การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข

นายสุขใจ เกียรติศักดิ์วัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2536

ISBN 974-582-549-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019431
ม7125637

DEVELOPMENT OF A PERSONAL DIGITAL DOSIMETER

MR. SUKJAI KIATISAKWATANA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1993

ISBN 974-582-549-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข
โดย	นายสุขใจ เกียรติศักดิ์วัฒนา
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ. อรรถพร ภัทรสุมันต์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วิรุฬห์ มังคละวิรัช)

..... กรรมการ

(นายศิริชัย เชียนมีสุข)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุชใจ เกียรติศักดิ์วัฒนา : การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข (DEVELOPMENT OF A PERSONAL DIGITAL DOSIMETER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.อรรถพร ภัทรสุมันต์, 109 หน้า. ISBN 974-582-549-2

เครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้นนี้ ออกแบบให้ใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่หาได้ภายในประเทศเป็นหลัก มีขนาดกระทัดรัดเพื่อพกพาขณะปฏิบัติงานได้สะดวก ทั้งนี้เพื่อให้มีราคาประหยัด บำรุงรักษาง่ายและทนต่อสภาพใช้งานในสภาวะแวดล้อมของประเทศ นอกจากนี้การใช้ไอซีตระกูลซีมอสช่วยให้สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าน้อย เครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลสามารถวัดปริมาณรังสีสะสมได้ในช่วง 0 - 9999 มิลลิเรินท์เกน แสดงผลด้วยตัวเลขไดโอดเปล่งแสง ซึ่งจะช่วยให้สามารถอ่านค่าปริมาณรังสีในที่มืดได้อย่างชัดเจน มีระบบส่งเสียงเตือนให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงสภาวะปริมาณรังสีในบริเวณปฏิบัติงาน 4 รูปแบบ คือ ปริมาณรังสีสะสมเมื่อถึงพิกัดที่ตั้งไว้ ปริมาณรังสีทุก 1 มิลลิเรินท์เกน ปริมาณรังสีที่สูงเกินพิกัดของหัววัดรังสี และอัตราปริมาณรังสีที่สามารถตั้งพิกัดได้ที่ระดับ 2.5, 10 และ 25 มิลลิเรินท์-เกนต่อชั่วโมง ตัวเครื่องขนาด 7.4 x 12 x 3 ช.ม.^{3} น้ำหนักรวม 300 กรัม ทำงานด้วยแบตเตอรีนิเกิล-แคดเมี่ยมชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ขนาด 4.8 โวลต์ 180 มิลลิแอมแปร์-ชั่วโมง โดยวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีไกเกอร์ขนาดเล็ก

ผลทดสอบการทำงานและปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถวัดอัตราปริมาณรังสีได้ไม่เกิน 2.5 เรินท์เกนต่อชั่วโมง มีความคลาดเคลื่อนในการวัดน้อยกว่า $\pm$ 20 เปอร์เซนต์ ในช่วงพลังงาน 100 - 1330 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มีความแม่นยำและความเที่ยงตรงในการวัดปริมาณรังสีที่พลังงานของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 เท่ากับ $\pm$ 14เปอร์เซนต์ และ 3 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ สำหรับช่วงอัตราปริมาณรังสีไม่เกิน 2.5 เรินท์เกนต่อชั่วโมง เมื่อประจุไฟฟ้าเต็มที่สามารถใช้งานต่อเนื่องได้นาน 7 ชั่วโมง มีการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า300 มิลลิวัตต์ ขณะที่ศักดาไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรีที่ 4.53 โวลต์ มีผลทำให้การวัดคลาดเคลื่อนน้อยกว่า $\pm$ 15 เปอร์เซนต์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C216946 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: PERSONAL DOSIMETER/DIGITAL DOSIMETER

SUKJAI KIATISAKWATANA : DEVELOPMENT OF A PERSONAL DIGITAL DOSIMETER . THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO-ADVISOR : ATTAPORN PATTARASUMUNT. 109 pp.
ISBN 974-582-549-2

A compact size personal dosimeter was developed using electronic parts mainly available locally with the aim of having a low cost dosimeter capable of operating in local ambient conditions with ease of maintenance. Besides,the use of CMOS IC's reduces power consumption considerably. The dosimeter has a measuring range of 0-9999 mR using 7 segment LED display clearly readable even in the illuminated area. It is also equipped with alarm system to monitor presettable dose accumulation, dose rate at each 1 mR , saturation of GM detector at high level dose and the radiation surpassing levels selectable in steps of 2.5, 10 and 25 mR/hr. The dosimeter has a size of 7.4 x 12 x 3 cm^3 with a weight of 300 g and is powered with four 1.2 V AAA size rechargeable Ni-Cd batteries with an energy capacity of 180 mAh each. A miniature GMtube for gamma and X-ray measurement is used as radiation detector.

The results of performance testing and calibration show that the dosimeter can measure a dose rate upto 2.5 R/hr with an error less than of $\pm$ 20 % in energy range of 100-1330 keV. Using Cs-137 standard calibration source, the accuracy and precision of the dosimeter at dose limit of 2.5 R/hr are $\pm$ 14 % and 3 % respectively. The dosimeter can be continuously operated for 7 hr with fully charged batteries at 300 mW power consumption, while at the lowest operational battery voltage of 4.53 V the dosimeter shows an error less than $\pm$ 15 % .

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รวมทั้งนายศิริชัย เชียนมีสุข ผู้อำนวยการกองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติที่ท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณกองการวัดกัมมันตภาพรังสี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติที่ได้เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary Standard Dosimetry Laboratory, SSDL-OAEP) โดยเฉพาะคุณชงชัย สุดประเสริฐ ที่ได้ช่วยเหลือในการทดสอบปรับเทียบเครื่องต้นแบบเป็นอย่างดี และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ช่วยสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฎ
บทที่
1 บทนำ
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3
1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย..... 4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 4
2 การวัดปริมาณรังสี
2.1 ความปลอดภัยด้านการปฏิบัติการเกี่ยวกับรังสี..... 5
2.1.1 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสีเบื้องต้น..... 6
2.1.2 หน่วยวัดปริมาณรังสี..... 7
2.2 การวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล..... 9
2.2.1 อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีประเภทอ่านค่าวัดทางอ้อม..... 9
2.2.2 อุปกรณ์วัดปริมาณรังสีประเภทอ่านค่าวัดได้ทันที..... 12
2.3 หลักการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล
แบบอิเล็กทรอนิกส์..... 13
2.3.1 ระบบวัดส่วนหน้าของเครื่องวัด..... 14
2.3.2 วงจรปรับเทียบปริมาณรังสี..... 22
2.3.3 วงจรส่งเสียงเตือนและบอกปริมาณรังสี..... 23

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
3	การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข	
	3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข	25
	3.2 การออกแบบและพัฒนาวงจรของเครื่องวัดปริมาณรังสี	27
	3.2.1 วงจรหัววัดรังสี	27
	3.2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรง	27
	3.2.3 วงจรแต่งรูปสัญญาณ	28
	3.2.4 วงจรปรับเทียบค่าปริมาณรังสี	30
	3.2.5 วงจรนับรังสีและแสดงผลปริมาณรังสี	31
	3.2.6 วงจรส่งเสียงเตือนและบอกปริมาณรังสี	33
	3.2.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ	35
	3.3 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์	38
4	การทดสอบสมรรถนะและการปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล	
	4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ	41
	4.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล	42
	4.2.1 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรง	42
	4.2.2 การทดสอบรูปสัญญาณจากหัววัดรังสีไกเกอร์	46
	4.2.3 การทดสอบวงจรเรทมิเตอร์	48
	4.2.4 การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ	50
	4.3 การปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล	54
	4.3.1 การปรับเทียบระดับเตือนอัตราปริมาณรังสี	55
	4.3.2 การปรับเทียบปริมาณรังสีสะสม	55
	4.4 การทดสอบการตอบสนองต่อทิศทางการวัดปริมาณรังสีของเครื่อง (directional dependence)	56
	4.5 การทดสอบการตอบสนองต่อพลังงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พลังงานของ Cs-137 (energy dependence)	59

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

4.6 การทดสอบการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสีของเครื่องวัดปริมาณรังสี (dose rate dependence)..... 61
4.7 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลเมื่อวัดแบบต่อเนื่อง (integral linearity)..... 62
4.8 การทดสอบความแม่นยำ (accuracy)..... 64
4.9 การทดสอบความเที่ยงตรง (precision)..... 66
4.10 การทดสอบผลตอบสนองต่อศักดาไฟฟ้าต่ำ..... 66
5 สรุปวิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 72
5.2 ลักษณะพิกัดของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้น (NT 1401)..... 74
5.3 ข้อเสนอแนะ..... 76
เอกสารอ้างอิง..... 77
ภาคผนวก ก 79
ภาคผนวก ข 82
ภาคผนวก ค 84
ภาคผนวก ง 86
ประวัติผู้เขียน 109

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ความสัมพันธ์ของกระแสที่จ่ายให้โหลดกับศักดาไฟฟ้าของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรง..... 43
4.2 ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าต่ำและศักดาไฟฟ้าสูงของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง..... 45
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราพัลส์และศักดาไฟฟ้าทางออกของเรทมิเตอร์..... 49
4.4 ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าต่ำและการสั้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของเครื่องวัดปริมาณรังสี..... 51
4.5 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาใช้งานและศักดาไฟฟ้าของแบตเตอรี่.... 53
4.6 ผลการปรับเทียบปริมาณรังสีสะสม..... 56
4.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองต่อทิศทางการวัดปริมาณรังสีระหว่างเครื่องวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ..... 58
4.8 เปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองต่อพลังงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นและเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ..... 60
4.9 เปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสีของเครื่องวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นและเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ.... 61
4.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้นและที่ผลิตจากต่างประเทศ..... 63
4.11 ผลทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล..... 65
4.12 แสดงผลความเที่ยงตรงของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล..... 66
4.13 ค่าคลาดเคลื่อนจากผลของศักดาไฟฟ้า..... 67
ข.1 ตารางเลือกค่าหารความถี่ที่ตำแหน่งต่างๆของ SW_2..... 82
ข.2 ตารางเลือกค่าหารความถี่ที่ตำแหน่งต่างๆของ SW_3..... 83

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 ลักษณะของฟิล์มแบดจ์ก่อนบรรจุแผ่นฟิล์มใส่กลัก..... 10
2.2 ลักษณะของชุดเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแบบอิเล็กโตรสโคป ไอออนไนเซชัน แชมเบอร์..... 12
2.3 ลักษณะของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแบบอิเล็กทรอนิกส์..... 13
2.4 แผนภาพของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแบบอิเล็กทรอนิกส์.... 14
2.5 ลักษณะของหัววัดรังสีไกเกอร์ขนาดเล็ก..... 15
2.6 วงจรหัววัดรังสีไกเกอร์แบบ AC และ DC coupling..... 15
2.7 วงจรพื้นฐานของวงจรดี-ซี คอนเวอร์เตอร์..... 16
2.8 วงจรริงกิง-โชค ดี-ซีคอนเวอร์เตอร์..... 17
2.9 เส้นกราฟแสดงการทำงานของวงจรริงกิง-โชค ดี-ซีคอนเวอร์เตอร์. 18
2.10 รูปคลื่นสัญญาณและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรริงกิง-โชค ดี-ซีคอนเวอร์เตอร์..... 19
2.11 วงจรทรานสฟอร์เมอร์ ดี-ซี คอนเวอร์เตอร์..... 20
2.12 วงจรดริฟเวนไทพ์ไดเรคเคอร์เรนท์คอนเวอร์เตอร์..... 20
2.13 วงจรพุช-พูล ดี-ซีคอนเวอร์เตอร์..... 21
2.14 ระบบวัดส่วนหน้าและรูปสัญญาณพัลส์..... 22
2.15 การทำงานของวงจรหารปริมาณนับรังสี..... 23
2.16 แผนภาพการทำงานของระบบส่งเสียงเตือนเพื่อบอกสภาวะต่างๆ.... 24
3.1 แผนภาพของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้น..... 26
3.2 วงจรหัววัดรังสีไกเกอร์แบบ DC coupling..... 27
3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง..... 28
3.4 แผนภาพการทำงานของวงจรแต่งรูปสัญญาณ..... 29
3.5 วงจรแต่งรูปสัญญาณ..... 29
3.6 วงจรปรับเทียบค่าปริมาณรังสี..... 30
3.7 แผนภาพของวงจรนับรังสีและแสดงผลปริมาณรังสี..... 31
3.8 วงจรนับรังสีและแสดงปริมาณรังสี..... 32

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.9 วงจรโดสเรท..... 33
3.10 วงจรเตือนและบอกปริมาณรังสี..... 34
3.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ..... 36
3.12 วงจรของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข..... 37
3.13ก. การวางอุปกรณ์บนหน้าปัทม์ของเครื่องวัด..... 38
3.13ข. แผนผังแสดงการจัดวางแผ่นวงจรและอุปกรณ์ภายในกล่องบรรจุ... 39
3.14 วงจรแผ่นพิมพ์ที่ออกแบบขึ้น..... 40
3.15 กล่องบรรจุแผ่นวงจรและอุปกรณ์..... 40
4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า..... 42
4.2 เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากับกระแสที่จ่ายให้กับโหลด..... 44
4.3 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าต่ำและศักดาไฟฟ้าสูง..... 45
4.4 เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำกับวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรง..... 46
4.5 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบรูปสัญญาณจากวงจรหัววัดรังสี..... 47
4.6 รูปสัญญาณพัลส์จากวงจรหัววัดรังสี..... 47
4.7 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของวงจรเรทมิเตอร์..... 48
4.8 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของอัตราพัลส์และศักดาไฟฟ้าทางออกของเรทมิเตอร์..... 49
4.9 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรตรวจสอบสภาวะศักดาไฟฟ้าต่ำ... 50
4.10 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า..... 51
4.11 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าต่ำและการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของเครื่องวัดปริมาณรังสี..... 52
4.12 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่..... 53

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของระยะเวลาใช้งานและศักดาไฟฟ้าของแบตเตอรี่..... 54
4.14 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคล... 55
4.15 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบทิศทางการวัดรังสี..... 57
4.16 เส้นกราฟเปรียบเทียบการตอบสนองต่อทิศทางการวัดของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้นและของต่างประเทศ (Alnor รุ่น RAD-21L)..... 57
4.17 เส้นกราฟเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อพลังงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่พัฒนาขึ้นและที่ผลิตจากต่างประเทศ (Alnor รุ่น RAD-21L)..... 59
4.18 เส้นกราฟเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่ออัตราปริมาณรังสีระหว่างเครื่องวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นและเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ..... 62
4.19 เส้นกราฟเปรียบเทียบผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของค่าปริมาณรังสีจากเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้นและเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ..... 64
4.20 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าต่ำและผลตอบสนองของค่าที่อ่าน..... 67
4.21 เครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้น..... 68
4.22 ภายในเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่สร้างขึ้น..... 68
4.23 เปรียบเทียบขนาดเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่สร้างขึ้นกับปากกา..... 69
4.24 เครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้นกับเครื่องวัดชนิดเดียวกันจากต่างประเทศ..... 69
4.25 ภายในห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ..... 70
4.26 ชุดควบคุมห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ..... 70
4.27 อุปกรณ์ปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลแสดงผลเชิงตัวเลข..... 71