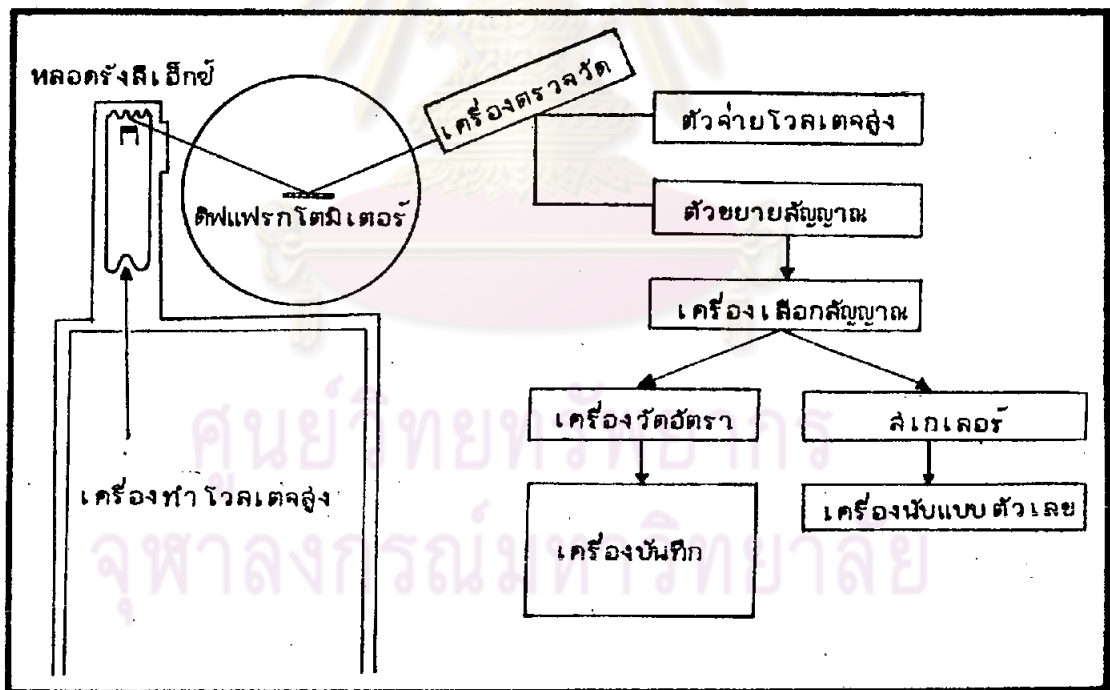


เครื่องดีฟแฟรกโตมิเตอร์ผลึกผงและเครื่องอินทิเกรตความเข้ม

เครื่องมือที่สำคัญสำหรับเครื่องดีฟแฟรกโตมิเตอร์ผลึกผงประกอบด้วยส่วนพื้นฐาน

3 ส่วนคือ

- ก. เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์
- ข. เครื่องดีฟแฟรกโตมิเตอร์
- ค. เครื่องตรวจวัด

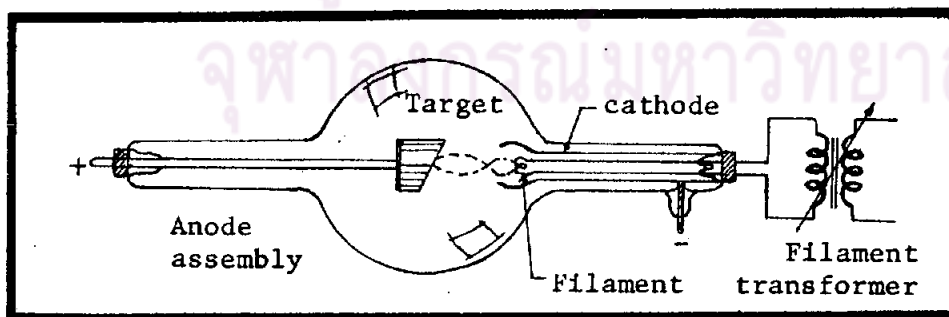


รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของส่วนประกอบที่สำคัญของ เครื่องดีฟแฟรกโตมิเตอร์

3.1 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ หลอดรังสีเอ็กซ์และเครื่องทำโวลเตจสูง

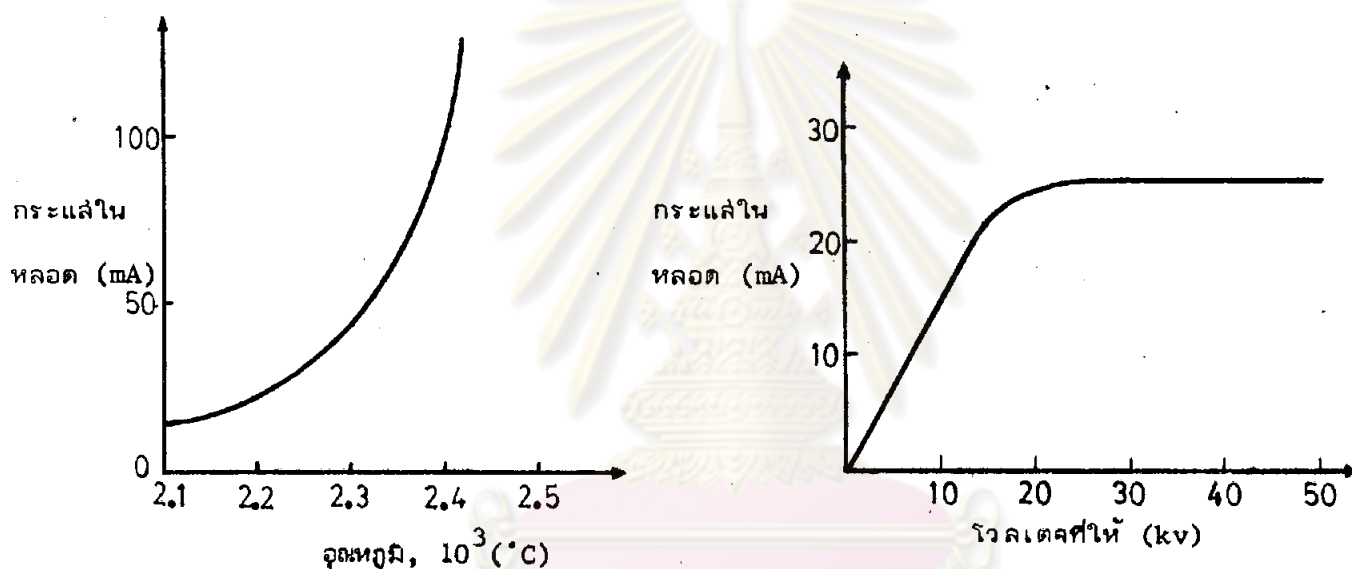
3.1.1 หลอดรังสีเอ็กซ์

ตั้งแต่ปี 1895 คีทลิว.ซี เรินท์เกน (W.C. Röntgen) พบรังสีเอ็กซ์จากการทดลองโดยใช้หลอดรังสีคาโทด (cathod-ray tube) ซึ่งเป็นหลอดชนิดใช้ก๊าซ (gas tube) ต่อมา คีทลิว .ดี. คูลิดจ์ (W.D. Coolidge) ได้ปรับปรุงรังสีเอ็กซ์ที่ดีกว่าชนิดใช้ก๊าซเรียกว่า หลอดคูลิดจ์ (Coolidge tube) เป็นหลอดชนิดมีไส้ทำด้วยทังสเตน (tungsten filament) เป็นขั้วลบและเป้าโลหะเป็นขั้วบวกเมื่อเผาไส้หลอดให้ร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป ความร้อนของไส้หลอดมีผลให้เกิดพลังงานจลน์แก่อิเล็กตรอนวงนอก (valence-conduction electrons) จนกระทั่งหลุดออกจากโลหะด้วยขบวนการที่เรียกว่า การหลุดออกเนื่องจากความร้อน (thermionic emission) เมื่อให้โวลเตจสูงเข้าที่ขั้วบวกและขั้วลบของหลอดอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาด้วยความร้อนจะถูกเร่งให้ไปเข้าที่ขั้วบวกเกิดเป็นกระแสไหลโดยที่กระแส นี้ขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกเผาให้หลุดออกจากไส้หลอด หลอดคูลิดจ์จะเป็นหลอดสูญญากาศปกติมีความดันน้อยกว่า 10^{-5} มิลลิเมตร ของปรอทเพื่อป้องกันการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซเพราะอาจทำให้ประสิทธิภาพของหลอดลดลง ไส้หลอดจะหุ้มด้วยคาโทดซึ่งเป็นโลหะโดยมีศักย์เป็นลบเหมือนไส้หลอดและทำหน้าที่ปรับอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากไส้หลอดให้ไปตกบนพื้นที่เล็ก ๆ บนเป้า เรียกพื้นที่เล็ก ๆ นี้ว่าจุดโฟกัส (focal spot) ของหลอดตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงหลอดคูลิดจ์

การทำงานของหลอดสุญญากาศนั้นควบคุมได้ง่าย เพราะว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปเข้าปามีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของไส้หลอดตามรูปที่ 3.3 อุณหภูมิของไส้หลอดควบคุมโดยหม้อแปลงสำหรับไส้หลอด (filament transformer) ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง จำนวนอิเล็กตรอนก็จะคงที่ด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มศักย์ของหลอดจึงเป็นการเพิ่มความเร็วของอิเล็กตรอนเท่านั้น แต่ไม่เพิ่มกระแสไส้หลอด ตามรูปที่ 3.4 เมื่อเพิ่มศักย์แก่หลอด



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟของกระแสหลอดซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ

รูปที่ 3.4 แสดงกราฟของกระแสหลอดและโวลเตจที่ให้แก่หลอด

กระแสของหลอดจะเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เมื่อถึงการอิ่มตัว (saturation) กระแสก็จะคงที่ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับหลอดสุญญากาศ คือโวลเตจที่ใช้ในการผลิตรังสีเอ็กซ์บังคับได้อิสระแยกจากกระแสของหลอด เนื่องจากหลอดชนิดนี้ต้องการอิเล็กตรอนที่ได้จากการเผาไส้หลอด ดังนั้นจึงต้องเผาไส้หลอดก่อนที่จะเพิ่มศักย์ให้แก่หลอดเสมอ มิฉะนั้นอาจเกิดการหลุดออกของอิเล็กตรอนขณะไส้หลอดเย็น (cold emission) ซึ่งทำให้ไส้หลอดเสียหายได้

หลอดคูลิคยังแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

ก. Demountable tube เป็นชนิดที่เปลี่ยนเป้าและไส้หลอดได้ แต่มีความยุ่งยากเรื่องเครื่องดูดอากาศ (vacuum pump) ที่ใช้ต่อกับหลอด

ข. Sealed-off tube เป็นหลอดชนิดที่เป็นสุญญากาศปิดตายเพื่อตัดปัญหาของเครื่องดูดอากาศซึ่งเปลี่ยนเป้าและไส้หลอดไม่ได้

สำหรับประสิทธิภาพของการเกิดรังสีเอ็กซ์ทำได้จากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (empirical relation) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{\text{พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ส่งออกมา}}{\text{พลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืน}} \\ &= 1.4 \times 10^{-9} ZV \end{aligned} \quad (3.1)$$

เมื่อ Z คือตัวเลขอะตอม (atomic number) ของเป้าโลหะ
 V คือโวลเตจที่ให้แก่วัดหลอดเป็นโวลต์ (volts)

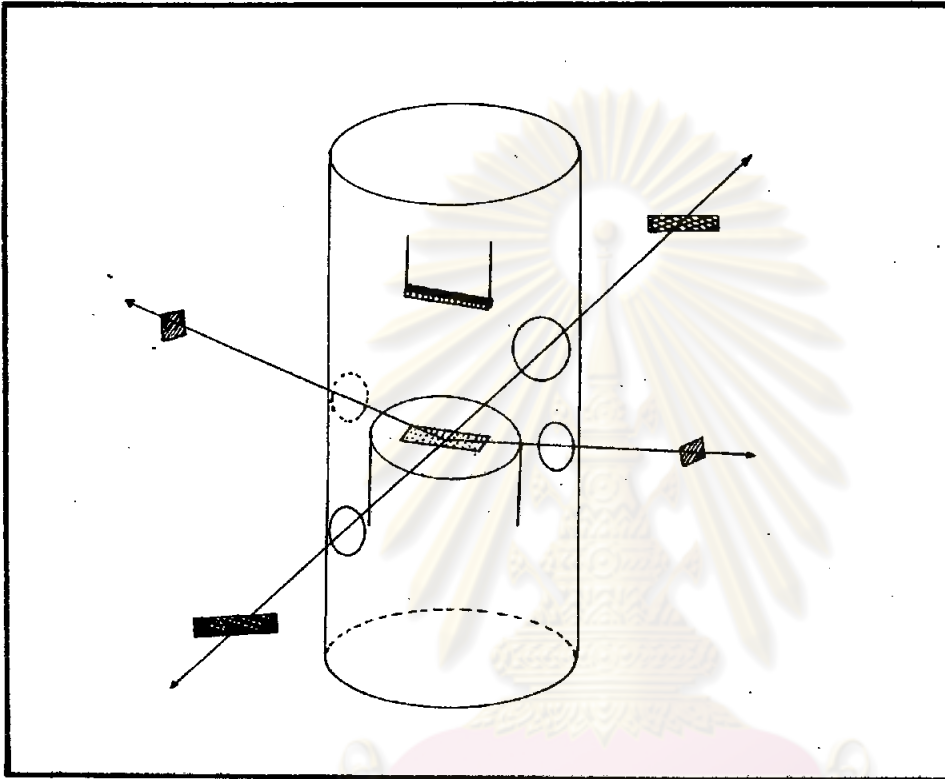
เช่นหลอดรังสีเอ็กซ์เป้าโลหะทองแดงมีตัวเลขอะตอม 29 ที่ 35 kV มีประสิทธิภาพดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ} &= 1.4 \times 10^{-9} \times 29 \times 35 \times 10^3 \times 10^2 \% \\ &= 0.14 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นตัวเลขอะตอมของเป้ายิ่งสูงประสิทธิภาพยิ่งสูงตาม และสิ่งที่เห็นได้ชัดก็คือประสิทธิภาพของหลอดรังสีเอ็กซ์จะมีค่าต่ำทั้งนี้เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปในรูปของความร้อนซึ่งต้องมีการถ่ายเทความร้อนโดยผ่านน้ำเย็นไปยัง เป้าโลหะเพื่อป้องกันไม่ให้เป้าโลหะเสียหาย ดังนั้นในการเลือกโลหะที่ใช้ทำเป้าจึงต้องคำนึงถึงจุดหลอมเหลวของโลหะด้วย

ลักษณะสารรังสีเอ็กซ์ที่ออกจากหลอด พิจารณารูปที่ 3.5 จุดโฟกัสบนเป้าพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายกับรูปร่างของไส้หลอดเมื่อมองทางด้านยาว ของจุดโฟกัสจะเห็นความยาวคงเดิมแต่ความกว้างจะแคบเข้ามาได้ลักษณะเป็นเส้นเรียกลักษณะนี้เรียกว่า โฟกัสเส้น (line

focus) เมื่อมองจากปลายข้างใดข้างหนึ่งของจุดโฟกัสบนเป้าจะเห็นจุดโฟกัสล้นตง และเมื่อมองท่ามุมพอเหมาะจะมองเห็นเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็ก ๆ เรียกโฟกัสจุด (point focus)



รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างของโฟกัสเส้นและโฟกัสจุด

การปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกจากหลอด เกิดเมื่ออิเล็กตรอนจากแคโทดของหลอดรังสีเอ็กซ์วิ่งมาชนเป้าโลหะด้วยความเร็วสูงซึ่งขึ้นกับโวลเตจที่ให้กับหลอดรังสีเอ็กซ์จะมีโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเบนไปโดยไม่สูญเสียพลังงานหรือสูญเสียพลังงานแล้วให้เป็นรังสีเอ็กซ์ออกมา ในกรณีที่สูญเสียพลังงานบางส่วนแล้วให้รังสีเอ็กซ์ก็จะได้โฟตอนรังสีเอ็กซ์มีพลังงานเป็น

$$\Delta E = h\nu$$

หรือ
$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

$$\text{มีค่า} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule-sec.}$$

$$c = \text{ความเร็วแสงมีค่า} = 2.998 \times 10^8 \text{ meter.sec}^{-1}$$

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

พลังงานสูงสุดของโฟตอนรังสีเอ็กซ์จะมีค่าไม่เกินพลังงานสูงสุดที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

เนื่องจากโวลเตจที่ให้แก่หลอด โดยที่พลังงานสูงสุดที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน $E_{\max} = h\nu_{\max} = eV$
เมื่อ $e = 1.602 \times 10^{-19}$ อนุกรม และแสดงมิติของหน่วย

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \lambda_{\text{swl}} &= \frac{hc}{eV} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ (J.Sec)} \times 2.998 \times 10^8 \text{ (m.Sec}^{-1}\text{)}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ (Coulomb)} \times V \text{ (volt)}} \\ &= \frac{12.4 \times 10^{-7}}{12.4 \times 10^3 \frac{V}{V}} \text{ meter} \\ \text{หรือ } \lambda_{\text{swl}} &= \frac{12.4}{V} \text{ (3.2)} \end{aligned}$$

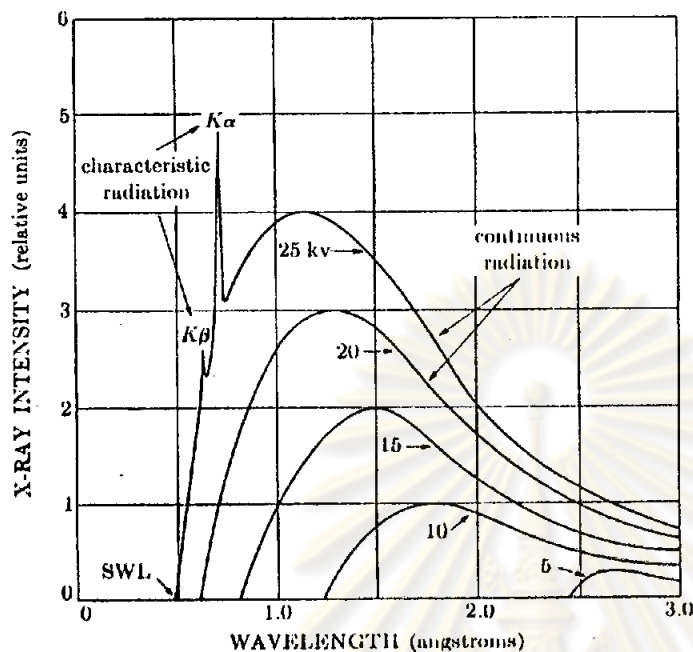
เมื่อ V มีหน่วยเป็นโวลต์ และ λ_{swl} คือความยาวคลื่น (หน่วยเป็นอังสตรอม) ที่สั้นที่สุดของรังสีเอ็กซ์จะเกิดเมื่อ อิเล็กตรอนชนเป้าครึ่งเดียวแล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้เป็นรังสีเอ็กซ์ออกมา

การชนเป้าของอิเล็กตรอนปกติจะไม่เสียพลังงานทั้งหมดในการชนแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงมีการชนต่อเนื่องหลายครั้งก่อนที่จะหยุดนิ่งในเป้า ดังนั้นรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจึงมีพลังงานหลายค่า ซึ่งเรียกว่ารังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray) จะมีความเข้มสูงสุดที่ประมาณ $1.5 \lambda_{\text{swl}}$ ความเข้มรวม (total intensity) ของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องหาได้จาก (Cullity, 1978)

$$I_{\text{cont.}} = AiZV^m \quad (3.3)$$

เมื่อ A = ค่าคงที่, i = กระแสของหลอด, Z = เลขอะตอมของเป้าโลหะ, V = โวลเตจที่ให้แก่หลอดและ m = ค่าคงที่มีค่าประมาณ 2

นอกจากการเกิดรังสีแบบต่อเนื่องจากการปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกจากหลอดแล้วยังเกิดรังสีเฉพาะ (characteristic radiation) ขึ้น, ตามรูปที่ 3.6 เมื่อพลังงานที่ให้แก่หลอดสูงพอไปทำให้อิเล็กตรอนในวง K ของเป้าโลหะหลุดออกไปอิเล็กตรอนจากวงอื่นจะเข้าแทนที่ซึ่งวงที่อยู่ใกล้ที่สุดจะมีโอกาสเข้าแทนที่ได้มากกว่าวงอื่น ทั้งนี้เป็นไปตามกฎการเลือก (selection rule) ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 3.6 แสดงสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ของโมลิบดีนัม (molybdenum), (Cullity, 1978)

การที่อิเล็กตรอนจากวงชั้นเข้ามาแทนที่จะมีพลังงานเหลือและคายพลังงานออกมา
 ในรูปของรังสีเฉพาะซึ่งความเข้มของรังสีเอ็กซ์ $I(\lambda)$ ของความยาวคลื่นเฉพาะ
 (characteristic wave length) หาได้จาก

$$I(\lambda) = K i (V - V_c)^n \tag{3.4}$$

- เมื่อ
- K = ค่าคงที่, i = กระแสของหลอดมีหน่วยเป็น mA
 - V = ศักย์ที่ให้แก่วง K มีหน่วยเป็น kV
 - V_c = ศักย์กระตุ้นวิกฤต (critical excitation potential) หมายถึงศักย์ที่พอดี ทำให้
อิเล็กตรอนในวง K ของเป้าโลหะหลุดจากวงโคจร
 - $n \approx 1.6$

สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ชนิดศักย์คงที่ (constant potential generator) ควรจะใช้ค่าโวลเตจที่เหมาะสมของหลอดรังสีเอ็กซ์มีค่าเป็น 3 ถึง 5 เท่าของศักย์กระตุ้นวิกฤต V_c ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของสารที่ใช้ทำแอโนดของหลอดรังสีเอ็กซ์

สารทำแอโนด	เลขอะตอม	$\lambda_{K\alpha}$ (Å)	ศักย์กระตุ้นวิกฤต (kV)	kVที่เหมาะสม
Cu	29	1.542	8.98	30-45
Cr	24	2.291	5.99	20-30
Mo	40	0.710	20.00	60-80
Fe	26	1.937	7.11	20-35
Co	27	1.791	7.71	25-40
Ag	47	0.561	25.51	70-80

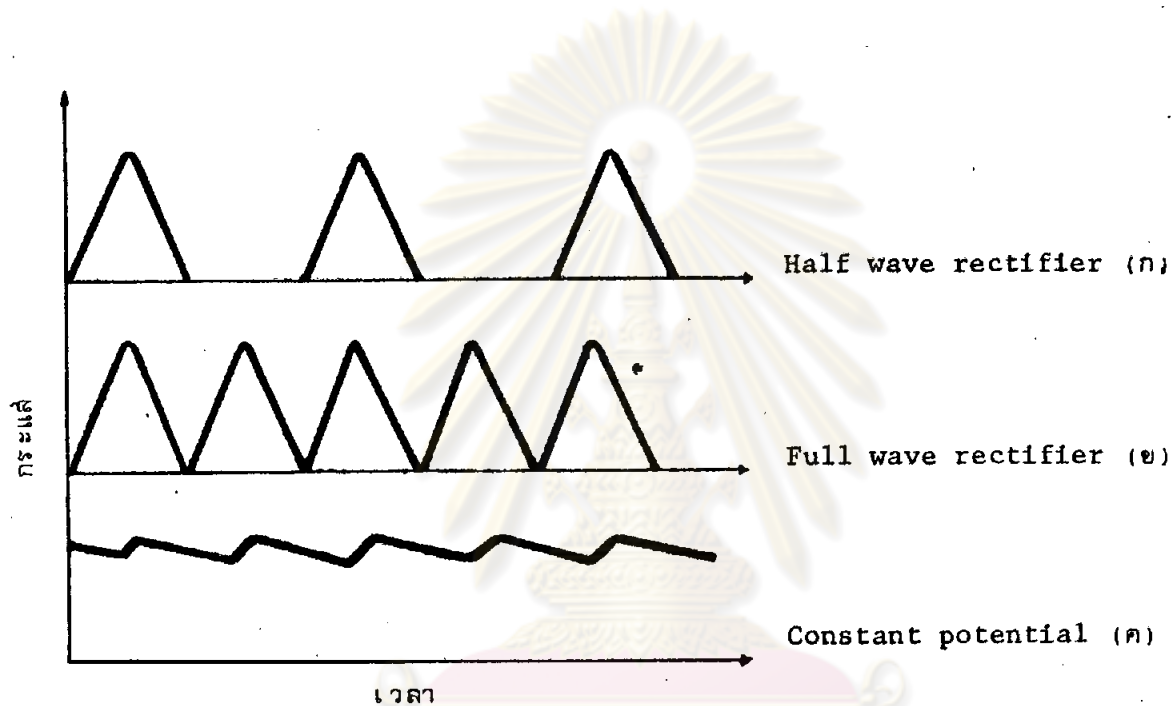
3.1.2 เครื่องทำโวลเตจสูง

ประกอบด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ (rectifier) ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current) ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) ชนิดที่มีศักย์สูงสม่ำเสมอซึ่งมี 3 ชนิด

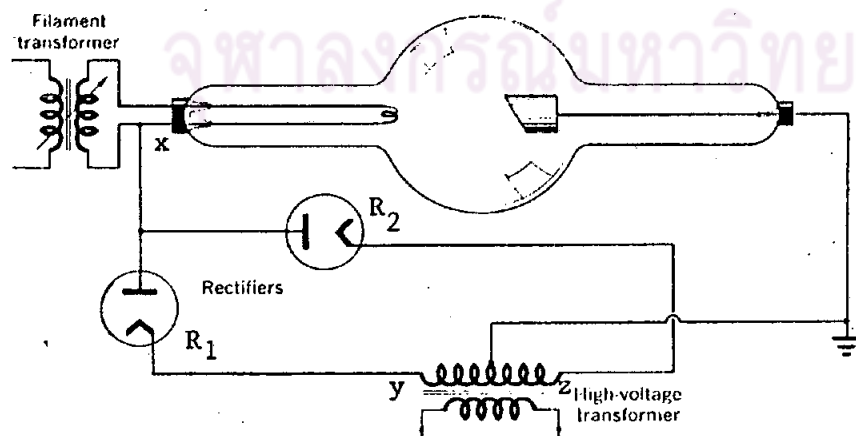
ก. half wave rectifier หรือ self rectifier ปกติหลอดรังสีเอ็กซ์ชนิด sealed-off มักจะทำหน้าที่เป็นไดโอด (diode) ในตัวสามารถผลิตกระแสตรงเป็นฟังก์ชันกับเวลา ดังรูปที่ 3.7 (ก)

ข. full wave rectifier ในกรณีต้องการกระแสเรียบขึ้นใช้ไดโอดมาต่อเพิ่มเข้าไปทำให้ได้ศักย์ค่อนข้างคงที่ดีกว่าชนิดแรกได้กราฟของกระแสเป็นฟังก์ชันกับเวลาดังรูปที่ 3.7 (ข) และวงจรพร้อมหลอดรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 3.8

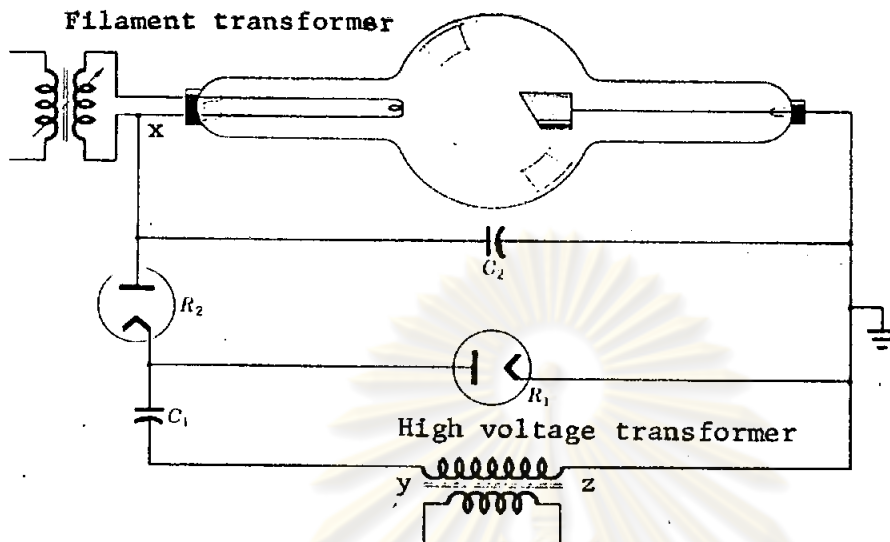
ค. Constant potential กระแสจะเรียบที่ลู่ดโดยการเพิ่มคอนเตนเซอร์
 เข้าไปในวงจรทำให้ได้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสม่ำเสมอเหมาะสำหรับงานละเอียดที่ต้องการ
 เครื่องที่มีเสถียรภาพ (stability) ลู่ได้กราฟของกระแสเป็นฟังก์ชันกับเวลา ดังรูปที่
 3.7 (ค) และวงจรพร้อมหลอดรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 แสดงกราฟของกระแสกับเวลาสำหรับ rectifier ต่าง ๆ



รูปที่ 3.8 แสดงวงจร full wave rectifier



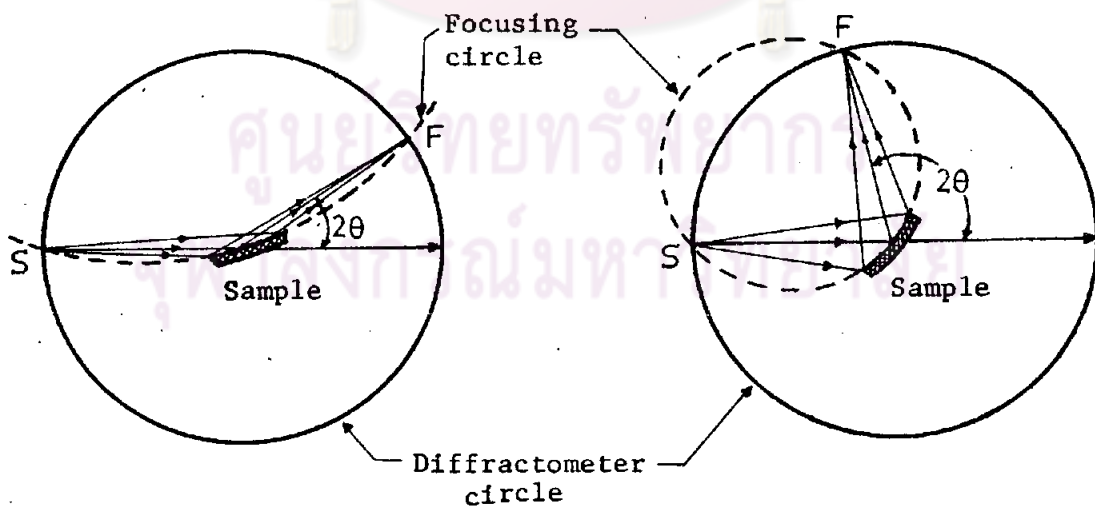
รูปที่ 3.9 แสดงวงจร constant potential

รูปที่ 3.8 ในกรณีที่ไม่มี R_1 , R_2 ก็คือวงจร self rectifier นั้นเอง หม้อแปลงสำหรับไส้หลอดทำหน้าที่จ่ายไฟเพื่อเผาไส้หลอดให้ร้อน ขาข้างหนึ่งของไส้หลอดจุด x ต่อไปยังจุด y ซึ่งเป็นปลายหนึ่งของทุติยภูมิของหม้อแปลงโวลเตจสูง (high voltage transformer) อีกปลายหนึ่งของทุติยภูมิ อันเดียวกันนี้คือจุด z ต่อเข้ากับเพ้าขั้วบวก, คิตกะแสลส์บที่ทุติยภูมิของหม้อแปลงโวลเตจสูงในครึ่งรอบ (cycle) แรกขณะที่เพ้าเป็นบวกเทียบกับไส้หลอดอิเล็กตรอนถูกเร่งไปเพ้าก็จะได้รับรังสีเอ็กซ์ออกมา ในครึ่งรอบต่อมา โวลเตจเพ้าเป็นลบจะผลึกอิเล็กตรอนทำให้ไม่เกิดรังสีเอ็กซ์ออกมาในช่วงนี้ ดังนั้น self rectifier จึงเหมาะสำหรับงานในช่วงสั้น ๆ เท่านั้น. ตามรูปที่ 3.8 เป็น full wave rectifier ขณะที่โวลเตจเป็นบวกในครึ่งรอบแรกให้ y เป็นบวก, z จะเป็นลบ อิเล็กตรอนจะไหลผ่าน R_2 จะได้ทางไส้หลอดเป็นลบเมื่อเทียบกับเพ้าก็จะเกิดกระแสไหลในวงจรและเมื่อโวลเตจเป็นลบในครึ่งรอบต่อไป y จะเป็นลบจะได้ z เป็นบวก, อิเล็กตรอนจะไหลผ่าน R_1 ทำให้ไส้หลอดเป็นลบเมื่อเทียบกับเพ้ากระแสจะไหลในหลอดรังสีเอ็กซ์ได้เช่นกัน

ตามรูปที่ 3.9 เป็น constant potential ในครึ่งรอบแรกของไฟล์สับเมื่อ โวลเตจเป็นบวกให้ y เป็นบวก และ z เป็นลบกระแสไหลผ่าน R_1 และให้ประจุแก่ C_1 จนมีโวลเตจเท่ากับศักยภูมิ ขณะที่โวลเตจเป็นลบในครึ่งรอบต่อไป y เป็นลบและ z เป็นบวก ต่ออนุกรมอยู่กับ C_1 จะเกิดการคายประจุ (discharge) ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านหลอด รังสีเอ็กซ์และผ่าน R_2 ขณะเดียวกันให้ประจุที่ C_2 โดยกระแสไม่ผ่าน R_1 เมื่อถึงครึ่งรอบต่อไป y เป็นบวกและ z เป็นลบกระแสผ่าน R_1 และให้ประจุที่ C_1 อีกขณะเดียวกัน C_2 จะคายประจุทำให้เกิดกระแสไหลผ่านหลอดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ นั่นคือเกิดกระแสไหลผ่านหลอดรังสีเอ็กซ์อย่างต่อเนื่อง

3.2 เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

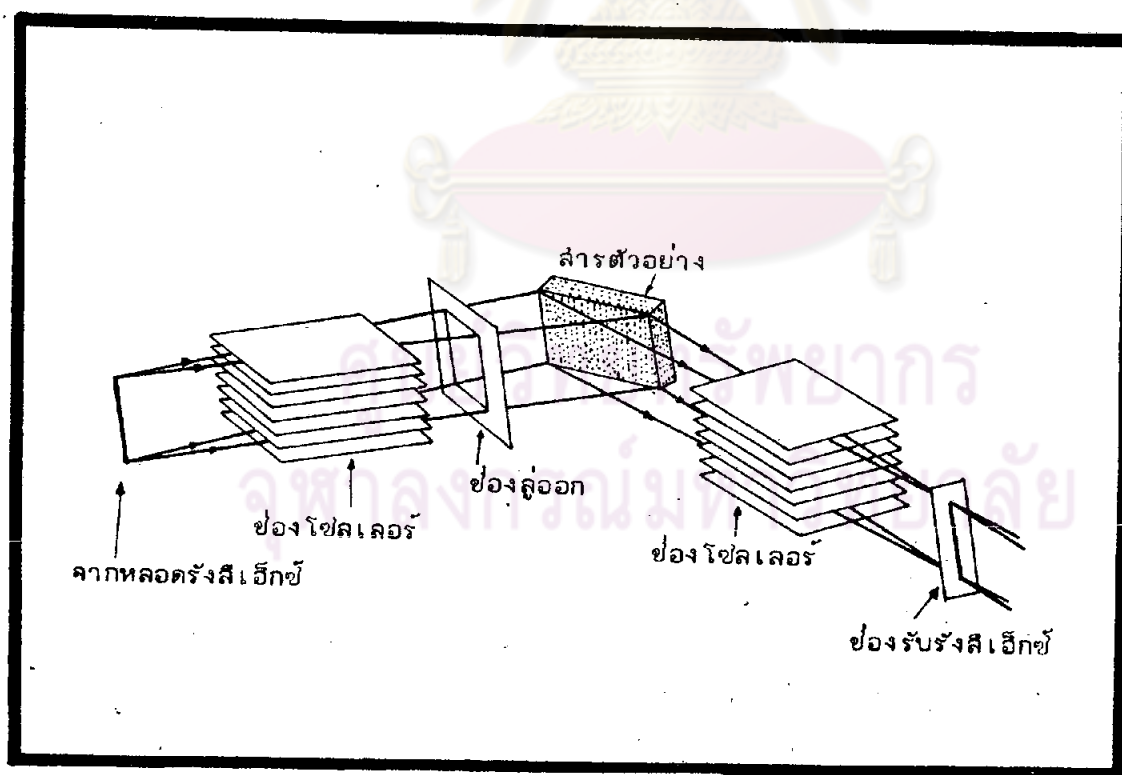
เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์สามารถวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนได้อย่างตรงไปตรงมาโดยมีเครื่องตรวจวัด (detector) ทำหน้าที่แทนฟิล์ม เครื่องตรวจวัดจะวัดความเข้มรังสีเอ็กซ์เป็นตัวเลขหรือเป็นกราฟ หลักการของดิฟแฟรคโตมิเตอร์ตามรูปที่ 3.10 เป็นไปดังนี้ ระบายของสารตัวอย่างวางอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เมื่อให้ S เป็นจุดที่ส่ง



รูปที่ 3.10 แสดงวงกลมโฟกัสและวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์

รังสี เอ็กซ์อยู่ที่เส้นรอบวงบนวงกลมของดิฟแฟรคโตมิเตอร์และกึ่งกลางระนาบของลำตัวอย่าง วางทำมุม θ กับทิศทางการสร้างรังสี เอ็กซ์ตกกระทบโดยมีเครื่องตรวจวัด F ทำมุม 2θ กับแนวทิศทางการของรังสี เอ็กซ์ตกกระทบและอยู่ที่เส้นรอบวงบนวงกลมของดิฟแฟรคโตมิเตอร์ จุด S, ลำตัวอย่าง และ F จะอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมเดียวกันเรียกว่าวงกลมโฟกัส (focusing circle) ขณะที่เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ทำการสแกน (scan) ไปลำตัวอย่างและเครื่องตรวจวัด จะหมุนไปด้วยกันด้วยอัตราส่วนของมุม θ เป็น 1 : 2 เสมอ

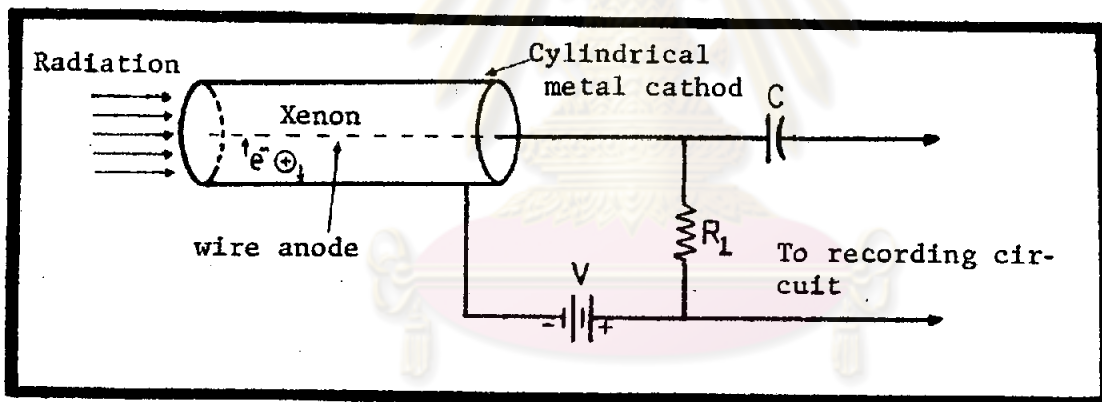
เรขาคณิตและทัศนศาสตร์ของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์แสดงในรูปที่ 3.11 รังสี เอ็กซ์จากหลอดเป็นเส้นผ่านช่องโซลเลอร์บาง ๆ วางขนานกันเรียกว่า ช่องโซลเลอร์ (Soller slit) และผ่านช่องลู่ออก (divergence slit) ซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาณการลู่ออกของรังสี เอ็กซ์แล้วจึงไปตกลงบนลำตัวอย่างรังสี เอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนจะผ่านช่องโซลเลอร์ อีกชุดหนึ่งและลู่ออกเข้า (converge) ผ่านช่องรับรังสีเอ็กซ์ (receiving slit)



รูปที่ 3.11 แสดงเรขาคณิตของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

3.3 เครื่องตรวจวัด (detector)

เครื่องตรวจวัดที่ใช้ในการวัดรังสีเอ็กซ์โดยทั่วไปมี 3 ชนิดคือ เครื่องตรวจวัดแบบไกเกอร์ (Geiger), แบบสัดส่วน (proportional) และแบบซินทิลเลชัน (scintillation) ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่เครื่องตรวจวัดแบบสัดส่วนชนิดก๊าซ (gas counter) ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือดังรูปที่ 3.12 หลักการทำงานของเครื่องนับแบบสัดส่วนอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ตัวเครื่องวัดเป็นทรงกระบอกโลหะกลวงมีลวดเล็ก ๆ อยู่ในแนวแกนของรัศมีทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และตัวทรงกระบอกโลหะเป็นขั้วลบ เมื่อโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย (inert gas) เช่น ก๊าซซีนอน อะตอมของซีนอนจะเกิด



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องมือพื้นฐานของเครื่องนับแบบสัดส่วน

ไอออไนซ์ (ionized) ในจำนวนของอิเล็กตรอนที่วงโคจรนอก (outer electron) ทำให้ได้คู่อิออน (ion pair) ตามสมการ



พลังงานที่ต้องการเคลื่อนอิเล็กตรอนวงนอกให้หลุดออกจากอะตอมขึ้นมาใช้ประมาณ 20.8 eV ส่วนมากก๊าซเสียมีศักย์ของการไอออไนซ์ (ionization potential) ระหว่าง 20-30 eV พิจารณารูปที่ 3.12 อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นตามสมการ (3.5) จะถูกเร่งไปยังแอโนด ผลิตโลหะซึ่งอยู่ที่แกนของทรงกระบอกโลหะ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ทำให้ได้สัญญาณไฟฟ้าผ่านตัวความต้านทาน R_1 ซึ่งต่อแบบอนุกรมอยู่ไปยังวงจรบันทึกสัญญาณต่อไป

ด้วยลมนามไฟฟ้าที่เกิดจากโวลเตจประมาณ 1.5-2 kv จะไปเร่งอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานจลน์ ส่วนหนึ่งของพลังงานนี้จะไปทำให้เกิดการไอออไนซ์กับอะตอมของก๊าซตัวอื่น อิเล็กตรอนแต่ละตัว ที่เกิดขึ้นในขบวนการแรกอาจทำให้เกิดอิเล็กตรอนในขบวนการต่อไปอีกมากมาย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มอิเล็กตรอนในตัวเครื่อง เนื่องจากก๊าซเสียจึงเรียกว่ากำสัชขยายของก๊าซ (gas gain) ดังนั้นกำสัชขยายนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโวลเตจที่ให้กับลมนาม เครื่องตรวจวัดที่ใช้โวลเตจในช่วงนี้เรียกว่าเครื่องนับแบบสัดส่วน (proportional counter) เพราะว่าขนาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกความสูงของสัญญาณ (pulse height selection = P.H.S.)

การเลือกความสูงของสัญญาณทำได้เนื่องจากขนาดของสัญญาณโวลเตจเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นเมื่อความยาวคลื่นที่ต่างกันเข้ามา ก็จะเกิดสัดส่วนของสัญญาณโวลเตจที่ต่างกันขึ้น ดังรูปที่ 3.13 แสดงกรณีเมื่อความยาวคลื่น λ_A , λ_B และ λ_C มีสัญญาณโวลเตจขนาด V_A , V_B และ V_C โดยใช้วิธีการแบ่งแยกทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic discrimination) อาจเลือกรับสัญญาณในระดับที่แน่นอนระดับหนึ่ง ซึ่งระดับดังกล่าวจำกัดได้โดยหน้าต่างรับสัญญาณ (acceptance window) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าหน้าต่าง (window) จากรูปที่ 3.13 แสดงสัญญาณ V_A และ V_C อยู่นอกหน้าต่าง ดังนั้นจึงมีเฉพาะสัญญาณ V_B เท่านั้นที่ผ่านไปที่เครื่องนับแบบแสดงตัวเลข (visual display)

ความเป็นจริงสัญญาณ V_B ต้องอยู่ในรูปของขบวนการทางสถิติซึ่งมีนิยามการแจกแจงของสัญญาณโดยการแยก (resolution) R ของเครื่องวัด

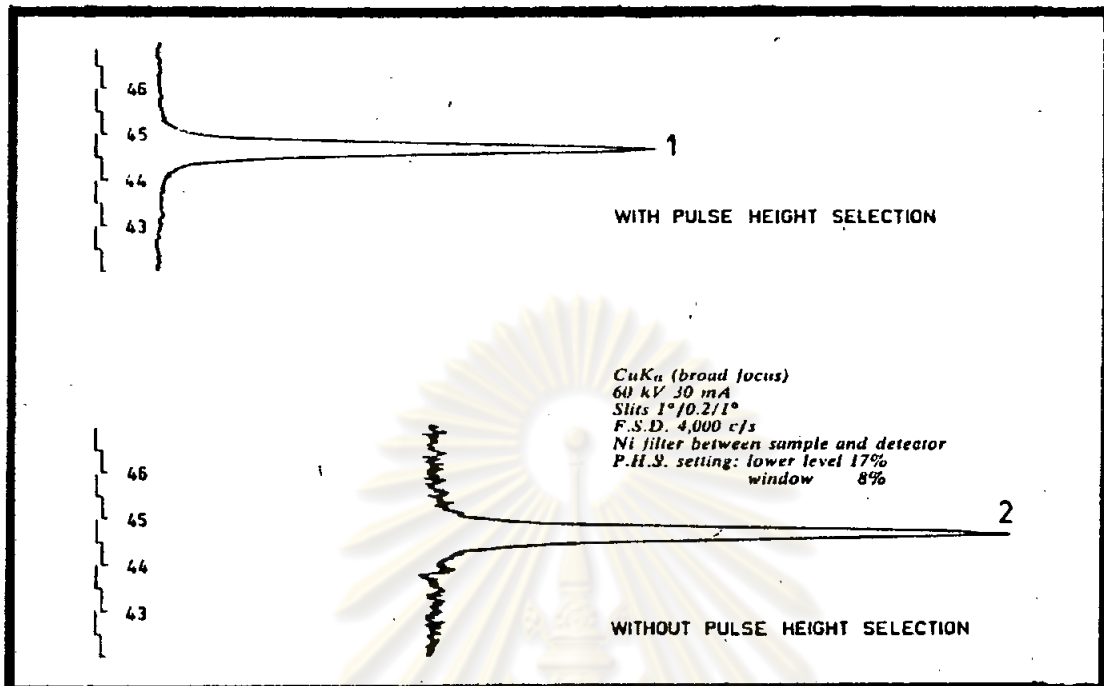
$$R = \frac{K}{\sqrt{E}} \quad (3.6)$$

เมื่อ E คือพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบในหน่วย keV
 K เป็นค่าคงที่ในกรณีเครื่องตรวจวัดแบบสัดส่วนที่ใช้ก๊าซซีนอนค่า $K = 35$

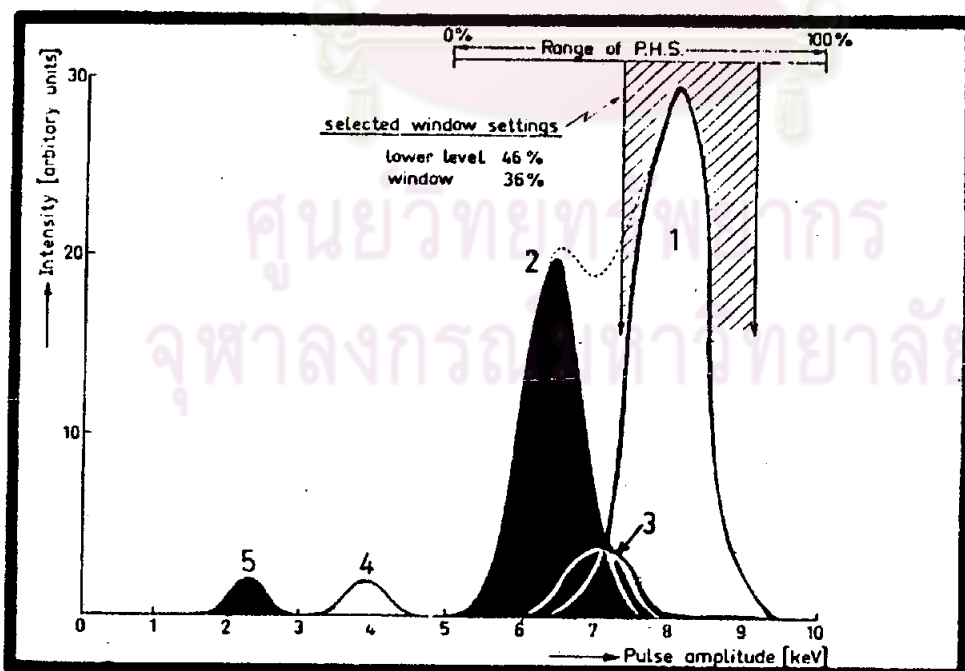
ความหมายการแยก R ของเครื่องวัดคือความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูงการแจกแจงของอัมพลิจูด (pulse amplitude distribution) โดยแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโวลเตจเฉลี่ย การเลือกความสูงของสัญญาณ (pulse height selection = P.H.S.) มีประโยชน์มากในการตัดผลกระทบอื่น ๆ เช่น ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) จากสารตัวอย่างและแบคกราวนด์ (background) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากผ่านตัวกรอง (filter) เมื่อใช้เครื่องเลือกความสูง



รูปที่ 3.13 แสดงผลของการเลือกความสูงของสัญญาณ (Jenkins & de Vries)



รูปที่ 3.14 แสดงการสแกนผ่านระนาบสะท้อน (110) ของเหล็กอัลฟา (α -iron) ที่มีและไม่มี P.H.S. (Jenkins & de Vries)



รูปที่ 3.15 แสดงการแจกแจงของสัญญาณจากเครื่องตรวจวัดสำหรับระนาบสะท้อน (110) ของเหล็กอัลฟาในรูปที่ 3.14 (Jenkins & de Vries)

ของสัญญาณ ดังรูปที่ 3.14 แสดงส่วนหนึ่งของการสแกนวัดผ่าน สารตัวอย่างเหล็กอัลฟา ใช้รังสีเอ็กซ์ชนิดเป่าทองแดงและใช้เครื่องวัดแบบสัดส่วนชนิดก๊าซซิอน โดยมีและไม่มี P.H.S. ซึ่งก็สามารถตัดรังสีเอ็กซ์เนื่องจากฟลูออเรสเซนซ์และแบคกราวนด์ได้

รูปที่ 3.15 เป็นการแสดงการแจกแจงของสัญญาณจริงจากเครื่องตรวจวัดสำหรับระบบ สะท้อน (110) ของเหล็กอัลฟาโดยกราฟระหว่างความเข้มสัมพัทธ์และอำพันสัญญาณ พื้นที่ใต้เส้นโค้ง ทั้งหมด 5 พีคก็คือความเข้มอินทิเกรตสัมพัทธ์ของพีคที่ 2 ในรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าการแจกแจงของ สัญญาณในรูปที่ 3.15 ประกอบด้วยสัญญาณจาก Cu K α (พีคที่ 1) ที่ต้องการวัดและสัญญาณจาก Fe K α (พีคที่ 2) Fe K β (พีคที่ 3) และ XeL (พีคที่ 4 และ 5) รังสี Fe K α และ Fe K β เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีตกกระทบ Cu K α ไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวง K ของสาร ตัวอย่างเหล็กอัลฟาหลุดออกไปแล้วเกิดขบวนการให้รังสีเอ็กซ์ดังที่กล่าวแล้วในข้อ 3.1 ซึ่งเรียกว่า รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิหรือฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่าง (sample fluorescence) ส่วนการ แจกแจงที่พลังงานต่ำคือ พีคที่ 4 และ 5 เรียกว่าพีคหลบเลี่ยง (escape peaks) เกิดขึ้น เนื่องจากรังสีตกกระทบ Cu K α ไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวง L ของก๊าซซิอนหลุดออกไปแล้วให้ รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ XeL ออกมาในทำนองเดียวกับฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่าง ผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพของพลังงานโฟตอนรังสีเอ็กซ์ลดลง การตั้งช่วงของ P.H.S. ดังรูปเพื่อวัดเฉพาะ Cu K α สามารถตัดรังสีทุติยภูมิต่าง ๆ ซึ่งเป็นการลดแบคกราวนด์ลงอย่างเห็นได้ชัด

3.4 เครื่องนับและวงจรถ่ายเกเลออร์

สัญญาณจากเครื่องตรวจวัดจะถูกขยายและแบ่งแยกความสูง โดยเลือกความสูงของสัญญาณ ด้วย P.H.S. แล้วจะแสดงผลออกมาในระบบต่าง ๆ ได้หลายแบบ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะที่ใช้ใน การทดลองนี้

3.4.1 เครื่องแสดงการบันทึกของการอินทิเกรตสัญญาณ

จุดประสงค์ของเครื่องนี้เป็นการวัดอัตราการนับโดยเฉลี่ยรวมในช่วงเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบกับเวลาคงที่ (time constant) ในทางปฏิบัติสัญญาณที่ผ่านเข้ามาจะถูกนำไปยังวงจรร อินทิเกรตซึ่งประกอบด้วยตัวความต้านทาน R และตัวคอนเดนเซอร์ C เวลาที่ใช้คายประจุ (discharge) ของคอนเดนเซอร์ไป 63% ของประจุค่าสูงสุดเรียกว่าเวลาคงที่ ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงอัตราเร็ว ที่ใช้สแกนวัด (scanning speed) ถ้าค่า RC มีมากไปจะส่งผลทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ของเส้นรูปลักษณะ (line profiles) แต่ถ้า RC มีน้อยไปจะทำให้เกิดการรบกวน (noise) ในการบันทึก (recorder) จึงมีการตั้งค่า RC ไว้เป็น

$$RC = \frac{L}{30 \times \frac{\text{ความกว้างของช่องที่รับสัญญาณ}}{\text{อัตราเร็วที่ใช้สแกน}}} \quad (3.7)$$

อัตราเร็วที่ใช้สแกนมีหน่วยเป็น ($^{\circ} 2\theta/\text{min}$)

3.4.2 เครื่องนับแบบตัวเลข

ในการวิเคราะห์ปริมาณหรือกึ่งปริมาณเราต้องการวัดอัตราการนับ R หรือวัดจำนวนการนับ N ในเวลา T เมื่อ

$$R = \frac{N}{T} \quad (3.8)$$

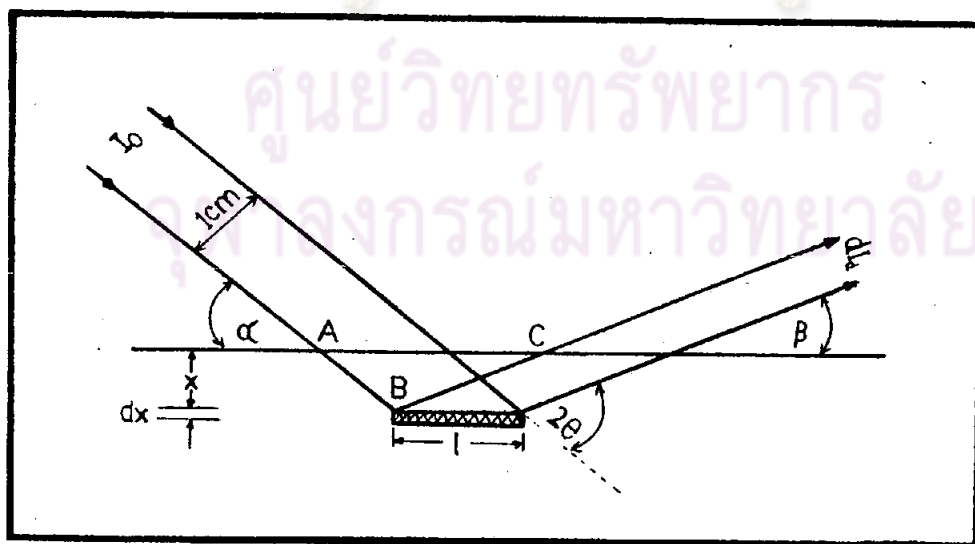
เนื่องจากเราอาจต้องการวัดทั้ง N และ T ไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นระบบเครื่องนับแบบตัวเลขจึงแยกหน่วยสเกลเลอร์ (scaler unit) และหน่วยเวลา (time unit) ออกจากกัน และต่อระหว่างกันไว้ในการใช้เครื่องนับ เมื่อเริ่มกดปุ่มนับจะไปเริ่มต้นเวลาของหน่วยเวลาด้วย และสัญญาณจะไปเข้าเครื่องนับเป็นตัวเลขซึ่งมีสวิตช์ควบคุมตัวเลขอ่านได้หลายหลัก วิธีนับแบบจำนวนการนับคงที่ (fixed count) ทำโดยตั้งตัวเลขคงที่บนเครื่องนับ เมื่อเครื่องนับสัญญาณได้ถึงตัวเลขที่ตั้งไว้ สเกลเลอร์จะส่งสัญญาณให้หน่วยเวลาหยุดด้วย ในทำนองเดียวกันวิธีนับแบบเวลาคงที่ก็ทำโดยตั้งเวลาคงที่เมื่อนับครบตามเวลาหน่วยเวลาก็จะส่งสัญญาณให้สเกลเลอร์หยุดทำงานด้วย

3.5 แพ็คเตอรืการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ เลี้ยวเบนของผงตัวอย่างโดยใช้เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์โดยทั่วไปใช้สารตัวอย่างมีรูปร่างเป็นแผ่นแบนราบ (flat plate specimen) ให้มุมตกกับมุมเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มีค่าเท่ากันดังรูปที่ 3.10 โดยถือเสมือนว่าแผ่นสารตัวอย่างเป็นผลึกเดี่ยว ที่จุดนี้ได้ว่าแพ็คเตอรืการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ A ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2\mu}$ ไม่ขึ้นกับมุม θ การไม่ขึ้นกับ θ นี้เป็นผลเนื่องจากการถ่วงดุลย์กันของผลกระทบที่กลับกัน 2 อย่างนั่นคือ

เมื่อ θ มีค่าน้อยพื้นที่ที่ถูกส่องโดยรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนซึ่งมีภาคตัดขวางคงที่จะมีค่ามาก แต่ความลึกที่รังสีเอ็กซ์ทะลุทะลวงเข้าไปในผงผลึกจะมีค่าน้อย เมื่อ θ มีค่ามากพื้นที่ที่ถูกส่องด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นก็จะมีค่าน้อย แต่ความลึกที่รังสีเอ็กซ์ทะลุทะลวงเข้าไปในผงผลึกจะมีค่ามาก ผลก็คือปริมาตรที่ถูกส่องด้วยรังสีเอ็กซ์จะคงที่และไม่ขึ้นกับมุม θ อย่างไรก็ตามก็อาจจะเกิดการดูดกลืนเลื่อม ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยิ่งมากค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนยิ่งน้อย ข้อที่น่าสังเกตที่สำคัญคือ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนทุกค่าของมุม θ จะถูกดูดกลืนด้วยแพคเตอร์เดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใส่เข้าไปในการคำนวณความเข้มสัมพัทธ์ดังสมการ (2.5) ในบทที่ 2

การคำนวณตัวประกอบการดูดกลืน A แสดงดังต่อไปนี้ในดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนความถี่แล้วจะลู่ออกเล็กน้อยเป็นมุมประมาณ 3 องศา หรือน้อยกว่า ดังนั้น เราจะสมมุติว่ารังสียังคงเป็นลำขนานและเราต้องการคำนวณการดูดกลืนในลำตัวอย่าง ซึ่งมีความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบน พิจารณารูปที่ 3.16 รังสีตกกระทบบนมีความเข้ม I_0 (ergs/cm²/sec.) มีภาคตัดขวาง 1 ตารางเซนติเมตรตกกระทบบนมุมกับแผ่นผงตัวอย่างเป็นมุม α จะหาพลังงานที่เลี้ยวเบนจากรังสีนี้ของชั้นผงตัวอย่างความยาว 1 และ



รูปที่ 3.16 แสดงการเลี้ยวเบนจากผงตัวอย่างแผ่นแบนราบสำหรับรังสีตกกระทบบนสำหรับรังสีเลี้ยวเบนมีความหนา 1 ซม. ในทิศทางฉากกับระนาบที่วาดไว้

ความหนา dx อยู่ลึก x จากผิว เนื่องจากลำรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบนี้จะถูกดูดกลืนขณะที่รังสีผ่านเข้าไปในผงตัวอย่างยาว AB ดังนั้นพลังงานที่ตกกระทบต่อวินาทีบนชั้นที่อยู่ลึก x คือ $I_0 e^{-\mu(AB)}$ (ergs/sec) เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (linear absorption coefficient) ของผงตัวอย่าง ให้ a เป็นเศษส่วนโดยปริมาตรของสารตัวอย่างที่มีอนุภาคเรียงตัวถูกต้องตามเงื่อนไขให้เกิดการสะท้อนต่อสารสกัดกระทบ และ b เป็นเศษส่วนของพลังงานที่ตกกระทบในหนึ่งหน่วยปริมาตรแล้วเกิดการเลี้ยวเบน ดังนั้นพลังงานที่เลี้ยวเบนต่อวินาทีจากชั้นผงตัวอย่างที่มีปริมาตร ldx คือ $abl I_0 e^{-\mu(AB)} dx$ แต่พลังงานที่เลี้ยวเบนนี้จะลดลงโดยการดูดกลืนด้วยแฟกเตอร์ $e^{-\mu(BC)}$ เมื่อรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนผ่านสารตัวอย่างระยะทาง BC ฟลักซ์พลังงาน (energy flux) ต่อวินาทีของลำรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนที่ออกจากสารตัวอย่างซึ่งก็คือความเข้มอินทิเกรตเขียนได้เป็น

$$dI_d = abl I_0 e^{-\mu(AB + BC)} dx \quad (\text{erg/sec}) \quad (3.9)$$

โดยที่ dI_d เป็นความเข้มอินทิเกรต (integrate intensity) ของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนบนปริมาตร ldx และ $l = \frac{1}{\sin \alpha}$, $AB = \frac{x}{\sin \alpha}$, $BC = \frac{x}{\sin \beta}$

$$\text{ดังนั้น} \quad dI_d = \left\{ \frac{I_0 ab}{\sin \alpha} \right\} e^{-\mu x \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \beta} \right)} dx \quad (3.10)$$

โดยการสกัดผ่านสารตัวอย่างในดิฟแฟร็กโตมิเตอร์จะได้ว่า $\alpha = \beta = \theta$ ดังนั้นสมการ (3.10) จึงเป็น

$$dI_d = \left\{ \frac{I_0 ab}{\sin \theta} \right\} e^{-2 \mu x / \sin \theta} dx \quad (3.11)$$

เมื่ออินทิเกรตภายใต้ความหนาเป็นอนันต์ (infinity) จะได้ความเข้มเลี้ยวเบนทั้งหมดเป็น

$$I_d = \int_{x=0}^{x=\infty} dI_d = \frac{I_0 ab}{2\mu} \quad (3.12)$$

โดยที่ I_0 , b และ μ เป็นค่าคงที่สำหรับการสะท้อน (ไม่ขึ้นกับ θ) ค่า a อาจกล่าวได้ว่าคงที่แม้ว่า a จะแปรตาม θ แต่ได้แก้ไขแล้วในเทอม $\cos\theta$ ของแฟคเตอร์ลอเรนซ์ (Cullity, 1978)

ดังนั้นสรุปได้ว่า แฟคเตอร์ การดูดกลืน $\frac{1}{2\mu}$ ไม่ขึ้นกับมุม θ สำหรับสารตัวอย่างแผ่นแบนราบ ซึ่งทำมุมกับรังสีตกกระทบและรังสีเลี้ยวเบนเท่ากัน โดยมีเงื่อนไขว่าสารตัวอย่างต้องถูกอบเต็มลำรังสีทุก ๆ ค่าของมุมและมีความหนาเป็นความหนาอนันต์ (infinite thickness) ซึ่งอาจให้ค่าสำคัญความได้ว่า ความหนาอนันต์คือ ความหนา t ของแผ่นสารตัวอย่างซึ่งทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนที่ด้านหลังเป็น $\frac{1}{1000}$ ของความเข้มเลี้ยวเบนที่ด้านหน้า

ดังนั้น จากสมการ (3.11) จะได้

$$\frac{dI_d (ที่ x = 0)}{dI_d (ที่ x = t)} = \frac{2\mu t / \sin\theta}{e} = 1000$$

ซึ่งจะได้ความหนา $t = \frac{3.45 \sin\theta}{\mu}$ ในหน่วยที่ขึ้นอยู่กับหน่วยของ μ

3.6 ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

การเกิดรังสีเอ็กซ์เป็นขบวนการแบบสุ่ม (random process) ซึ่งเป็นไปตามกฎทางสถิติ ดังนั้นความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของการนับข้อมูลตามธรรมชาติในแต่ละเหตุการณ์คือ

$$\sigma_{\text{count}} = \sqrt{N} \quad (3.13)$$

เมื่อ N คือค่าที่วัดได้

ในการวัดรังสีเอ็กซ์ของการสะท้อนต้องคำนึงถึงแบคกราวนด์ของการนับเสมอ ดังนั้น
พีคครึ่งจึงเป็น

$$N_p = N_T - N_{b_1} - N_{b_2} \quad (3.14)$$

โดยที่ N_T เป็นพีครวมและ N_{b_1} และ N_{b_2} เป็นพีคแบคกราวนด์ที่อยู่ 2 ข้าง
ของพีคที่พิจารณาความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ N_p กำหนดโดย

$$\sigma_p = \sqrt{N_T + N_{b_1} + N_{b_2}} \quad (3.15)$$

สมการ (3.15) คือความคลาดเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลง (fluctuation)
ทางสถิติของการนับรวมถึงเครื่องมือที่ไม่คงที่ ในการพิจารณาจากรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนซึ่งถูกวัด
เป็นช่วง ๆ และมีช่วงที่เป็นไปได้เป็น 0.01 ถึง 0.02 เท่าสำหรับเครื่องมือปัจจุบัน สมมติ
ค่าน้อยสุดเราจะได้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มเปรียบเทียบ I_R เป็น

$$\sigma_{I_R} = \sqrt{\sigma_p^2 + (0.01 \cdot N_p)^2} \quad (3.16)$$

ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแฟคเตอร์โครงสร้างหาจากสมการ

$$F = \frac{k}{\sqrt{LP}} \sqrt{I_R} \quad (3.17)$$

เมื่อ k เป็นแฟคเตอร์ สเกล (scale factor) และ LP คือ แฟคเตอร์
ลอเรนซ์ และโพลาไรเซชัน โดยดิฟเฟอเรนเชียลของสมการ (3.17) จะได้

$$dF = \frac{1}{2} \frac{k}{\sqrt{LP}} \frac{dI_R}{\sqrt{I_R}} \quad (3.18)$$

สมการ (3.18) ทหาร F ทั้งสองข้างและแทนค่าสมการ (3.17) ลงไปจะได้

$$\frac{dF}{F} = \frac{1}{2} \frac{dI_r}{I_r} \quad (3.19)$$

สมการ (3.19) ใช้ในกรณีความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย, ความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบใน F เป็นครึ่งหนึ่งของความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบใน I_r ถ้าเราประมาณ $dF = \sigma_F$ และ $dI_r = \sigma_{I_r}$ แทนค่าในสมการ (3.18) จะได้

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \frac{k}{\sqrt{L_p}} \frac{\sigma_{I_r}}{\sqrt{I_r}} \quad (3.20)$$

แทนค่าสมการ (3.16) ลงใน (3.20) จะได้

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \frac{k}{\sqrt{L_p}} \sqrt{\frac{\sigma_p^2 + (0.01 N_p)^2}{I_r}} \quad (3.21)$$

แทนค่า $N_p \equiv I_p$ จากสมการ (3.14) และ σ_p จากสมการ (3.15) จะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \frac{k}{\sqrt{L_p}} \sqrt{\frac{N_T + N_{b_1} + N_{b_2} + (0.01 N_p)^2}{N_T - N_{b_1} - N_{b_2}}} \quad (3.22)$$

3.7 เครื่องอินทิเกรเตอร์แพกเกจ

3.7.1 ออปเปอเรชันัล แอมพลิฟายเออร์ (Operational amplifier)

เรียกย่อ ๆ ว่า ออปแอมป์ (ยีน ภู่วรรณ, 2521) เป็นวงจรขยายแบบหนึ่งที่มีลักษณะดีเยี่ยม, ตามวัตถุประสงค์เดิมออกแบบเพื่อใช้ในอนาลอกคอมพิวเตอร์ (analog computer) ออปแอมป์ดังกล่าวสิ่งใช้ให้ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น การบวก, การลบ, การคูณด้วยตัวคงที่เป็นต้น ซึ่งราคาของออปแอมป์ในสมัยนั้นยังแพงมาก

ในระยะหลังได้มีผู้ผลิตออปแอมป์เป็นตัวไอซีที่มีขนาดเล็ก ๆ และราคาถูกลงจึงมีผู้นิยมใช้มากขึ้น ประโยชน์ของออปแอมป์จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

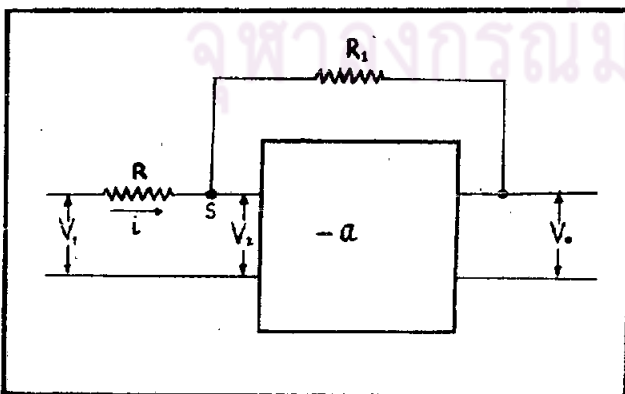
ส่วนสำคัญของออปแอมป์คือ เราสามารถกำหนดอัตราขยายให้กับออปแอมป์ได้โดยง่ายตามต้องการด้วย การต่อวงจรในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) ถ้าเราถือว่าออปแอมป์ที่ใช้เป็นอุดมคติจะต้องมีสมบัติเริ่มต้นดังนี้คือ

- ก. มีอัตราขยายสัญญาณเป็นอนันต์ (Infinity)
- ข. มีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า (input impedance) เป็นอนันต์หรือกล่าวได้ว่ากระแสขาเข้าเป็นศูนย์นั่นเอง
- ค. มีอิมพีแดนซ์ขาออกเป็นศูนย์
- ง. มีผลตอบสนองต่อความถี่ที่ได้จากสัญญาณกระแสตรง (direct current) ถึงความถี่อนันต์

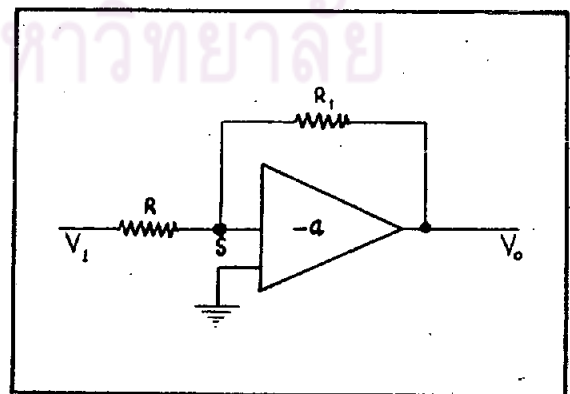
ถึงความถี่อนันต์

จากสมบัติของออปแอมป์อุดมคติทำให้เราทราบว่าไม่ว่าสัญญาณจะเป็นอย่างไร ออปแอมป์ก็สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับสัญญาณนั้น และถ้าต่อเชื่อมออปแอมป์กับวงจรอื่นก็จะมีผลทำให้วงจรอื่นทำงานผิดพลาดไปทั้งนี้เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของออปแอมป์เป็นอนันต์และอิมพีแดนซ์ขาออกเป็นศูนย์

3.7.2 ทฤษฎีออปเปอเรชันัล แอมพลิฟายเออร์ (Operational Amplifier)



รูปที่ 3.17 แสดงแผนภาพของวงจรออปแอมป์



รูปที่ 3.18 แสดงสัญลักษณ์ของวงจรออปแอมป์



รูปที่ 3.17 V_1 และ i เป็นโวลเตจและกระแสที่ป้อนเข้าไปยังวงจรออปแอมป์
 ฌ R และ R_1 เป็นตัวต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ที่ต่อกับตัวออปแอมป์ โดยมี R_1 ต่อกล่อมกับ
 ตัวออปแอมป์เพื่อจะทำหน้าที่ให้ส่วนหนึ่งของสัญญาณขาออกเกิดป้อนกลับ (feed back)
 เข้ามาที่ยขาเข้าทำให้ขยายสัญญาณได้ตั้งขึ้นกว่าเดิม V_2 เป็นโวลเตจที่ผ่านไปยังตัวออปแอมป์
 และ V_o เป็นโวลเตจขาออก โดยมี $-a$ เป็นค่าส่งขยายของออปแอมป์ (เครื่องหมาย
 ลบหมายถึง เป็นการขยายสัญญาณแบบกลับเฟส)

โดยการใชกฎการไหลของกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's current rule)
 พิจารณาที่จุด s เนื่องจากออปแอมป์มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงมาก ดังนั้นกระแสที่แยกเข้าออปแอมป์
 จึงถือว่าเป็นศูนย์ นั่นคือกระแสที่ผ่าน R จะเท่ากับกระแสที่ผ่าน R_1 หรือ

$$\frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_2 - V_o}{R_1} \quad (3.23)$$

แต่ $V_2 = -\frac{V_o}{a}$ เขียนใหม่เป็น

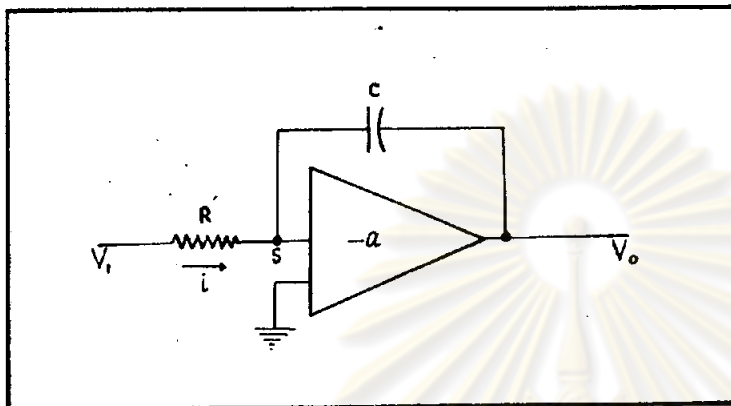
$$V_o \left(1 + \frac{1}{a} + \frac{R_1}{aR} \right) = -\frac{R_1}{R} V_1 \quad (3.24)$$

เนื่องจากค่าส่งขยายมีค่ามากดังนั้น

$$V_o \approx -\frac{R_1}{R} V_1 \quad (3.25)$$

สมการ (3.25) จะเห็นได้ว่าสัญญาณโวลเตจขาออกสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของ
 ค่า $\frac{R_1}{R}$ คูณกับโวลเตจขาเข้า สำหรับวงจรออปแอมป์ทั่ว ๆ ไปใช้สัญลักษณ์แสดงดังรูปที่ 3.18

3.7.3 วงจรอินทิเกรต (integrate circuit)

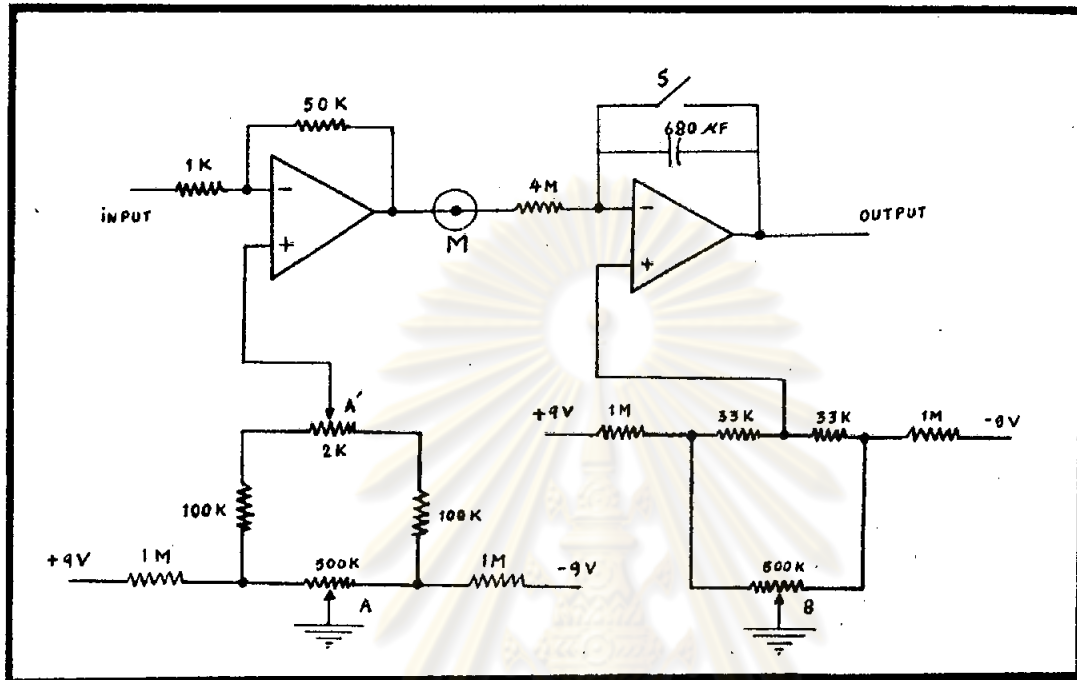


รูปที่ 3.19 แสดงวงจรอินทิเกรต

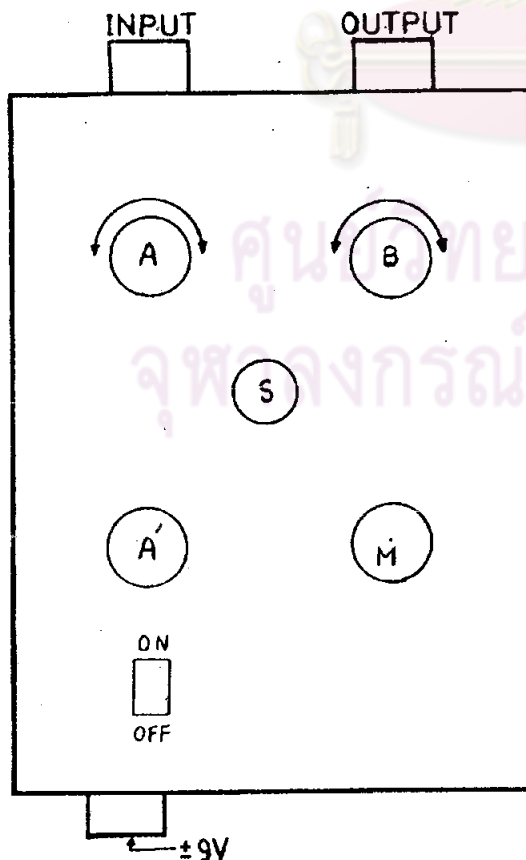
รูปที่ 3.17 เมื่อเราเปลี่ยน R_1 เป็นคอนเดนเซอร์ C วงจรจะเปลี่ยนไปเป็นรูปอินทิเกรเตอร์ พิจารณาทางด้านโวลเตจขาเข้า V_1 จะได้จุด 8 เสมือนต่อลงกราวนด์ (ground potential) คอนเดนเซอร์ C จะรับประจุได้โวลเตจ V_o โดย

$$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{q}{c} \\
 &= \frac{1}{c} \int_0^t i dt \\
 &= -\frac{1}{Rc} \int_0^t V_1 dt
 \end{aligned}$$

3.7.4 ส่วนสำคัญของอินทิเกรเตอร์แพกเกจ



รูปที่ 3.20 แสดงวงจรภายในแพกเกจ



รูปที่ 3.21 แสดงแพกเกจที่ประกอบแล้ว

แพกเกจมีใช้ $\pm 9V D C.$ ต่อจากภายนอก ภายในมีวงจรรอบเปอเรนเชียล แอมป์ไฟเออร์โดยใช้ไอซีเบอร์ 747 เครื่องมือออกแบบมาสำหรับใช้โวลเตจขาเข้าประมาณ ± 0.1 โวลต์

แอมป์ไฟเออร์ช่วงแรกมีขาออกอยู่ที่ M (Monitor) (รูปที่ 3.20) ซึ่งมีความส่งขยายประมาณ -50 เท่า ดังนั้นแพกเกจจึงสามารถใช้เป็นวงจรถ่ายสัญญาณได้โดยตรงที่ตำแหน่งขาออก M นี้

แอมป์ไฟเออร์ที่ส่งเป็นสัญญาณอินทิเกรตสัญญาณเวลาที่ใช้อินทิเกรตได้คงที่ประมาณ 4 นาที แต่แพกเกจอาจใช้อินทิเกรตสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying signal) ได้จนถึงประมาณ 10 นาที แต่สิ่งที่สำคัญคือกรณีที่สัญญาณอินทิเกรตออกมาทางขาออกมีขนาดเล็กกว่าที่เครื่องมือธรรมดาสามารถวัดได้ ก็จะต้องพิจารณาเลือกเครื่องวัดโวลเตจที่มีความไวสูงเข้าทำการวัดสัญญาณอินทิเกรตนั้น

3.7.5 การใช้เครื่องอินทิเกรเตอร์แพกเกจ

ก. ต่อ M (รูปที่ 3.21) เข้ากับเครื่องวัดโวลเตจเช่นเครื่องบันทึกกราฟแล้วเปิดสวิตช์ให้เครื่องทำงาน

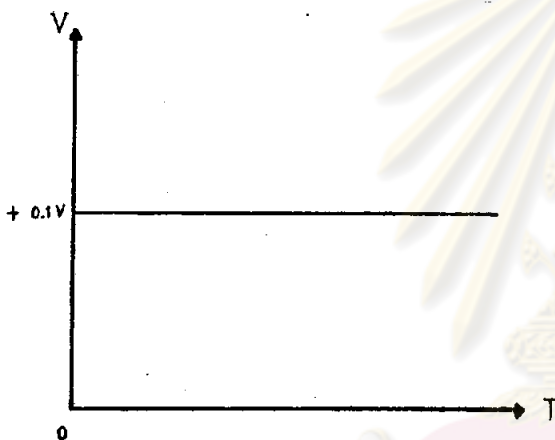
ข. ต่อกาวนต์ที่ขาเข้า (ไม่มีสัญญาณเข้าแพกเกจ) แล้วปรับปุ่ม "A" (ดูรูปที่ 3.21) จนกระทั่งสัญญาณที่ M มีโวลเตจเป็นศูนย์ (สังเกตจากเครื่องเขียนกราฟมีความชันเป็นศูนย์) โดยใช้ลิ้เกลของเครื่องวัดให้ไวเท่าที่จำเป็น

ค. ต่อเครื่องวัดโวลเตจเข้าที่ขาออก กดสวิตช์ S แล้วสังเกตโวลเตจขาออกเทียบกับเวลาปรับปุ่ม B จนกระทั่งโวลเตจขาออกมีค่าคงที่ (ศูนย์) เทียบกับเวลา กดสวิตช์ S เป็นครั้งคราวเพื่อปรับศูนย์ถ้าจำเป็น เครื่องอินทิเกรตขณะนี้พร้อมที่จะใช้วัดได้ ถ้าสัญญาณที่จะอินทิเกรตเริ่มต้นวัดจากศูนย์

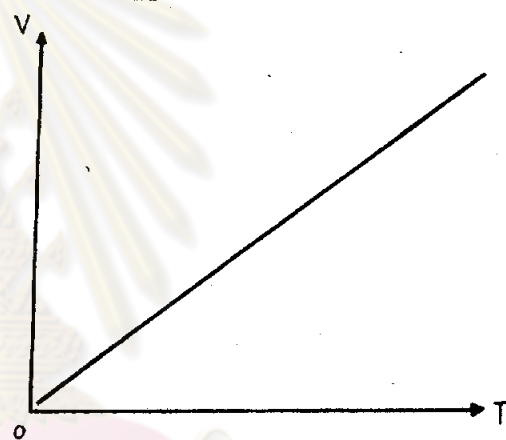
ง. ในการอินทิเกรตสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามเวลา นำสัญญาณเข้าทางขาเข้ากดสวิตช์ S เพื่อเริ่มต้นเวลาของการอินทิเกรต สัญญาณที่ถูกอินทิเกรตจะปรากฏที่เครื่องวัดโวลเตจทางขาออกทันทีที่ปล่อยสวิตช์ S เลือกใช้ความไวของเครื่องวัดโวลเตจที่เหมาะสม

จ. ในการอินทิเกรตสัญญาณที่เส้นฐานไม่เป็นศูนย์ (เช่นสูงกว่าแบบกราวนด์) และเราต้องการจะอินทิเกรตเพียงบางส่วนของสัญญาณเหนือเส้นฐานเท่านั้น สามารถทำได้ โดยตัดเส้นฐานนั้นออกไป ดังนี้: ขึ้นแรกเริ่มต้นอินทิเกรตสัญญาณเส้นฐาน (กตลวิทย์ s แล้วปล่อย) ขาออกบนเครื่องวัดโวลเตจจะปรากฏเป็นเส้นความชัน ปรับปุ่ม "A" (โดยไม่ได้ตั้งปุ่ม "B") จนกระทั่งสัญญาณที่ขาออกมีความชันเป็นศูนย์ ซึ่งอาจต้องกตลวิทย์ s อีกถ้าจำเป็น เมื่อได้เงื่อนไขความชันเป็นศูนย์แล้ว แพกเกจที่พร้อมที่จะอินทิเกรตสัญญาณเหนือเส้นฐาน

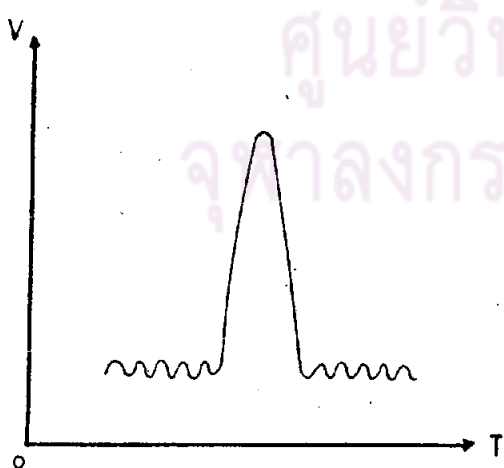
3.7.6 กราฟที่ได้จากการอินทิเกรต



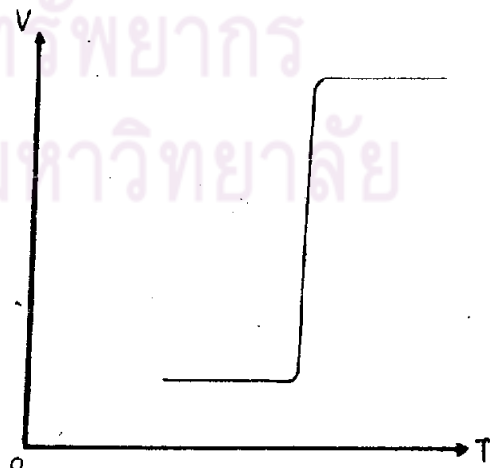
รูปที่ 3.22 แสดงกราฟที่จะอินทิเกรต



รูปที่ 3.23 แสดงกราฟที่ได้จากการอินทิเกรต



รูปที่ 3.24 แสดงกราฟที่จะอินทิเกรต



รูปที่ 3.25 แสดงกราฟที่ได้จากการอินทิเกรต

ตามรูปที่ 3.22 ภายหลังจากเราทำวิธีตามหัวข้อ 3.7.5 โดยปรับตามข้อ ก. ถึง ค. แล้วจากนั้นจึงอินทิเกรตตามข้อ ง. ก็จะได้กราฟตามรูปที่ 3.23

ตามรูปที่ 3.24 ภายหลังจากทำวิธีตามหัวข้อ 3.7.5 โดยปรับตามข้อ ก. ถึง ค. และ จ. แล้ว เราจึงอินทิเกรตตามข้อ ง. ก็จะได้รูปกราฟตามรูปที่ 3.25



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย