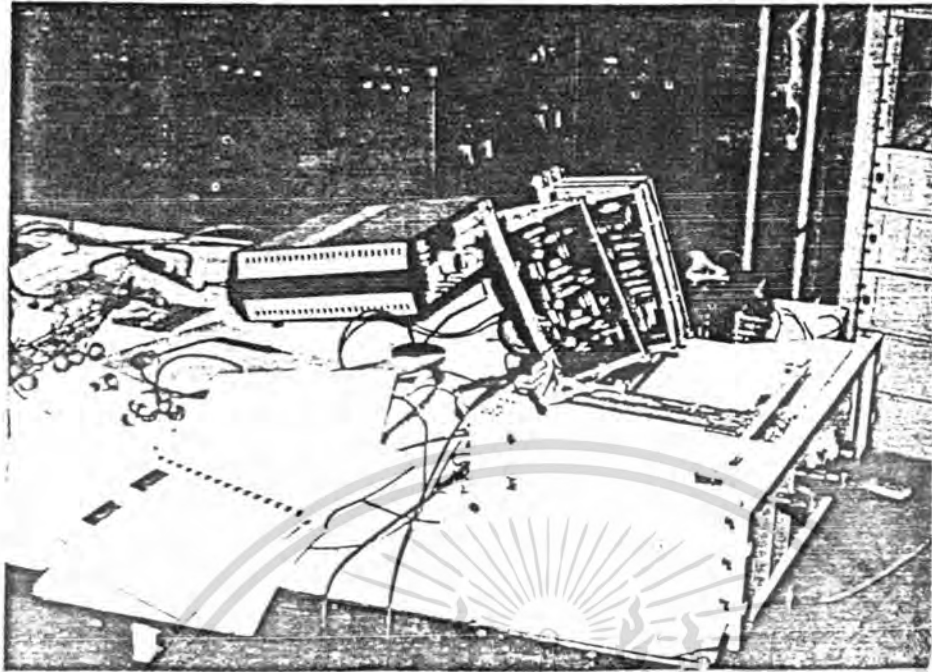
การตรวจสอบและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ



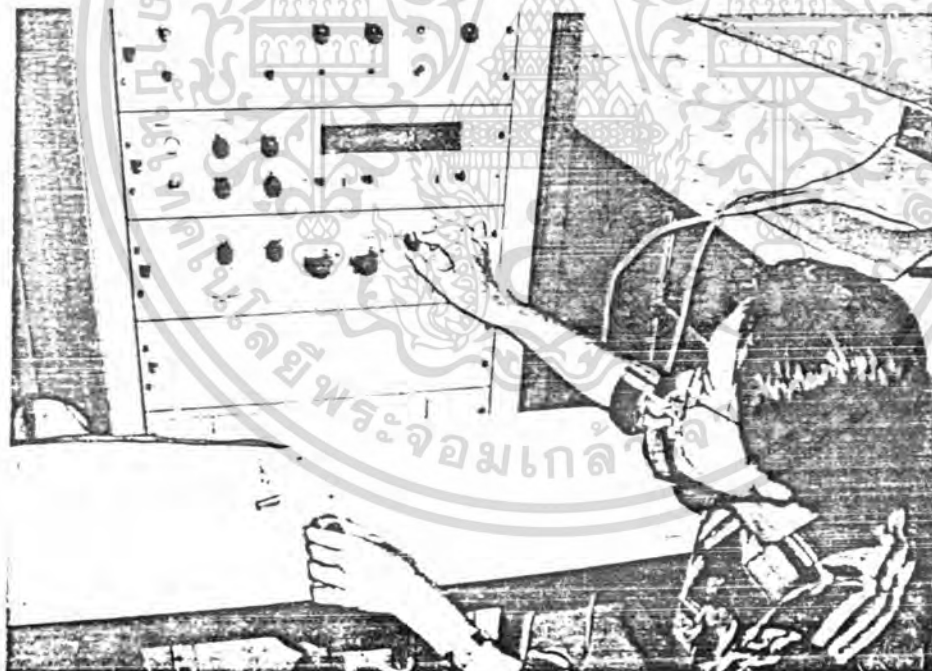
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๑ การสำรวจส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ภายในเครื่อง XRD ที่ได้รับมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

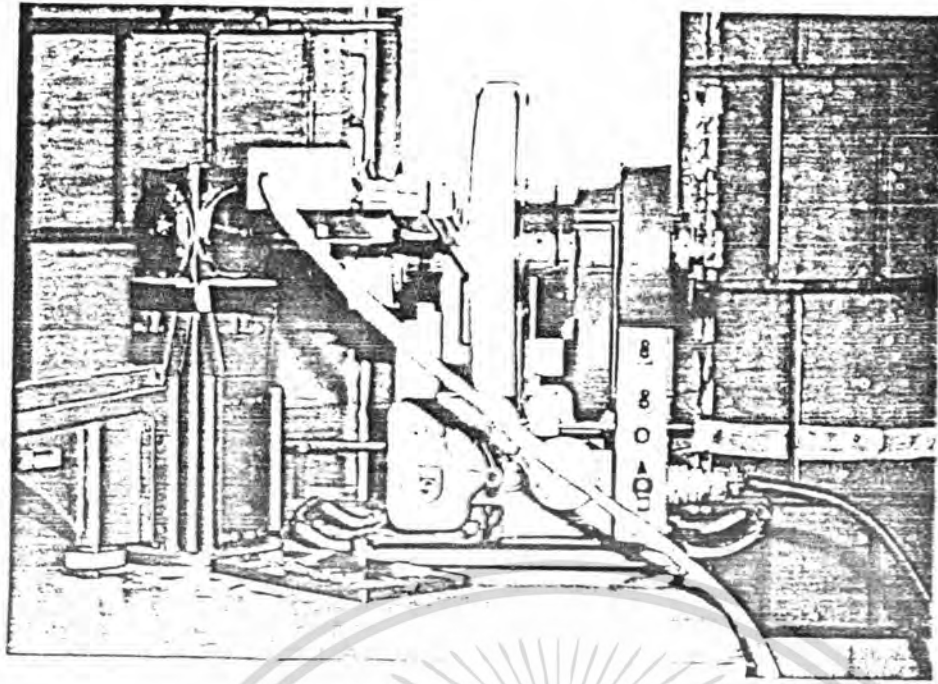


(ก) การตรวจสอบและแก้ไขส่วน Amplifier/Analyser

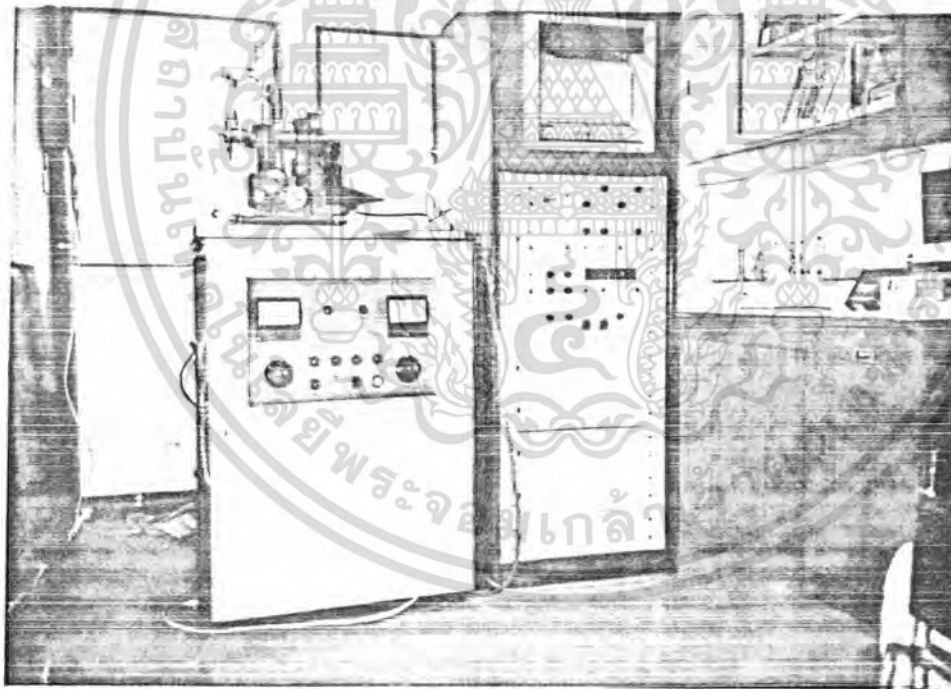


(ข) การตรวจสอบหัววัดรังสีเอกซ์และส่วนรับสัญญาณจากหัววัด
รูปที่ ๓.๒ การตรวจสอบและแก้ไขส่วนต่างๆ ของเครื่อง XRD

ให้ทางงานได้เป็นปกติ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 90 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การติดตั้ง Goniometer และหัววัดรังสีเอกซ์



(ข) เครื่อง XRD ที่สมบูรณ์และพร้อมที่จะทำงาน

รูปที่ ๓.๔ เครื่อง XRD หลังจากการตรวจสอบและประกอบสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบ

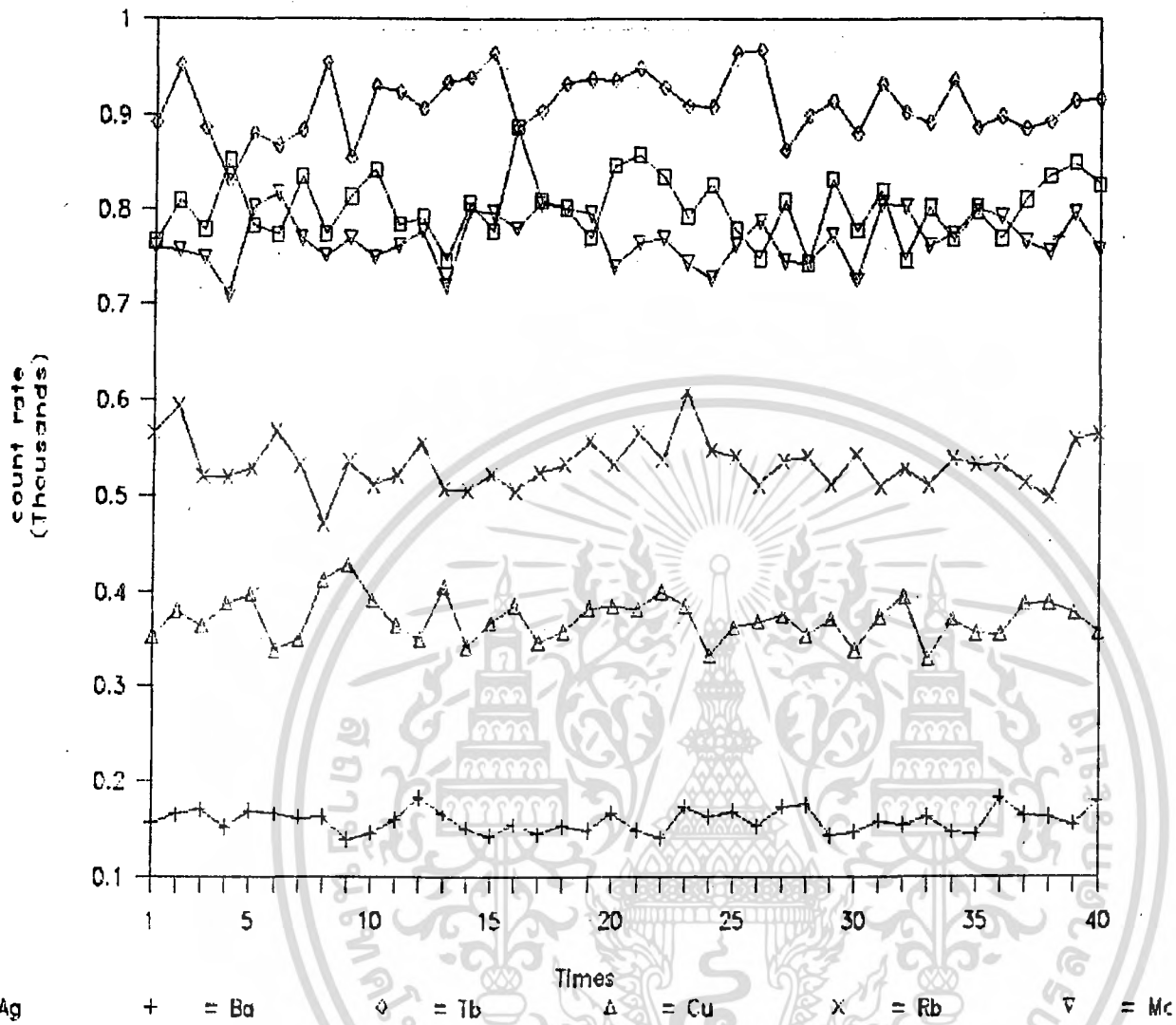
ภาคการวัดและแสดงผล

ด้วยแหล่งรังสีเอกซ์มาตรฐาน S1780



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

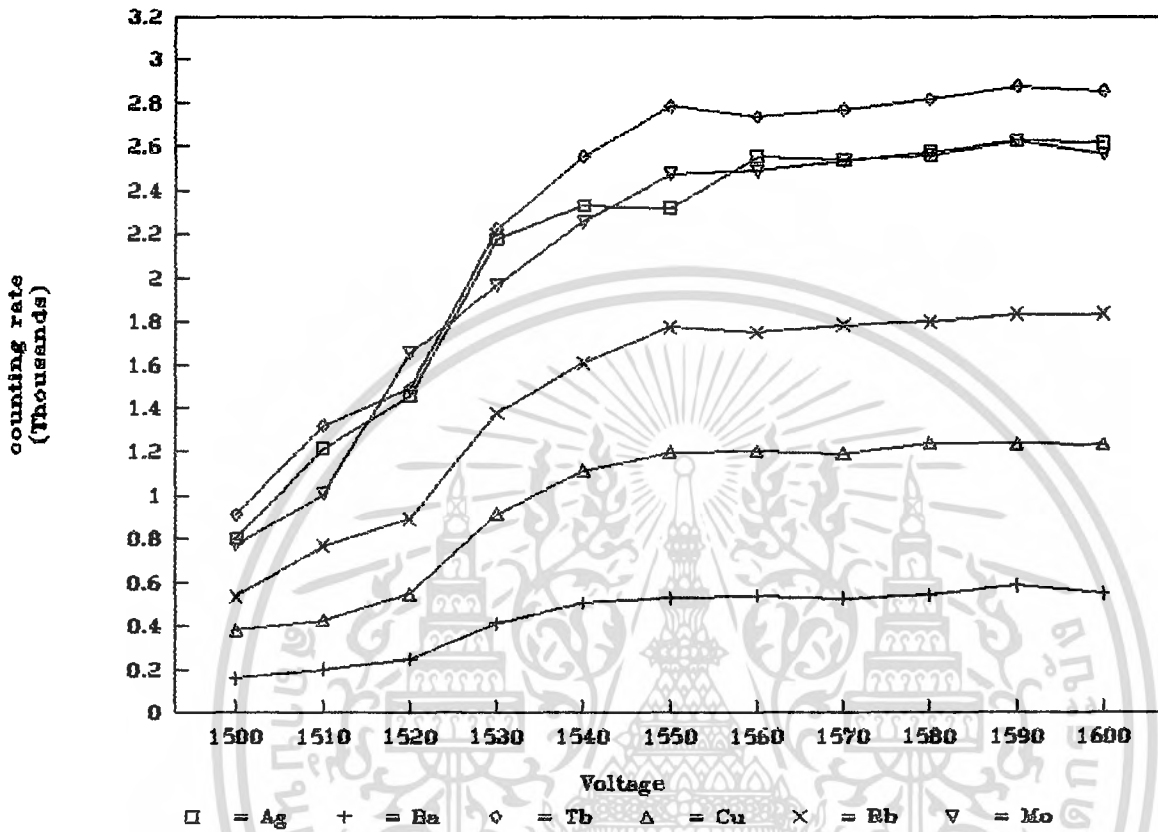
Count rate of X-ray sources



กราฟแสดงอัตราการนับจำนวนพัลส์ใน 10 วินาทีของแหล่งรังสีเอกซ์มาตรฐาน
แต่ละชนิด โดยใช้ความต่างศักย์ของหัววัดประมาณ 1500 v.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา-94-นี้อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Counting rate versus voltage



กราฟแสดงอัตราการนับพัลส์ต่อความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงจากแหล่งรังสีเอกซ์
มาตรฐานชนิดต่างๆ

ประวัติผู้เขียน

นาย บวิสุทธิ์ สะเดา เกิดเมื่อวันที่ ๘ เดือนมกราคม พ.ศ. ๒๕๑๑
จ.อุบลราชธานี จบการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ ๒ จากโรงเรียนชลประทานสงเคราะห์
จ.นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. ๒๕๑๙ จบการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ ๖ จากโรงเรียน
อุบลวิทยาคม จ.อุบลราชธานี เมื่อ พ.ศ. ๒๕๒๓ จบชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ จาก
โรงเรียน สวนกุหลาบวิทยาลัย จ. กรุงเทพฯ เมื่อ พ.ศ. ๒๕๒๙ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี
สาขา ฟิลิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. ๒๕๓๘

กิจกรรมระหว่างการศึกษา

ประธานชมรมอนุรักษ์ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ลาดกระบัง พ.ศ. ๒๕๓๐

นายกสโมสรนักศึกษาคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ พ.ศ. ๒๕๓๑