

การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่งราคาประหยัด

นาย อติศักดิ์ ปิณฑานุช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำรงหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-408-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DEVELOPMENT OF AN ECONOMICAL POSITION-SENSITIVE
GAS FLOW PROPORTIONAL X-RAY DETECTOR**



Mr. Adisak Punyanut

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Nuclear Technology
Department of Nuclear Technology**

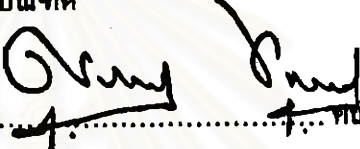
**Graduate School
Chulalongkorn University**

Academic Year 1998


ISBN 974-332-408-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่ง
ราคาประหยัด
โดย นาย อคิศักดิ์ ปัญญาบุษ
ภาควิชา นิเวศวิทยเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

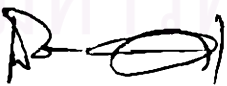

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูดีวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


.....กรรมการ
(อาจารย์ เคโซ ทองอร่าม)

อดิศักดิ์ ปัญญาบุษ : การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่งราคาประหยัด
(DEVELOPMENT OF AN ECONOMICAL POSITION-SENSITIVE GAS FLOW PROPORTIONAL
X-RAY DETECTOR) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. สุวิทย์ ปุณณช้อยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ผศ. นรศรี จันทน์ขาว ;
95 หน้า. ISBN 974-332-408-9

ได้พัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่งแบบประหยัดสำหรับใช้วัดตำแหน่งการ
ไอออไนซ์ของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายแคโทดของหัววัดรังสีเอกซ์ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 304
ทรงกระบอกกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm หนา 1 mm ยาว 300 mm จัดช่องหน้าต่างรับรังสีขนาดกว้าง 2
mm ยาว 200 mm ใช้แผ่นไมลาร์ความหนา 0.3 mg/cm² เป็นหน้าต่างรับรังสี ส่วนแอโนดความดันทานสูงซึ่งเป็นส่วน
ประกอบสำคัญของหัววัดรังสีที่ไวต่อตำแหน่งทำจากสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 μ m เคลือบด้วยผงคาร์บอน
ละเอียด โดยควบคุมขนาดและความสม่ำเสมอของความดันทานได้ด้วยความเร็วรอบของเครื่องกรอสายถวด เส้นแอโนด
ความดันทานสูงที่ทำอย่างง่ายดังกล่าว สามารถใช้แทนเส้นแอโนดที่ผลิตจากควอตซ์ไฟเบอร์เคลือบไพโรไลติกคาร์บอนซึ่ง
มีราคาสูงได้ดี สำหรับหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น ใช้เส้นแอโนดที่มีความดันทาน 50 k Ω /mm และก๊าซอาร์กอน-มีเทน (P-10)
ที่อัตราไหลของก๊าซ 1 liter/min มีช่วงพลาคี 2400 V-2800 V

จากผลทดสอบการวัดตำแหน่งรังสีเอกซ์ด้วยต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ Fe-55 พลังงาน 5.9 keV ความแรง 5 mCi ซึ่ง
จัดช่องบังคับลำรังสีขนาด 0.4 mm เปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่างวิธีการวัดสัดส่วนประจุและวิธีการวัดเวลาขาขึ้นของ
สัญญาณพัลส์ พบว่าความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งและความเป็นเชิงเส้นของการวัดตำแหน่ง ด้วยวิธีวัดสัดส่วน
ประจุ (charge division) เท่ากับ 7 mm FWHM และ 0.941 ตามลำดับ ขณะที่การวัดตำแหน่งด้วยวิธีวัดเวลาขาขึ้นของพัลส์ (rise
time) ให้ผลของความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งและความเป็นเชิงเส้นดีขึ้นเป็น 1 mm FWHM และ 0.999 ตามลำดับ
การเสริมคุณภาพของการวัดตำแหน่งด้วยวิธีวัดสัดส่วนประจุต้องการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนในทางตรงกันข้ามพบว่าการ
วัดตำแหน่งด้วยวิธีการวัดเวลาขาขึ้นให้คุณภาพสูงกว่าและมีระบบวัดที่ง่ายกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี
สาขาวิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิสิต ^{อดิศักดิ์} ปัญญาบุษ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ^{สุวิทย์} ปุณณช้อยะ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ^{นรศรี} จันทน์ขาว

818856 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: POSITION-SENSITIVE DETECTOR / PROPORTIONAL COUNTER / GAS FLOW COUNTER / X-RAY
DETECTION / CHARGE DIVISION
ADISAK PUNYANUT : DEVELOPMENT OF AN ECONOMICAL POSITION-SENSITIVE GAS FLOW
PROPORTIONAL X-RAY DETECTOR. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA,
THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. NARES CHANKOW, 95 pp. ISBN 974-332-408-9

An economical position sensitive x-ray proportional gas flow detector was developed with the purpose to locate ionizing events of low energy x-ray by utilizing only simple construction materials. The detector's cathode was made from a 1 mm thick 304 stainless steel pipe with an inner diameter of 20 mm and a total length of 300 mm. A 0.3 mg/cm² thick mylar sheet was employed as an x-ray entrance window, covering an area of 2 mm in width and 200 mm in length, on the cathode. The high resistance anode, which is an important part of any position sensitive detectors, was made out of a 110 μm nylon wire coated with fine grain carbon via the use of a speed controllable winding machine providing a uniform thickness and resistance across the wire. The developed anode wire has a resistance of 50 kΩ/mm which is compatible to a commercial pyrolytic carbon coated quartz fiber. The P-10 detecting gas was used at a flow rate of 1 liter/min resulting in the operating plateau between 2400-2800 volts.

Both position determining methods either by charge division or rise time measurements were tested using a 5 mCi Fe-55 x-ray source yielding an x-ray energy of 5.9 keV with its beam collimated down to 0.4 mm. The spatial resolution and linearity obtained using the charge division method was found to be 7 mm FWHM and 0.941, respectively; while the rise time method yielded a spatial resolution of 1 mm FWHM and linearity of 0.999. To improve the spatial resolution of the charge division method, a complex electronic circuit is needed; on the contrary, the rise time method was found to give a better linearity and spatial resolution with relatively simple detection system.

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และอาจารย์เคโซ ทองอร่าม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยด้วยดีมาตลอดผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การอุดหนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้การอุดหนุนทุนการศึกษาตลอดหลักสูตร

ขอขอบคุณ คุณวิมล ทรัพย์ส่งสุข คุณบัญชา อุphanix คุณทวีศักดิ์ กิระวิทยา คุณอุริษ อักษรโคสิด และคุณกุสุมา สุขชู รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตภาควิชานิเทศศาสตร์เทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจเสมอมา ที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ณ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากการวิจัยนี้..... | 2 |
| 2. หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลแบบไวต่อตำแหน่ง..... | 3 |
| 2.1 หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล..... | 3 |
| 2.1.1 การทวีปริมาณไอออนในก๊าซ..... | 6 |
| 2.1.2 การออกแบบหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล..... | 9 |
| 2.1.3 สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสี..... | 10 |
| 2.1.4 ความสัมพันธ์ของอัตรานับรังสีกับไบอัสของหัววัดรังสี..... | 14 |
| 2.1.5 หัววัดรังสีแบบก๊าซไหล..... | 15 |
| 2.2 หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง..... | 17 |
| 2.2.1 โครงสร้างของหัววัดรังสี..... | 17 |
| 2.2.2 ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง..... | 18 |
| 2.3 ระบบวัดรังสีสำหรับการวัดตำแหน่งรังสี..... | 20 |
| 2.3.1 ระบบวัดรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ..... | 20 |
| 2.3.1.1 หลักการวัดสัดส่วนประจุ..... | 20 |
| 2.3.1.2 วงจรหารอนาตอก..... | 21 |

| | |
|--|----|
| 2.3.1.3 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวิธีวัดสัดส่วนประจุ..... | 22 |
| 2.3.2 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทม 23 | 23 |
| 2.3.2.1 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทมชนิด | |
| วัดสัญญาณ 2 ทาง..... | 23 |
| 2.3.2.2 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทมชนิด | |
| วัดสัญญาณทางเดียว..... | 26 |
| 3. การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนทก๊าซไหล | |
| ที่ไวต่อตำแหน่ง..... | 29 |
| 3.1 การออกแบบหัววัดรังสีที่ไวต่อตำแหน่ง..... | 29 |
| 3.1.1 การเลือกขนาดและวัสดุใช้ทำหัววัดรังสี..... | 29 |
| 3.1.2 โครงสร้างของหัววัดรังสี..... | 30 |
| 3.2 การสร้างสายเอโนดความดันทานสูง..... | 31 |
| 3.3 การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง..... | 34 |
| 3.4 การออกแบบระบบวัดตำแหน่งรังสี..... | 35 |
| 3.4.1 ระบบวัดตำแหน่งรังสีด้วยการวัดสัดส่วนประจุ..... | 35 |
| 3.4.2 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดเวลาขาขึ้น..... | 38 |
| 4. ผลการทดสอบการทำงานของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง..... | 43 |
| 4.1 การทดสอบการทำงานของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง..... | 43 |
| 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ..... | 43 |
| 4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 44 |
| 4.2 การทดสอบวงจรหารสัดส่วนประจุ..... | 47 |
| 4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง..... | 47 |
| 4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 47 |
| 4.3 ทดสอบการวัดตำแหน่งและหาความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง..... | 48 |
| 4.3.1 ทดสอบการวัดตำแหน่งและความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง | |
| แบบวัดสัดส่วนประจุ..... | 48 |
| 4.3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง..... | 48 |
| 4.3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 49 |
| 4.3.2 ทดสอบการวัดตำแหน่งและหาความสามารถใน | |
| การแจกแจงตำแหน่งแบบวัดเวลาขาขึ้น..... | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ..... | 51 |
| 4.3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบความสัมพันธ์ของความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งกับการ ไบอัส..... | 52 |
| 4.3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบการวัดตำแหน่งและความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง..... | 57 |
| 4.4 ทดสอบความสามารถในการวัดตำแหน่งแบบโปรไฟล์..... | 60 |
| 4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ..... | 60 |
| 4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 62 |
| 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 66 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 66 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 67 |
| รายการอ้างอิง..... | 68 |
| ภาคผนวก ก. | 70 |
| ภาคผนวก ข. | 78 |
| ภาคผนวก ค. | 80 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 95 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถใน การแจกแจงพลังงานของก๊าซต่างๆ..... | 9 |
| ตารางที่ 2.2 Prototype position-sensitive detectors..... | 28 |
| ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวงจรหารสัดส่วนประจุ..... | 47 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| | หน้า | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.1 | การทำงานของหัววัดรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนท..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 | หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนทชนิดบรรจุก๊าซ..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 | หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนทชนิดก๊าซไหลผ่านแบบ 4 π | 6 |
| รูปที่ 2.4 | ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ Townsend กับความเข้มสนามไฟฟ้า..... | 7 |
| รูปที่ 2.5 | โครงสร้างพื้นฐานของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนท..... | 7 |
| รูปที่ 2.6 | รูปสัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสี..... | 11 |
| รูปที่ 2.7 | การเกิดสัญญาณพัลส์เนื่องจากไอออน..... | 11 |
| รูปที่ 2.8 | วงจรสมมูลย์ของหัววัดรังสีและระบบวัดรังสี..... | 13 |
| รูปที่ 2.9 | เส้นกราฟ HV Plateau ของหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ..... | 14 |
| รูปที่ 2.10 | การจัดระบบวัดเพื่อหาเส้นกราฟคุณลักษณะของหัววัดรังสีบรรจุก๊าซ..... | 14 |
| รูปที่ 2.11 | หัววัดรังสีแบบก๊าซไหลชนิดครึ่งวงกลม 2 π | 16 |
| รูปที่ 2.12 | หัววัดรังสีแบบก๊าซไหลชนิดหน้าต่างที่สามารถเปลี่ยนหน้าต่างได้..... | 16 |
| รูปที่ 2.13 | เปรียบเทียบโครงสร้างของหัววัดพรอพอร์ชันแนท..... | 18 |
| รูปที่ 2.14 | สมมูลย์ทางวงจรไฟฟ้าของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง..... | 18 |
| รูปที่ 2.15 | นิยามการวัดความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง..... | 19 |
| รูปที่ 2.16 | แสดงความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัด..... | 19 |
| รูปที่ 2.17 | หลักการแจกแจงตำแหน่งโดยวิธีวัดสัดส่วนประจุ..... | 20 |
| รูปที่ 2.18 | แผนภาพของวงจรรหาอนุภาค..... | 21 |
| รูปที่ 2.19 | ระบบวัดตำแหน่งรังสีชนิดวัดสัดส่วนประจุ..... | 22 |
| รูปที่ 2.20 | แผนภาพระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทรม์ชนิดสัญญาณ 2 ทาง..... | 23 |
| รูปที่ 2.21 | แสดงหลักการแจกแจงตำแหน่งโดยวิธีการวัดสัญญาณ 2 ด้าน..... | 24 |
| รูปที่ 2.22 | แผนภาพสำหรับวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทรม์ชนิดวัดสัญญาณทางเดียว..... | 26 |
| รูปที่ 2.23 | แสดงหลักการแจกแจงตำแหน่งโดยวิธีการวัดเวลาขาขึ้น ชนิดสัญญาณทางเดียว..... | 27 |
| รูปที่ 3.1 | แบบโครงสร้างหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น..... | 31 |
| รูปที่ 3.2 | เครื่องมือสำหรับสร้างสายแอนโตนความต้านทานสูง..... | 32 |
| รูปที่ 3.3 | ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเคลือบแอนโตน..... | 33 |
| รูปที่ 3.4 | กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของความต้านทานแอนโตน..... | 34 |

| | | |
|--------------|--|----|
| รูปที่ 3.5 | อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง..... | 34 |
| รูปที่ 3.6 | แผนภาพการจัดระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ..... | 35 |
| รูปที่ 3.7 | วงจรรหารสัดส่วนประจุ..... | 36 |
| รูปที่ 3.8 | แผนภาพระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดเวลาขาขึ้น..... | 38 |
| รูปที่ 3.9 | หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนตก๊าซไหลแบบไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น.. | 39 |
| รูปที่ 3.10 | อุปกรณ์หารสัดส่วนประจุ..... | 39 |
| รูปที่ 3.11 | ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ..... | 40 |
| รูปที่ 3.12 | ระบบวัดตำแหน่งแบบวัดเวลาขาขึ้น..... | 40 |
| รูปที่ 4.1 | แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของหัววัดรังสี..... | 44 |
| รูปที่ 4.2 | รูปสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัดรังสี..... | 45 |
| รูปที่ 4.3.ก | รูปสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งต้นทางของหัววัดรังสี..... | 45 |
| รูปที่ 4.3.ข | รูปสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งปลายทางของหัววัดรังสี..... | 46 |
| รูปที่ 4.4 | เส้นกราฟ HV Plateau ของหัววัดรังสี..... | 46 |
| รูปที่ 4.5 | แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรรหารสัดส่วนประจุ..... | 47 |
| รูปที่ 4.6 | กราฟทดสอบความเป็นเชิงเส้นการทำงานของวงจรรหารสัดส่วนประจุ..... | 48 |
| รูปที่ 4.7 | แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการวัดตำแหน่งและหาความสามารถ ในการแจกแจงตำแหน่งแบบวัดสัดส่วนประจุ..... | 49 |
| รูปที่ 4.8 | แพทเทอร์นแสดงความสามารถในการวัดตำแหน่ง แบบวัดสัดส่วนประจุ..... | 50 |
| รูปที่ 4.9 | แสดง position resolution ของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่ง แบบวัดสัดส่วนประจุที่ตำแหน่ง $x=30$ mm..... | 51 |
| รูปที่ 4.10 | แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการวัดตำแหน่งรังสีและความสามารถในการ แจกแจงตำแหน่งแบบวัดเวลาขาขึ้น (rise time)..... | 52 |
| รูปที่ 4.11 | แพทเทอร์นแสดง position resolution ของหัววัดรังสีที่ไบอัสไฟฟ้าศักดาสูง 2400 V..... | 54 |
| รูปที่ 4.12 | แพทเทอร์นแสดง position resolution ของหัววัดรังสีที่ไบอัสไฟฟ้าศักดาสูง 2425 V..... | 54 |
| รูปที่ 4.13 | แพทเทอร์นแสดง position resolution ของหัววัดรังสีที่ไบอัสไฟฟ้าศักดาสูง 2450 V..... | 55 |
| รูปที่ 4.14 | แพทเทอร์นแสดง position resolution ของหัววัดรังสีที่ไบอัสไฟฟ้าศักดาสูง | |

| | | |
|-------------|---|----|
| | 2475 V..... | 55 |
| รูปที่ 4.15 | แพทเทอร์นแสดง position resolution ของหัววัดรังสีที่โบฮัสไฟฟ้าศักดาสูง 2500 V..... | 56 |
| รูปที่ 4.16 | แพทเทอร์นแสดง position resolution ของหัววัดรังสีที่โบฮัสไฟฟ้าศักดาสูง 2525 V..... | 56 |
| รูปที่ 4.17 | เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งเทียบกับ HV bias..... | 57 |
| รูปที่ 4.18 | แพทเทอร์นแสดงการวัดตำแหน่งด้วยการวัดเวลาไรส์ไทม์..... | 58 |
| รูปที่ 4.19 | แสดง position resolution ของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบวัดเวลาไรส์ไทม์.. | 59 |
| รูปที่ 4.20 | ความไม่แน่นอนของระยะห่างพิกัดตำแหน่ง (spatial uncertainty) ที่ตำแหน่ง 3 ตำแหน่งบนความยาว 200 มิลลิเมตร ของหัววัดรังสีซึ่งทดสอบด้วย Fe-55 บังคับลำรังสีขนาด 0.4 มิลลิเมตร..... | 59 |
| รูปที่ 4.21 | กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของหัววัดรังสีวัดตำแหน่ง ด้วยวิธีวัดไรส์ไทม์..... | 60 |
| รูปที่ 4.22 | แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการวัดตำแหน่ง แบบโปรไฟล์..... | 62 |
| รูปที่ 4.23 | โปรไฟล์แสดงความสามารถในการวัดตำแหน่งแบบโปรไฟล์จากแผ่นทดสอบ เาะช่องขนาด 0.8 มิลลิเมตร ห่างกัน 10 มิลลิเมตร จำนวน 20 ช่อง..... | 63 |
| รูปที่ 4.24 | แสดงผลการเกิดพิกัดตำแหน่งของการวัดแผ่นทดสอบ..... | 63 |
| รูปที่ 4.25 | รูปถ่ายแพทเทอร์นการวัดตำแหน่งจากจอแสดงผล MCA..... | 64 |
| รูปที่ 4.26 | โปรไฟล์การวัดตำแหน่งรังสีจากต้นกำเนิดรังสี Fe-55 โดยตรง..... | 64 |
| รูปที่ 4.27 | ทดสอบการวัดไลน์โปรไฟล์จากต้นกำเนิดรังสี Fe-55 แบบวงแหวน..... | 65 |