บทที่ 3

การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่ง

จากที่กล่าวมาแล้วว่าหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลแบบไวต่อตำแหน่งมีโครงสร้างเดียวกับหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลแบบธรรมดา แตกต่างกันที่เส้นลวดแอโนดต้องมีความต้านทานสูงมาก และขั้วต่อสัญญาณแอโนดจะต้องมี 2 ด้านสำหรับใช้วัดความแตกต่างของสัญญาณพัลส์ตำแหน่งหลังจากรังสีทำอันตรกิริยากับก๊าซตัวกลางที่บริเวณใดๆของเส้นลวดแอโนด หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลแบบไวต่อตำแหน่งที่ผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จะใช้เส้นลวดแอโนดชนิดควอตซ์ไพโรไลติกคาร์บอนซึ่งมีราคาแพงและมีใช้ในงานจำกัด ซึ่งทำให้ราคาของหัววัดรังสีแพงมาก ดังข้อมูลในภาคผนวก ค. ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่งที่มีราคาประหยัดใช้วัสดุที่หาได้ง่ายและมีสมรรถนะการทำงานทัดเทียมกับหัววัดรังสีที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

3.1 การออกแบบหัววัดรังสีที่ไวต่อตำแหน่ง

3.1.1 การเลือกขนาดและวัสดุใช้ทำหัววัดรังสี

การกำหนดขนาดของหัววัดรังสีและเลือกวัสดุองค์ประกอบของหัววัดรังสีมีแนวทางดังนี้

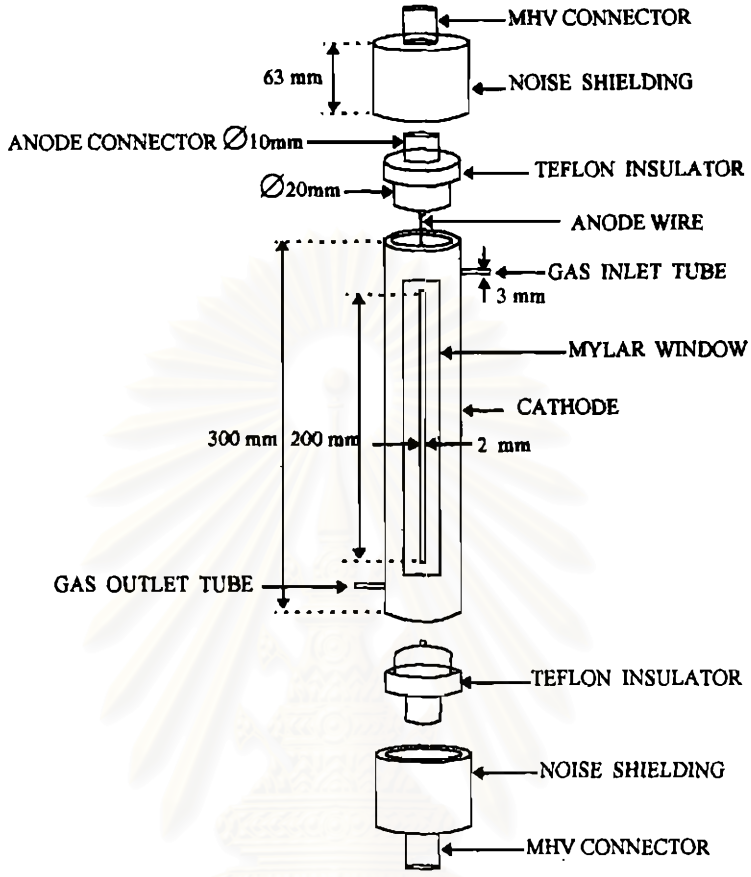
1. การออกแบบแคโทด เลือกกระบอกทรงกลมเนื่องจากหาได้ง่าย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแคโทดที่โตเกินไปจะต้องใช้ไบอัสที่มีศักดาไฟฟ้าสูงซึ่งมีข้อจำกัดด้านฉนวนและอุปกรณ์อื่น และถ้าเล็กเกินไปจะไม่สามารถทนศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้แอโนดเพียงพอที่จะสร้างสนามไฟฟ้าให้ทำงานในช่วงพรอพอร์ชันแนลได้ ในการออกแบบที่ประมาณช่วงศักดาไฟฟ้าระหว่าง 1000-2000 V จึงเลือกขนาดแคโทดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm และใช้ฉนวนแอโนดเป็นเทฟลอน (teflon) ซึ่งสามารถทนการเกิดอาร์ค (arc) ได้ ความยาวของแคโทดออกแบบให้ยาว 300 mm เพื่อให้เพียงพอต่อการศึกษาความสามารถในการแจกแจงพลังงาน และความไม่คงที่ในการแจกแจงตำแหน่ง

2. วัสดุที่ใช้ทำแคโทดเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้งานทั่วไปและมีราคาถูก ทนการกัดกร่อน ไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซตัวกลาง
3. ขนาดช่องหน้าต่างบนแคโทดมีขนาด 200×2 mm^2 เพื่อเป็นช่องทางให้รังสีเอกซ์ผ่าน นั่นคือบริเวณไวต่อรังสีมีความยาว 200 mm วัสดุที่ทำหน้าต่างใช้ไมลาร์ เนื่องจากออกแบบให้วัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ
4. แอโนดเลือกใช้สายไนลอน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดที่หาได้ประมาณ 110 μm เคลือบผิวด้วยคาร์บอนผงละเอียดให้ได้ความต้านทานในช่วง 8 kΩ/mm ขึ้นไป
5. ท่อนำก๊าซออกแบบให้มีขนาดทางไหลก๊าซเข้าและออก 3 mm ซึ่งเพียงพอให้ก๊าซมีอัตราไหล 1 liter/min
6. อุปกรณ์วัดอัตราไหลก๊าซใช้กระเปาะแก้วบรรจุน้ำอ่านค่าอัตราการเกิดฟองอากาศปรับเทียบกับอัตราไหลก๊าซ ควบคุมการไหลก๊าซด้วย gas regulator
7. ก๊าซวัดรังสีเลือกใช้ก๊าซอาร์กอนผสมมีเทน 10% หรือก๊าซ P-10

3.1.2 โครงสร้างของหัววัดรังสี

จากการพิจารณาขนาดและวัสดุที่ใช้ในการพัฒนาหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งในข้อ 3.1.1 ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างของหัววัดรังสีให้เหมาะสมกับการใช้งานดังในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

1. ขั้วต่อไฟฟ้าที่แอโนดชนิด MHV 2 ชุด
2. ฉนวนของขั้วต่อไฟฟ้าระหว่างแอโนดและแคโทดทำด้วยเทฟลอน (teflon) 2 ชุด
3. ฝาครอบป้องกันสิ่งรบกวนทางไฟฟ้า 2 ชุด
4. กระบอกแคโทดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ยาว 300 mm หนา 2 mm
5. หน้าต่างรับรังสีทำด้วยไมลาร์หนา 0.3 mg/cm^2
6. สายลวดแอโนดความต้านทานสูง 50 kΩ/mm
7. ท่อนำก๊าซ P-10 เข้าและออกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm

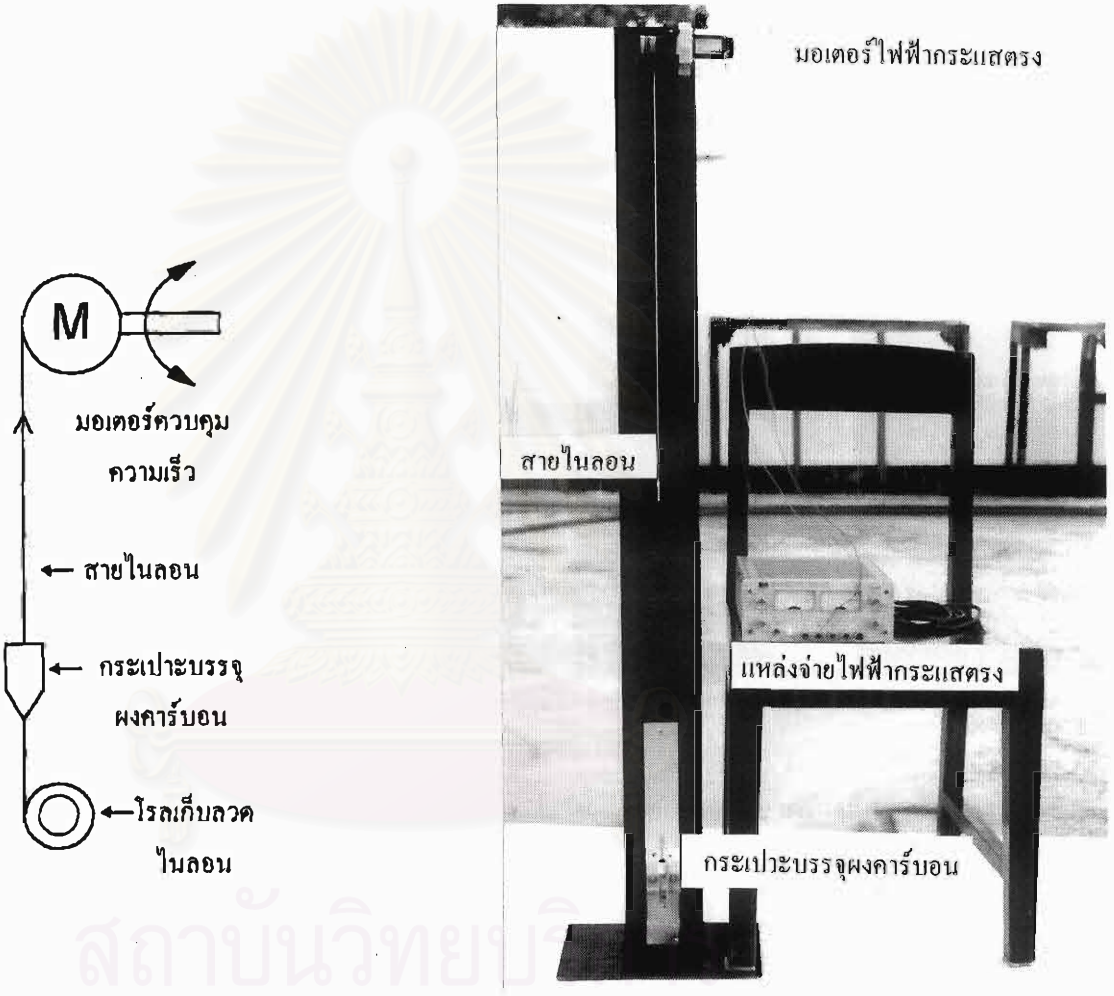


รูปที่ 3.1 แบบโครงสร้างหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

3.2 การสร้างสายแอโนดความต้านทานสูง

สายแอโนดความต้านทานสูงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดที่ไวต่อตำแหน่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดแอโนดมีขนาดเล็กระดับ μm ความต้านทานสูงระดับ kΩ/mm การสร้างเส้นลวดแอโนดความต้านทานสูงทำได้ลำบากมาก ในระยะแรกใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาและสายควอตซ์ออฟติคอลไฟเบอร์เคลือบด้วยคาร์บอนสเปรย์สำหรับซ่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าพบว่าการเกาะบนผิวไม่สม่ำเสมอและแตกหลุดง่าย สิ้นเปลืองมาก จึงเปลี่ยนมาใช้วิธีการผสมผงคาร์บอนความละเอียดสูงกับแลคเกอร์และทาบนเส้นลวดทองแดงอาบน้ำยา การเกาะติดไม่ดีและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งความไม่สม่ำเสมอของความต้านทานต่อระยะทางมีผลอย่างมากต่อความเป็นเชิงเส้นของการบ่งชี้ตำแหน่ง

การสร้างเส้นลวดแอโนดความต้านทานสูงระยะต่อมาใช้สายไนลอนขนาดเล็กเคลือบผิวด้วยผงคาร์บอนความละเอียดสูงผสมแลคเกอร์ในสัดส่วนที่พอดีจะทำให้การจับผิวดีมาก แต่ไม่สม่ำเสมอ จึงได้ออกแบบเครื่องมือเคลือบผิวที่มีการเคลื่อนตัวของสายไนลอนผ่านกระเปาะใส่ผงคาร์บอนผสมแลคเกอร์ดังในรูปที่ 3.2



ก. แผนภาพเครื่องมือเคลือบผิวเส้นลวด ข. ภาพถ่ายเครื่องมือที่ออกแบบขึ้น

รูปที่ 3.2 เครื่องมือสำหรับสร้างสายแอโนดความต้านทานสูง

ส่วนของมอเตอร์หมุนม้วนลากสายไนลอนเลือกใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทดเฟือง (DC gear Motor) Model OMS-324 ขนาดพิกัด 24 V 2 W สามารถปรับความเร็วรอบได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ แกนทดเฟืองมอเตอร์ไฟฟ้าต่อเชื่อมตรงกับแกนหมุน ส่วนของชุดเคลือบผงคาร์บอนประกอบด้วยม้วนเก็บสายไนลอนซึ่งจับยึดกับโครงอะลูมิเนียม มีสาย

ไนลอนร้อยผ่านไปยังม้วนหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจะดึงสายไนลอนผ่านกระเปาะเคลือบคาร์บอนโดยมีระยะห่างพอดีที่จะทำให้ผิวเคลือบแห้งสนิทก่อนม้วนเก็บ

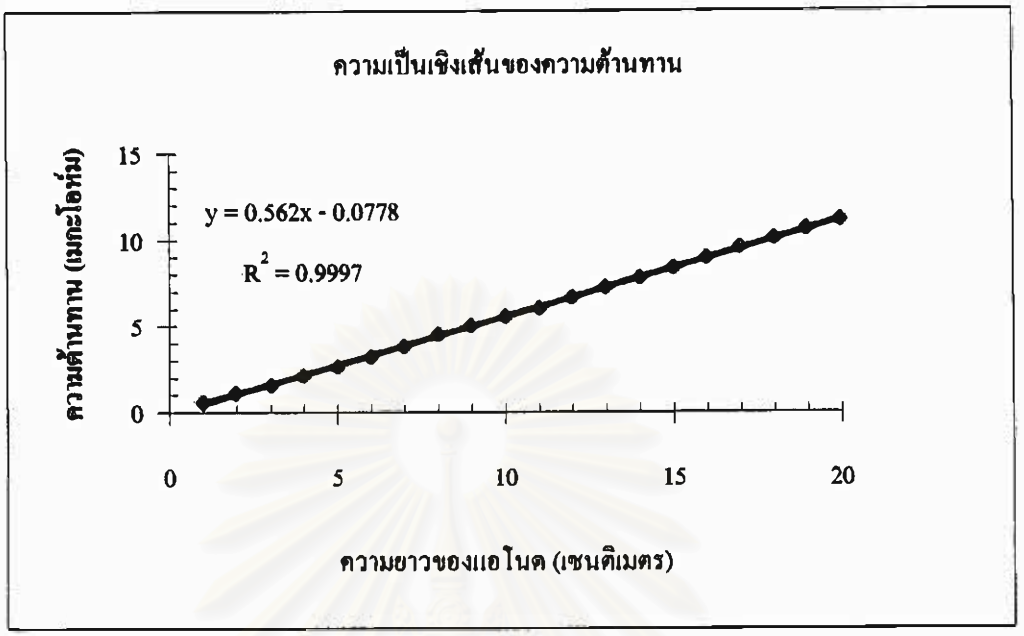
ผลการเคลือบผิวไนลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 μm ด้วยการเคลื่อนความเร็วสายไนลอนผ่านกระเปาะเคลือบผงคาร์บอน 60 m/hr พบว่าได้ความต้านทาน 50 kΩ/mm เปรียบเทียบผิวเคลือบระหว่างการเคลือบด้วยการดึงสายไนลอนผ่านผ้าชุบคาร์บอนด้วยมือกับการเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในรูปที่ 3.3 ก.และ ข. จะเห็นว่าผิวของการเคลือบด้วยเครื่องสม่ำเสมอกว่า และได้ทดสอบการวัดความต้านทานต่อความยาวเส้นลวด พบว่าให้ความเป็นเชิงเส้น ดังกราฟในรูปที่ 3.4

ก. ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสายแอโนดไนลอนที่เคลือบผิวผงคาร์บอนด้วยผ้าชุบ

ข. ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสายแอโนดไนลอนที่เคลือบผิวผงคาร์บอนด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเคลือบแอโนด

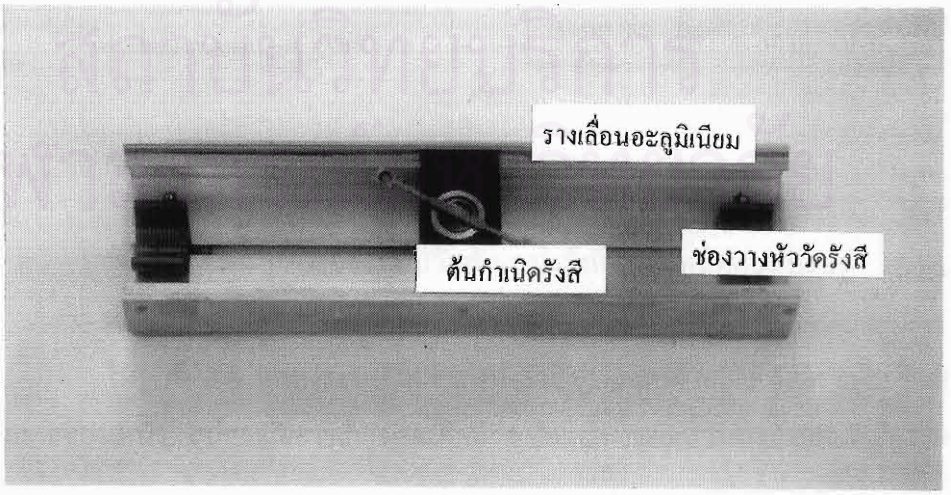
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของความต้านทานแอโนด

3.3 การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งการวัดรังสี ประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสี เหล็ก-55 (Fe-55) ความแรง 5 mCi ที่จัดช่องบังคับลำรังสี (collimator) ซึ่งทำด้วยตะกั่วหนา 3 mm เจาะช่องขนาด 0.4 mm เคลื่อนอยู่บนรางเลื่อนอะลูมิเนียม ซึ่งมีสเกลบอกระยะทางจาก 0-20 cm วางอยู่เหนือหัววัดรังสี ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

3.4 การออกแบบระบบวัดตำแหน่งรังสี

ระบบวัดตำแหน่งรังสีที่ตกกระทบหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งสามารถวัดได้ 2 ระบบคือ การวัดสัดส่วนประจุ และการวัดเวลาขาขึ้น ในการวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์วัดมาตรฐาน NIM ที่ให้ฟังก์ชันการทำงานตามหลักการวัดที่กล่าวไว้ใน บทที่ 2 และออกแบบวงจรบางส่วนเพิ่มเติม ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของหัววัดรังสี

คุณสมบัติของหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดก๊าซไหลแบบไวต่อตำแหน่งที่ออกแบบขึ้น

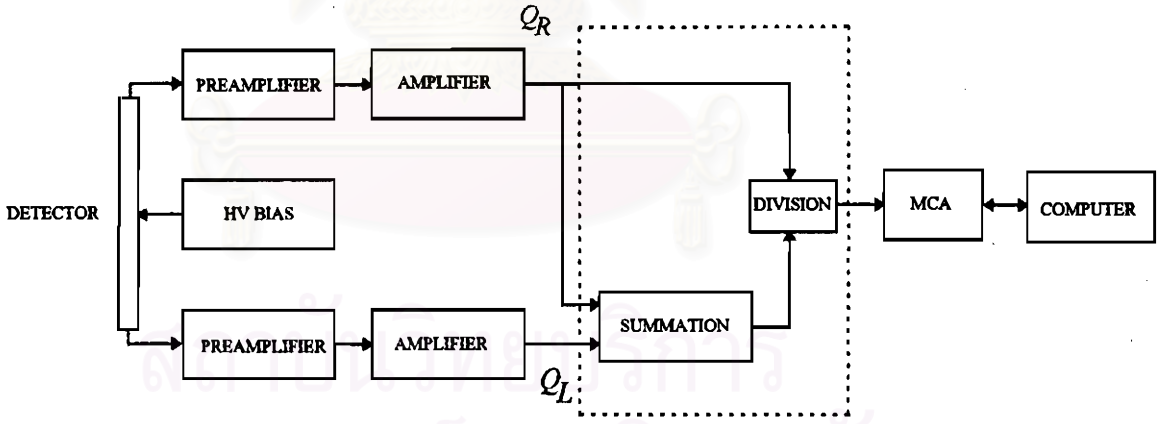
Collector resistance (R_0) = 50 kΩ/mm

Sensitive length = 200 mm

Collector capacitance(C_0) = 7.398×10^{-15} F/mm

HV = 2475 V

3.4.1 ระบบวัดตำแหน่งรังสีด้วยการวัดสัดส่วนประจุ



รูปที่ 3.6 แผนภาพการจัดระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ

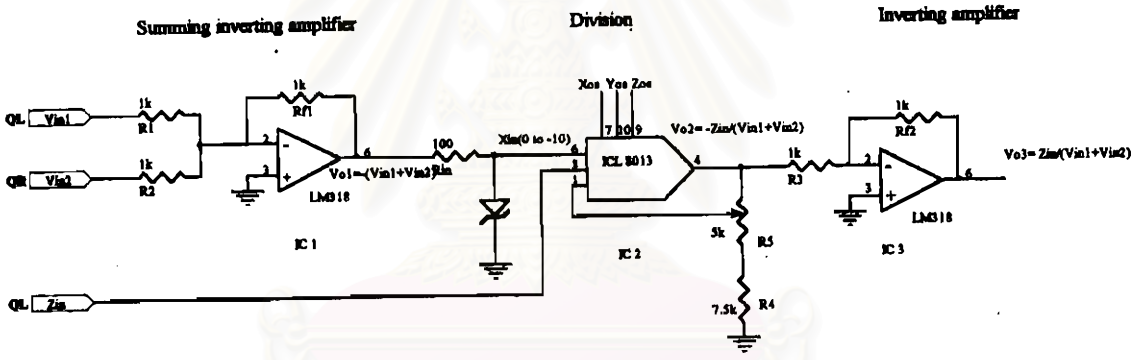
ในรูปที่ 3.6 แสดงระบบวัดตำแหน่งรังสีประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง อุปกรณ์ขยายส่วนหน้า อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ อุปกรณ์หารสัดส่วนประจุและเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับไบอัสหัววัดรังสีจะต้องปรับค่าได้ในช่อง 0-2500 V จ่ายกระแสได้ 100 μA มีเสถียรภาพการทำงานสูง

อุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้าเป็นแบบไวต่อประจุ (charge sensitive amplifier) จัดวงจรวัดแบบพัลส์ (pulse type) มีความไวประจุ 470mV/MeV decay pulse 50 μs

อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ สามารถปรับอัตราขยายได้ในช่วง 5-2500 เท่าปรับ shaping time 0.5-3 μs ให้สัญญาณออกแบบ unipolar

สัญญาณพัลส์จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ Q_L และ Q_R จะนำเข้าวงจรวัดสัดส่วนประจุซึ่งเป็นวงจรหารอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเลือกใช้ IC เบอร์ ICL8013 ออกแบบวงจรหารดังในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรหารสัดส่วนประจุ

จากวงจรในรูปที่ 3.7 วงจรหารสัดส่วนประจุ ประกอบด้วย IC_1 LM318 จัดรูปแบบวงจรแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier) IC_2 เป็นวงจรหารอนาลอกและ IC_3 LM318 จัดวงจรขยายแบบกลับสัญญาณ (inverting amplifier)

IC_1 ออปแอมป์เบอร์ LM 318 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณรวมโดยที่มีอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 1 โดยที่สัญญาณแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} ถูกนำมารวมกันแรงดันเอาต์พุต (V_o) จะมีค่าเท่ากับ

$$V_o = -\left[\frac{R_{f1}}{R_1}V_{in1} + \frac{R_{f1}}{R_2}V_{in2}\right]$$

$$V_0 = -(V_{in1} + V_{in2}) \qquad \text{.....(3.1)}$$

IC_2 เบอร์ ICL8013 (รายละเอียดในภาคผนวก ข.) จัดวงจรภายนอกให้ IC_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรหารอนาลอกโดยได้สัญญาณ V_o เป็นดังสมการ

$$V_o = \frac{Z_{in}}{X_{in}} \qquad \text{.....(3.2)}$$

สัญญาณทางออกเป็นสัญญาณด้านลบ

หรือ $$V_0 = -\frac{Q_L}{Q_L + Q_R}$$

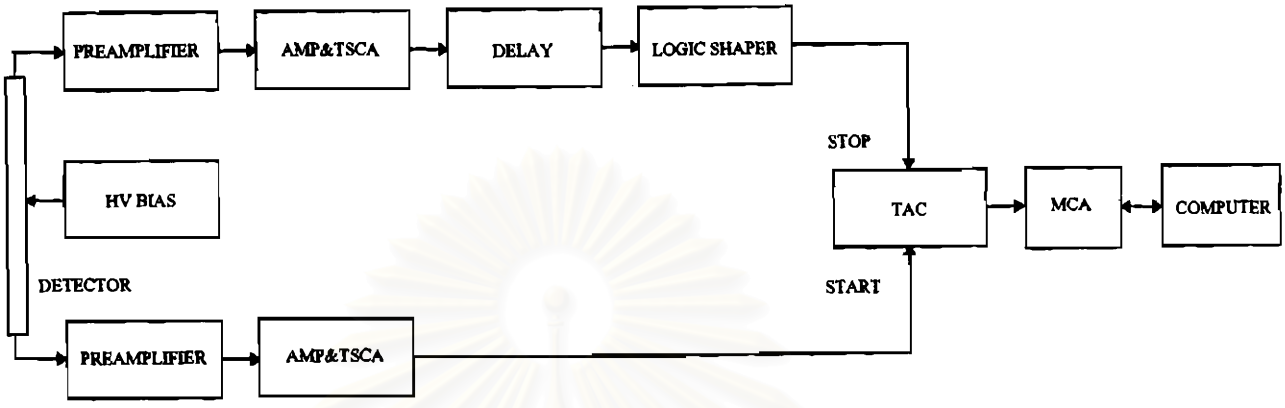
IC_3 เบอร์ LM 318 การต่อวงจรภายนอกให้ ออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณโดยที่มีอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 1 โดยได้สัญญาณเอาต์พุต (V_0) ตรงข้ามกันกับสัญญาณอินพุต (V_1) แรงดันเอาต์พุตจะได้ดังสมการ

$$V_0 = -\frac{R_{f2}}{R_3}V_1 \qquad \text{.....(3.3)}$$

หรือ $$V_0 = \frac{Q_L}{Q_L + Q_R}$$

สัญญาณพัลส์ที่มีความสูงเป็นสัดส่วนกับตำแหน่งของรังสีบนแอโนดจะส่งให้กับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องสร้างแพทเทอร์นตำแหน่งวัดรังสีและถ่ายโอนข้อมูลให้ไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างภาพต่อไป

3.4.2 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดเวลาขาขึ้น



รูปที่ 3.8 แผนภาพระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดเวลาขาขึ้น

ในรูปที่ 3.8 แสดงระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดเวลาขาขึ้น โดยพิจารณาพารามิเตอร์ของหัววัดรังสีเสมือนสายส่งไฟฟ้า (RC distributed) ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดสัญญาณส่วนหน้า ทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง และอุปกรณ์ขยายส่วนหน้าเหมือนกับระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ ตามด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งสัญญาณ (timing module) อุปกรณ์หน่วงเวลาสัญญาณพัลส์ (delay module) และอุปกรณ์แปลงผันเวลาเป็นความสูงพัลส์

จากแผนภาพได้ประยุกต์การทำงานภายใน TSCA แทนอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งสัญญาณและใช้ discriminator แทนวงจรแต่งรูปสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณลอจิก

อุปกรณ์หน่วงเวลาปรับค่าหน่วงเวลาได้จาก 0μs ถึง 4.75μs จำนวน 2 โมดูล

อุปกรณ์แปลงผันเวลาเป็นสัญญาณพัลส์ TAC มีเวลาแปลงผันแปรเปลี่ยนได้จาก 20 ns ถึง 1000×10^{3} ns

สัญญาณตำแหน่งเวลาที่แปลงผันเป็นขนาดความสูงของพัลส์ จะส่งเข้าวิเคราะห์แพทเทอร์นตำแหน่งวัดรังสีและถ่ายโอนข้อมูลให้ไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างภาพต่อไป

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

จากโครงสร้างของหัววัดรังสี เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm ความยาว 300 mm ขนาดของลวดแอโนด 110 μm สามารถคำนวณหาคุณสมบัติของการทำงานของหัววัดรังสีได้ดังนี้

1. คำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำงานระหว่าง 2000-2500 V

จากสมการที่ 2.6 $$\varepsilon_r = \frac{V_0}{\ln(b/a)}\frac{1}{r}$$

ที่ 2000 V $$= \frac{1}{(55\times10^{-4})}\frac{2000}{\ln\left(\frac{1}{55\times10^{-4}}\right)}$$

$$= 6.9889\times10^{3} \quad \text{kV/m}$$

ที่ 2500 V $$= \frac{1}{(55\times10^{-4})}\frac{2500}{\ln\left(\frac{1}{55\times10^{-4}}\right)}$$

$$= 8.7362\times10^{3} \quad \text{kV/m}$$

หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลที่ออกแบบมีความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่าง 6.9889×10^{3} kV/m ถึง 8.7362×10^{3} kV/m

2. ค่าความจุของหัววัดรังสีเมื่อพิจารณาในรูปสมมูลย์สายส่งสัญญาณ (RC line distribution)

จากสมการ $$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\frac{D}{d}}$$

$$= \frac{2\pi(8.8419\times10^{-12})}{\ln\left(\frac{200\times10^{3}}{110}\right)}$$

$= 7.398\times10^{-12}$ F/m

3. ค่าความต้านทานของ anode resistance จากการเคลือบผิวด้วยคาร์บอน ละเอียดมีค่า 50 kΩ/mm

4. จากสมการที่ 2.26 สามารถประเมินหาค่า Spatial sensitivity ได้ดังนี้

$$S = R_0(C_0L + 2C_c)$$

C_c มีค่าน้อยมาก ๆ

$$S = R_0C_0L$$

$= (50\times10^{3})(7.398\times10^{-15})(300)$

$= 0.1110$ μs/mm หรือ 111 ns/mm

5. ปริมาณค่าทวีปริมาณของก๊าซ P-10 ขณะวัดพลังงาน 5.9 keV

ต้องการขนาดของสัญญาณจาก preamplifier 1 V

preamplifier มีความไว 235 mV/Mion-pair

นั่นคือขนาดสัญญาณ 235 mV ต้องการ 1 Mion-pair

$\therefore$ 1000 mV ต้องการ $\frac{10^3}{235}$

N $= 4.25$ Mion-pair

ปริมาณประจุบนสายแอโนดขณะวัด $= Nq = (4.25\times10^{6})\times1.6\times10^{-19}$C

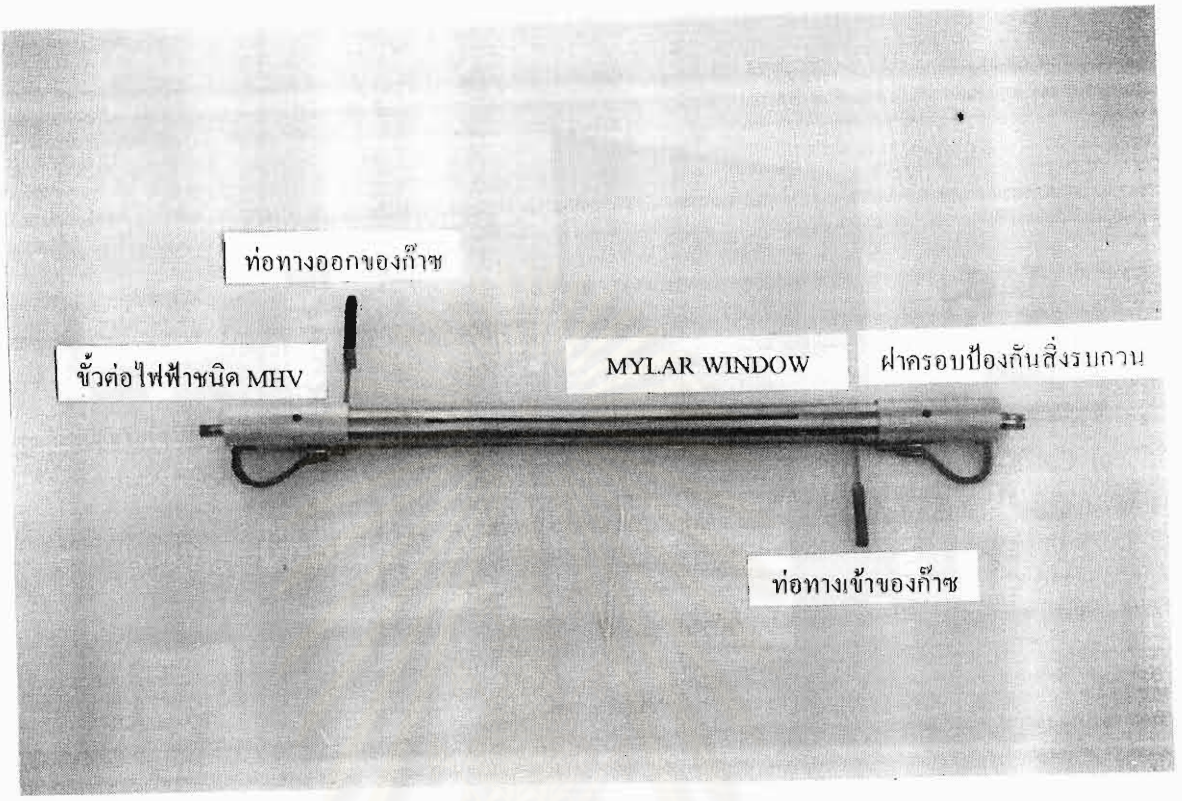
$Q = 6.8\times10^{-13}$ C

จากตารางที่ 2.1 ค่า W ของก๊าซ P-10 = 26 eV/ion-pair

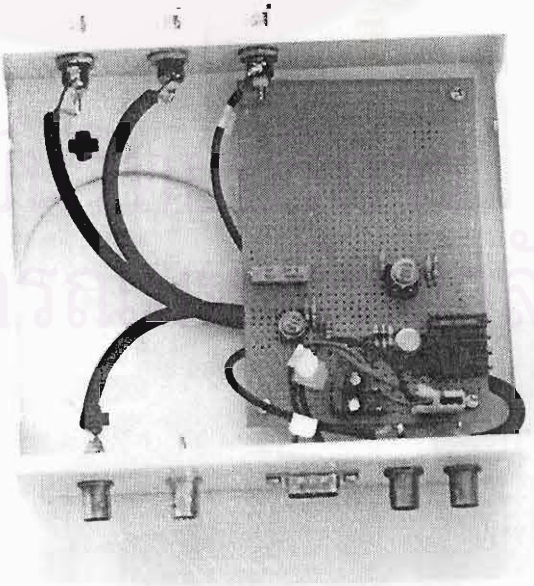
จากสมการที่ 2.1 $Q = MNq = M\frac{E}{W}.q$

หรือ $M = \frac{Q\times W}{Eq} = \frac{6.8\times10^{-13}\times26}{5.9\times10^{3}\times1.6\times10^{-19}}$

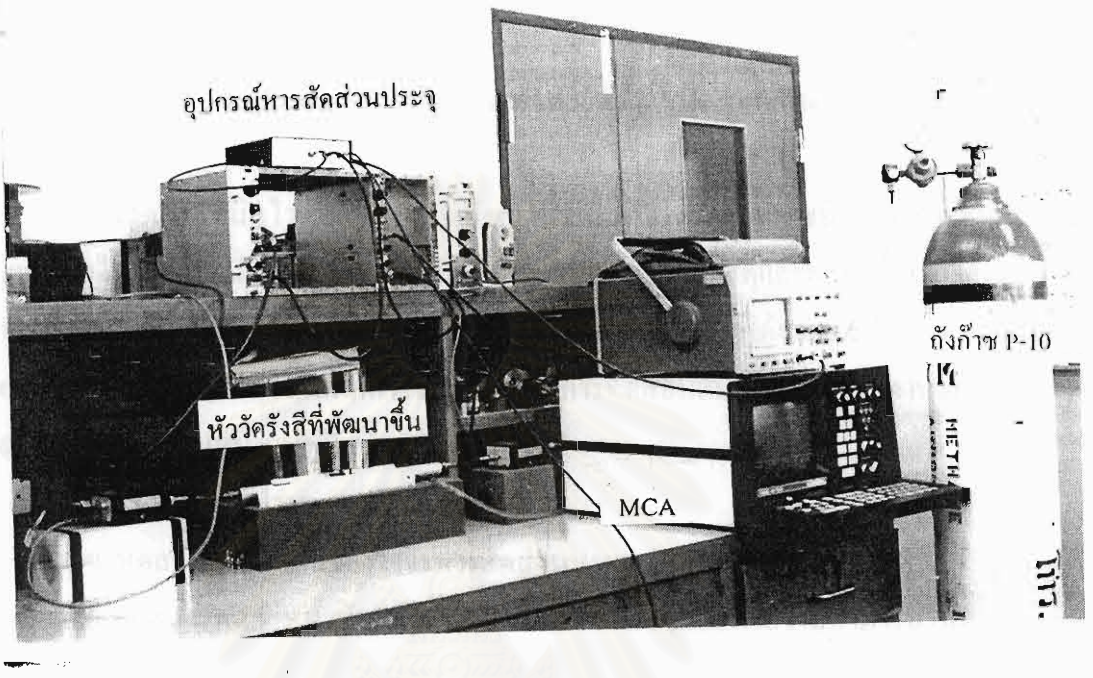
gas multiplication factor $= 1.87\times10^{4}$



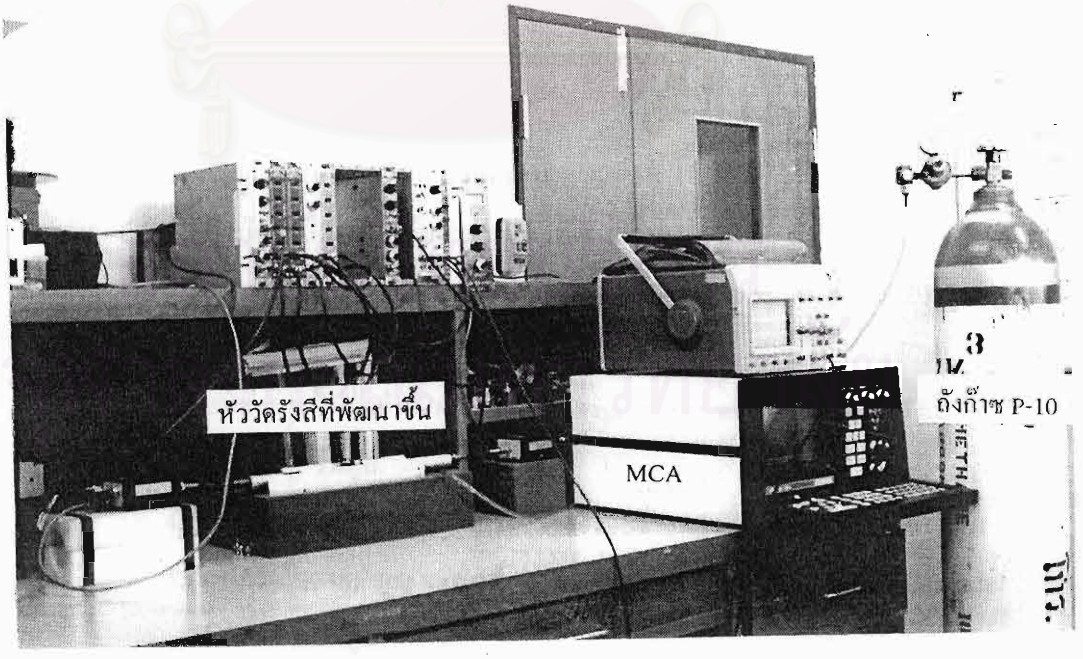
รูปที่ 3.9 หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลแบบไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์หารสัดส่วนประจุ



รูปที่ 3.11 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ



รูปที่ 3.12 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดเวลาขาขึ้น